SISTEMA EXPERTO HÍBRIDO PARA LA PROGRAMACIÓN DE TAREAS EN SISTEMAS DE SERVICIOS

Eduyn Ramiro López Santana

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

DOCTORADO EN INGENIERÍA

ÉNFASIS EN CIENCIA DE LA INFORMACIÓN Y EL CONOCIMIENTO

BOGOTÁ, D.C. 2018

Página en blanco
intencionalmente

SISTEMA EXPERTO HÍBRIDO PARA LA PROGRAMACIÓN DE TAREAS EN SISTEMAS DE SERVICIOS

Tesis de grado para optar por el título de Doctor en Ingeniería

Presentada por:

Eduyn Ramiro López Santana

Director: PhD Germán Andrés Méndez Giraldo

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

DOCTORADO EN INGENIERÍA

ÉNFASIS EN CIENCIA DE LA INFORMACIÓN Y EL CONOCIMIENTO

BOGOTÁ, D.C. 2018

Página en blanco
intencionalmente

COMISIÓN DE DOCTORADO

Esta tesis, titulada "SISTEMA EXPERTO HÍBRIDO PARA LA PROGRAMACIÓN DE TAREAS EN SISTEMAS DE SERVICIOS", escrita por Eduyn Ramiro López Santana, ha sido aprobada en cuanto a estilo y contenido intelectual.

Hemos leído esta tesis y la aprobamos,

_____
Dr. Darío Liberona de la Fuente
Jurado 1

_____
Dr. William Javier Guerrero Rueda
Jurado 2

_____
Dr. Víctor Hugo Medina García
Jurado 3

_____
Dr. Germán Andrés Méndez Giraldo
Director

Fecha de la defensa: ___Octubre 31 de 2018____

©Derechos de Autor 2018 de Eduyn Ramiro López Santana

Todos los derechos reservados.

DEDICATORIA

A mi esposa Adriana, el amor de mi vida, y Margarita, mi madre, las dos mujeres quienes siempre han creído en mí, y son mi inspiración y motivación.

AGRADECIMIENTOS

Primero agradezco a Dios por guiar mi camino. Agradezco a mi esposa Adriana, por su compañía, amor y paciencia durante este tiempo, y por alegrar mi vida. Agradezco a mi familia, mamá y hermanas, por siempre apoyar y creer en mis sueños.

Agradezco a mi tutor el profesor Germán Méndez Giraldo, por su guía intelectual, profesional y personal, no solo en el desarrollo de esta tesis doctoral, sino desde el inicio de mi formación profesional. Germán ha sido un ejemplo a seguir, profesional y personalmente, y fue un placer trabajar con él.

A mis colegas del grupo de investigación ARCOSES y de la universidad, en especial a Lindsay y Carlos, les agradezco por su soporte, discusión y ayuda en momentos cruciales, además de creer, junto con Germán, en un grupo de investigación donde podamos crecer y aprender en un ambiente amigable.

Agradezco de manera especial a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, mi alma mater, a quien le debo mi formación profesional y personal, siempre estaré agradecido con esta institución por la labor social que realiza con un servicio de educación de alta calidad. Siempre he creído en el talento humano invaluable de la universidad, sus profesores y en especial sus estudiantes, agradezco a los estudiantes de ingeniería industrial de pregrado y de maestría quienes ayudaron a soportar el desarrollo de mi tesis doctoral, además de brindarme la oportunidad de ser su tutor en algunos trabajos y lograr con éxitos sus objetivos.

Agradezco a los profesores Francisco Ramis e Iván Santelices de la Universidad del Bío Bío, Concepción-Chile, por su hospitalidad durante mi estancia en Chile, además de las experiencias realizadas en investigación, las cuales enriquecieron mi formación profesional.

También agradezco a los jurados del tribunal de defensa, por sus aportes, comentarios y sugerencias que ayudaron a mejorar este documento.

Finalmente, esta tesis doctoral no habría sido posible sin el soporte financiero de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, su Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico (CIDC), la coordinación del Doctorado en Ingeniería, y la Alianza del Pacifico. Agradezco a estas instituciones por su ayuda y gestión.

LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

CCSS:	Componente de Clasificación de Sistemas de Servicios
CPT:	Componente de Programación de Tareas
DSS:	Decision Support Systems
IA:	Inteligencia Artificial
PT:	Programación de Tareas
PTSS	Programación de Tareas en Sistemas de Servicios
SBR:	Sistema Basado en Reglas
SE:	Sistema Experto
SS:	Sistema de Servicios
SSME:	Service Science and Management Engineering

Página en blanco intencionalmente

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Pág.

Índice de Contenidos i
Índice de Tablas iii
Índice de Figuras v
Resumen 1
Abstract 2
Introducción 3
Capítulo 1. Fundamentación de la investigación 7
1.1 Generalidades y motivación 7
1.2 Problema de investigación 11
1.3 Hipótesis y objetivos 12
1.4 Justificación de la investigación 12
1.5 Aspectos metodológicos 13
1.6 Estructura de la tesis 14
Capítulo 2. Sistemas de Servicios y Programación de Tareas 17
2.1 Marco referencial 17
2.1.1 Ciencia de los servicios 18
2.1.2 Programación de tareas 25
2.1.3 Gestión de conocimiento y modelos de inteligencia 35
2.2 Revisión sobre toma de decisiones en la ciencia de los servicios 40
2.2.1 Resultados iniciales 40
2.2.2 Clasificación problemas a nivel estratégico 43
2.2.3 Clasificación problemas a nivel táctico 45
2.2.4 Clasificación problemas a nivel operativo 47
2.3 Definición de sistema de servicio y notación propuesta 50
2.3.1 Definición para sistema de servicio 51
2.3.2 Notación para programación de tareas en sistemas de servicios 51
2.3.3 Caracterización de literatura sobre la notación propuesta 54
2.4 Resumen y conclusiones del capítulo 66
Capítulo 3. Sistema Experto para Programación de Tareas en Sistemas de Servicios 69
3.1 Estructura general del sistema experto propuesto 69
3.2 Sistema experto para el Componente de Clasificación de Sistemas de Servicios 70
3.2.1 Descripción del sistema de clasificación de actividades económicas 71
3.2.2 Base de conocimiento para clasificación de sistemas de servicios 72
3.2.3 Motor de inferencia para clasificación de sistemas de servicios 81
3.2.4 Operación del sistema experto para clasificación de sistemas de servicios 85
3.3 Sistema experto para el Componente de Programación de Tareas 87
3.3.1 Base de conocimiento para el componente de programación de tareas 87
3.3.2 Motor de inferencia para el componente de programación de tareas 88
3.3.3 Operación del sistema experto para programación de tareas 92

3.4 Prototipo computacional *SchES*: *Sch*eduling with *E*xpert *S*ystems 95
3.4.1 Lenguajes y paquetes de software empleados 95
3.4.2 Generalidades de *SchES* 96
3.5 Resumen y conclusiones del capítulo 100
Capítulo 4. Aplicaciones 103
4.1 Caso 1: Servicio de mensajería 103
4.1.1 Descripción del Caso 1 105
4.1.2 Resultados de clasificación de sistemas de servicios para el Caso 1 106
4.1.3 Resultados componente de programación de tareas para el Caso 1 109
4.1.4 Resultados e indicadores para el Caso 1 112
4.2 Caso 2: Servicio de cuidado a la salud domiciliaria 117
4.2.1 Descripción del caso 2 118
4.2.2 Resultados para la clasificación de sistemas de servicios para el Caso 2 120
4.2.3 Resultados del componente de programación de tareas para el Caso 2 121
4.2.4 Resultados e indicadores para el Caso 2 125
4.3 Caso 3: Servicios de mantenimiento 127
4.3.1 Descripción del Caso 3 128
4.3.2 Resultados del componente de programación de tareas para el Caso 3 129
4.3.3 Resultados e indicadores para el Caso 3 134
4.4 Resumen y conclusiones del capítulo 137
Capítulo 5. Conclusiones generales y contribuciones de la tesis 139
5.1 Conclusiones generales 139
5.2 Recomendaciones 141
5.3 Resumen de contribuciones de la tesis 142
5.4 Lista de publicaciones derivadas de la tesis 143
5.5 Trabajos futuros 145
Referencias 147
Anexos 159

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 2-1 Definiciones de sistemas de servicios....20
Tabla 2-2 Diferencias entre sistemas de manufactura y servicios....22
Tabla 2-3 Comparación de notaciones para el problema de programación de tareas....29
Tabla 2-4 Características de metaheurísticas utilizadas en problemas de programación de tareas....34
Tabla 2-5 Conceptos de inteligencia....36
Tabla 2-6 Listado de fuentes de revistas clasificadas según documentos y citas....42
Tabla 2-7 Información de literatura clasificada a nivel estratégico....43
Tabla 2-8 Clasificación de la literatura respecto a las áreas de aplicación y tipos de técnicas de solución a nivel estratégico....44
Tabla 2-9 Información de referencias a nivel táctico....46
Tabla 2-10 Clasificación de la literatura respecto a las áreas de aplicación y tipos de técnicas de solución a nivel táctico....47
Tabla 2-11 Información de referencias a nivel operativo....48
Tabla 2-12 Clasificación de la literatura respecto a las áreas de aplicación y tipos de técnicas de solución a nivel operativo....49
Tabla 3-1 Definición de atributos de base de conocimiento para el CCSS....72
Tabla 3-2 Descripcion de la salida del CCSS....73
Tabla 3-3 Lista de Caracteristicas....73
Tabla 3-4 Salidas y rango de valores de los atributos....74
Tabla 3-5 Salidas y rangos de valores de las características....74
Tabla 3-6 Subconjunto de las características para cada atributo....75
Tabla 3-7 Entradas del método ANFIS para el CCSS.....79
Tabla 3-8 Resultados del error promedio para el modelo optimización no lineal y ANFIS aplicación a sistema CIIU....79
Tabla 3-9 Algoritmos de clasificación considerados para el motor de inferencia del CCSS..81
Tabla 3-10 Listado de experimentos para el CCSS....82
Tabla 3-11 Resultados de los experimentos para el motor de inferencia del CCSS....82
Tabla 3-12 Algoritmos de clasificación considerados para el SBR del CPT....88
Tabla 3-13 Listado de experimentos de clasificación para el CPT....89
Tabla 3-14 Resultados de los experimentos para el SBR de tipo de problema....89
Tabla 3-15 Resultados de los experimentos para el SBR del número de criterios.....90
Tabla 3-16 Resultados de los experimentos para el SBR del tipo de criterio. 90
Tabla 3-17 Resultados de los experimentos para el SBR del grupo de técnica de solución. .91
Tabla 4-1 Resultados de atributos para el modelo de optimización no lineal para el Caso 1 106
Tabla 4-2 Resultados de atributos para el modelo ANFIS para el Caso 1....106
Tabla 4-3 Resultados etapa de programación para el Caso 1....114
Tabla 4-4 Comparación resultados etapa de zonificación para el caso 1....115
Tabla 4-5 Resultados ACS-TSPTW para el diseño de rutas para el caso 1....116
Tabla 4-6 Resumen indicador distancia promedio por etapas para el caso 1....116

Tabla 4-7 Indicador de nivel de servicio para el caso 1 117
Tabla 4-8 Distribución de usuarios del servicio de cuidado domiciliario por localidad 119
Tabla 4-9 Resultados de atributos para el modelo de optimización no lineal para el Caso 2 120
Tabla 4-10 Resultados de atributos para el modelo ANFIS para el Caso 2..... 120
Tabla 4-11 Resultados para la instancia de prueba del Caso 2. 126
Tabla 4-12 Indicadores de eficiencia y eficacia del Caso 2 respecto a los experimentos base 127
Tabla 4-13 Resultados solución óptima de costos de mantenimiento del Caso 3 135
Tabla 4-14 Resultados solución óptima de costos de ruteo del Caso 3..... 135
Tabla 4-15 Resultados de los costos de mantenimiento en experimento base del Caso 3.. 136
Tabla 4-16 Resultados de los costos de ruteo en experimento base del Caso 3 136
Tabla 4-17 Indicadores de eficiencia y eficacia del Caso 3 respecto al experimento base... 137

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1-1 Metodología de construcción del sistema experto. 14
Figura 2-1 Estrategia para la construcción del marco teórico 17
Figura 2-2. Valor agregado de los servicios como % del PIB. 18
Figura 2-3. Participación del ingreso operaciones (*a*) y de la utilidad (*b*) por sectores en el año 2017. 19
Figura 2-4. Porcentaje de población ocupada por sector económico en Colombia año 2017. 20
Figura 2-5. Estructura jerárquica de la toma de decisiones para sistemas de servicios 22
Figura 2-6 Funciones del proceso de toma de decisiones de programación de tareas en un sistema de manufactura 27
Figura 2-7 Funciones del proceso de toma de decisiones de programación de tareas en un sistema de servicios 27
Figura 2-8 Arquitectura genérica de un SE. 38
Figura 2-9 Metodología de búsqueda de literatura de problemas de toma de decisiones en ciencia de los servicios. 41
Figura 2-10. Número de documentos por año y clasificación de alcance de la decisión para la revisión de literatura. 41
Figura 2-11. Comparación de las áreas de clasificación muestra inicial vs muestra final 42
Figura 2-12 Distribución de los documentos a nivel estratégico según el área (a) y al tipo de técnica (b). 45
Figura 2-13 Distribución del tipo de técnica para cada área del nivel estratégico. 45
Figura 2-14 Distribución de los documentos del nivel táctico según área (a) y al tipo de técnica. 46
Figura 2-15 Distribución de los documentos en cuanto al problema (a) y al tipo de técnica (b) del nivel operativo. 48
Figura 2-16 Clasificación de los documentos en cuanto al tipo de técnica por tipo de problema del enfoque operativo. 50
Figura 2-17 Representación de definición de sistema de servicios a) vista de la lógica de productos, b) vista de la lógica de servicios 51
Figura 2-18 Parámetros del campo Cliente (*C*) de la notación 52
Figura 2-19 Parámetros del campo Recursos (*R*) de la notación 53
Figura 2-20 Parámetros del campo Control de Flujo (*F*) de la notación 54
Figura 2-21 Parámetros del campo Medida de desempeño (*y*) de la notación 54
Figura 2-22 Metodología de búsqueda de literatura de problemas de programación de tareas en sistemas de servicios. 55
Figura 2-23 Resultados de caracterización por tipo de problema para el componente Trabajos de campo Cliente. 56
Figura 2-24 Resultados de caracterización por tipo de problema para el componente Proceso de llegada-Arribos del campo Cliente. 57

Figura 2-25 Resultados de caracterización por tipo de problema para el componente Fila-cola del campo Recurso. 57
Figura 2-26 Resultados de caracterización por tipo de problema para el componente Servidores del campo Recurso. 58
Figura 2-27 Resultados de caracterización por tipo de problema para el componente Atención-Salida del campo Recurso. 59
Figura 2-28 Resultados de caracterización por tipo de problema para el componente Propiedad del campo Control de Flujo. 60
Figura 2-29 Resultados de caracterización por tipo de problema para el componente Movimiento del campo Control de Flujo. 60
Figura 2-30 Resultados de caracterización por tipo de problema para el componente Tipo de Atención del campo Control de Flujo. 61
Figura 2-31 Resultados de caracterización de por tipo de problema para problemas clasificados de servicio y generales. 62
Figura 2-32 Resultados de caracterización de número de criterios por tipo de problema. 62
Figura 2-33 Resultados de caracterización de media de desempeño por tipo de problema. .62
Figura 2-34 Resultados de caracterización de número de criterios por tipo de problema. 63
Figura 2-35 Resultados de caracterización de tipo de técnica de solución por tipo de problema. 63
Figura 2-36 Resultados de caracterización de tipo de técnica de solución para problemas de servicio y general....63
Figura 2-37 Resultados de caracterización de tipo de técnica de solución para problemas de servicio y general y por tipo de problema. 64
Figura 2-38 Resultados de caracterización de tipo de técnica de solución para problemas de servicio y genera detallados....64
Figura 2-39 Resultados de caracterización de tipo de problema resuelto para cada técnica de solución. 65
Figura 3-1 Marco general de SE propuesto para PTSS 69
Figura 3-2 Estructura del componente de clasificación de sistemas de servicios (CCSS). 70
Figura 3-3 Estructura del componente de programación de tareas (CPT). 71
Figura 3-4. Estructura jerárquica de clasificación CIIU. 71
Figura 3-5. Estructura modificada de la jerarquía de clasificación CIIU 72
Figura 3-6. Funciones de pertenencia para el ejemplo.....76
Figura 3-7. Arquitectura del ANFIS para el ejemplo. 77
Figura 3-8. Arquitectura del ANFIS utilizado para la estimación de atributos. 78
Figura 3-9. Ejemplo de representación de las funciones de pertenencia para (a) Características, (b) Atributo coproducción.....78
Figura 3-10. Resultados del atributo coproducción para los datos de entrenamiento, ANFIS y optimización.....80
Figura 3-11. Superficie de respuesta para atributo de coproducción. 80
Figura 3-12. Flujograma de conocimiento en WEKA para algoritmo J48 en el CCSS. 82
Figura 3-13. Árbol de clasificación J48 para el *Sector*.....83
Figura 3-14. Árbol de Clasificación J48 para la S*ección*.....84
Figura 3-15. Árbol de Clasificación J48 para la *División*.....85
Figura 3-16. Diagrama de flujo de operaciones de SE para el CCSS 86
Figura 3-17. Flujograma de conocimiento en WEKA para algoritmo PART para el CPT. ..89
Figura 3-18. Diagrama de flujo de operaciones de SE para el CPT Fase 1. 92
Figura 3-19. Diagrama de flujo de operaciones de SE para el CPT Fase 2. 93
Figura 3-20. Ventana del módulo Principal de SchES.....97
Figura 3-21 Ventana de adquisición de conocimiento del módulo Clasificador Servicios de SchES.....98

Figura 3-22 Ventana de clasificador de actividades del módulo Clasificador Servicios de SchES. 98
Figura 3-23 Ventana de Clasificador Scheduling de SchES. 99
Figura 3-24 Ventana de tipo de problema del Clasificador de Scheduling de *SchES* 100
Figura 3-25 Ventana de diseño de la técnica para problema específico del Clasificador de Scheduling de *SchES*. 101
Figura 4-1 Ejemplo de etapas del proceso en servicios de mensajería. 104
Figura 4-2 Distribución geográfica de los clientes para caso 1 105
Figura 4-3 Resultados del modelo de optimización para los atributos del Caso 1: (a) modelo de optimización y (b) modelo basado en ANFIS. 107
Figura 4-4 Preguntas ingresadas en *SchES* para el CCSS del Caso 1. 107
Figura 4-5 Resultados de los atributos en *SchES* del CCSS para el Caso 1 108
Figura 4-6 Resultados de clasificación de actividad económica del CCSS para el Caso 1 108
Figura 4-7 Resultados tipo de problema del CPT para el Caso 1. 109
Figura 4-8 Resultados tipo de criterio del CPT para el Caso 1. 110
Figura 4-9 Resultados grupo de técnica de solución del CPT para el Caso 1. 111
Figura 4-10 Resultados selección de problema específico del CPT por cada campo de la notación para el Caso 1. 111
Figura 4-11 Resultados selección de medida de desempeño específica del CPT por cada campo de la notación para el Caso 1. 112
Figura 4-12 Resultados selección de técnica de solución específica del CPT por cada campo de la notación para el Caso 1 113
Figura 4-13 Resultados de la selección específica del CPT para el Caso 1. 113
Figura 4-14 Resultados de programación para los tres días del Caso 1. 115
Figura 4-15 Resultados Zonificación para el caso 1(a) Heurística basada en centros geométricos y (b) Resultados heurística de barrido 115
Figura 4-16 Ejemplo ruta 68 del día 1 para el caso 1 116
Figura 4-17 Resultados del modelo de optimización para los atributos del Caso 2: (a) modelo de optimización y (b) modelo basado en ANFIS. 121
Figura 4-18 Resultados de clasificación de actividad económica del CCSS para el Caso 2. 122
Figura 4-19 Resultados tipo de problema del CPT para el Caso 2. 123
Figura 4-20 Resultados del tipo de criterio del CPT para el Caso 2. 123
Figura 4-21 Resultados del grupo de técnica de solución del CPT para el Caso 2. 124
Figura 4-22 Resultados de la selección específica del CPT para el Caso 2. 125
Figura 4-23 Resultados de los documentos relacionados con la técnica seleccionada en el CPT para el Caso 2. 125
Figura 4-24 Frontera eficiente de las funciones objetivo FO_1 y FO_2 de la instancia de prueba para el Caso 2. 126
Figura 4-25. Datos ingresados para clasificación de actividad del Caso 3 129
Figura 4-26 Resultados tipo de problema del CPT para el Caso 3. 130
Figura 4-27 Resultados tipo de criterio del CPT para el Caso 3. 130
Figura 4-28 Resultados grupo de técnica de solución del CPT para el Caso 3. 131
Figura 4-29 Resultados selección de problema específico del CPT para el Caso 3 132
Figura 4-30 Resultados selección de tipo de criterio específico del CPT para el Caso 3. 132
Figura 4-31 Resultados selección de técnica de solución específica del CPT para el Caso 3. 133
Figura 4-32 Resumen de resultados selección específica del CPT para el Caso 3. 133
Figura 4-33 Esquema de solución para el problema de mantenimiento del caso 3 134
Figura 4-34 Resultados de método iterativo para el problema de mantenimiento del Caso 3 135
Figura 4-35 Resultados de método iterativo para el problema de mantenimiento del Caso 3 variando el número de clientes 136

Página en blanco intencionalmente

RESUMEN

Los sistemas de servicios son un dinamizador de la economía a nivel mundial, lo cual se ve reflejado en su impacto en la generación de recursos y empleos, dado que de cada dólar generado en el mundo 65 centavos provienen de este sector, así como 6 de cada 10 empleos, según datos del Banco Mundial al 2017. Por tanto, este sector está en una búsqueda constante de la mejora de sus funciones organizacionales que incrementen su productividad y competitividad, y dentro de estas los procesos de toma de decisiones juegan un rol crucial en el manejo de sus recursos.

Esta tesis doctoral estudia el problema de toma de decisiones conocido como programación de tareas (*scheduling*) en sistemas de servicios, el cual tiene un alcance de nivel operativo, donde las decisiones se deben tomar en un corto plazo y por tanto es necesario contar con métodos que permitan entender como un analista humano podría abordarlo. Esta situación empieza al momento de identificar un problema de programación de tareas, después debe definir una medida de desempeño y posteriormente seleccionar una técnica para resolverlo. Además, dada la complejidad propia de este problema, al ser de orden combinatorio, se suma la complejidad de los sistemas de servicios por características como la intangilidad, heterogeneidad, coproducción y variabilidad, que hace difícil su clasificación y por tanto la identificación de sus problemas. Por otro lado, es usual encontrar que en este proceso no se utilizan herramientas informáticas, ni profesionales relacionados en esta labor, así como el conocimiento acerca de esta función no es sistematizado, por tanto, no se tiene una adecuada gestión del conocimiento de esta función operativa.

Para dar una aproximación a este problema, se propone un sistema experto híbrido compuesto por dos subsistemas. El primer subsistema determina el tipo de sistema de servicio y sus principales características de acuerdo con un sector (primario, manufactura, o servicio), a una sección y a una división del CIIU (Código de Clasificación Industrial Internacional Uniforme). El segundo subsistema toma como información de entrada la salida del primero y un conjunto de variables definidas para determinar el tipo de problema de programación de tareas, la medida de desempeño y la técnica de solución recomendada, a través de tres sistemas basados en reglas ejecutados en cascada.

Los resultados obtenidos en esta Tesis Doctoral se enmarcan en los siguientes aportes: una definición y notación de cuatro campos para representar el problema de programación de tareas en sistemas de servicio; dos sistemas expertos (subsistemas) que se ejecutan en forma cascada y que integran los campos de conocimiento de ciencia de los servicios, .programación de tareas y gestión del conocimiento y modelos de inteligencia; un prototipo computacional en Java llamado *SchES*, que permite ejecutar los dos subsistemas de forma separada y conjunta.; y finalmente, la aplicación en tres casos de estudio que evidencia la utilización del sistema experto propuesto para determinar el problema de programación de tareas y las técnicas de solución a emplear.

Palabras Clave: gestión del conocimiento, programación de tareas, ruteo, sistema experto, sistema de servicio.

ABSTRACT

The service systems are a boost to the world's economy, which is reflected in the generations of resources and labors since of each dollar around the world 65 cents were provided from services, and 6 of 10 jobs, according to World Bank at 2017. Hence, this sector is always seeking for an improvement of organizational functions that increases its productivity and competitiveness. The decision-making process plays the main role in resource management.

This Doctoral Thesis studies the decision-making problem known as scheduling on service systems, which has a scope of the operational level where the decision must be made in the short term. Thus, we need methods to understand how a person approaches the problem. The process starts when a person must identify a scheduling problem, next to a performance measure and later a solution technique. In addition, given the complexity of programming problems, which is a combinatorial problem, it adds to the characteristics of service systems such as intangibility, heterogeneity, co-production and variability, which makes it difficult to classify and identify problems. In the same way, it is often found that this process does not use computer tools, professional staff and the knowledge of this process is not organized, so they do not have an adequate knowledge management of this operational function.

To solve this problem, we propose a hybrid expert system that consists of two subsystems. The first one determines the type of service and its main features, according to a sector (primary, manufacturing, or service), a section, and a division of ISIC (International Standard Industrial Classification). The second one takes the output of the first subsystem, and a set of additional variables to determine the type of scheduling problem, its performance measure and a suggest solution technique, using a three rule-based system in a waterfall way.

The results of this Doctoral Thesis are framed in the following contributions: a definition and a notation with four fields to represent the scheduling problems on service systems; two expert systems that are performed in waterfall way and integrate service science, scheduling theory, and knowledge management and intelligence models; a computational prototype in Java called *SchES* that execute the two expert systems jointly and separately ways; and finally, the application in three cases of study that evidence the use of our proposed expert system to determine the scheduling problem and solution technique.

Keywords: knowledge management, scheduling, routing, expert system, service system.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de servicio tienen una importancia creciente en la economía mundial, y Colombia no es ajena a esta tendencia. De ahí la necesidad de que las organizaciones de servicios sean competitivas e incrementen sus niveles de productividad. Una de las maneras de ayudar a este propósito, es proveer a estas organizaciones de herramientas para la toma de decisiones que sean robustas y les permitan el desarrollo de sus procesos y funciones.

En esta tesis doctoral se estudia uno de problemas de toma de decisiones, como lo es la función de programación de tareas en sistemas de servicios. Este problema se enmarca en el nivel operativo, donde las decisiones tienen un alcance temporal de corto plazo y consiste en la asignación de recursos para la ejecución de tareas en un tiempo definido. En este nivel, los encargados de la programación de tareas se ven enfrentados a situaciones como la identificación del tipo de problema de programación de tareas, la determinación del tipo de medida de desempeño a emplear, y posteriormente la selección de la técnica de solución.

Adicional a estas decisiones, se suman las complejidades propias de los sistemas de servicio representadas en características como: la intangibilidad de sus salidas que hace difícil su entendimiento e importancia al no ser un producto visible; la inseparabilidad del sistema de producción y el consumo que origina una dependencia e interacción constante entre el cliente y proveedor; la heterogeneidad dada en la alta personalización de las necesidades del cliente; y la variabilidad en los tipos de necesidad y los recursos necesarios. Estas características originan un problema relacionado con la clasificación de los sistemas de servicio, que afecta la identificación de los problemas de programación de tareas, y que la organización de servicios debe considerar previamente.

De esta manera, la asignación de recursos se convierta en una tarea difícil de resolver, por la cantidad de información que el analista debe considerar de manera simultánea, además de la rapidez con la que debe responder. Por tanto, surge la necesidad de contar con herramientas de apoyo a la decisión que permitan identificar el tipo de sistema de servicio de acuerdo con un estándar establecido, y responder a determinar el tipo de problema de programación de tareas, la medida de desempeño y sugerir una, o varias, técnicas para modelarlo y resolverlo.

En la literatura científica consultada en áreas del conocimiento como ciencias de la decisión, gestión del conocimiento, gestión de operaciones, ingeniería industrial e investigación de operaciones (por mencionar las más relevantes), se encuentra que los procesos de toma de decisiones, y en particular el problema de programación de tareas (*scheduling*), es ampliamente estudiado en sus aplicaciones a los sistemas de manufactura y poco en los sistemas de servicio. Para estos últimos, los estudios de programación de tareas han sido principalmente adaptaciones de los sistemas de manufactura a los servicios.

Como respuesta a esta necesidad de estudiar los procesos de toma de decisiones en los sistemas de servicios, surge en el 2005 un campo de conocimiento denominado la ciencia, ingeniería y gestión de los servicios (SSME, del inglés S*ervice Science and Management Engineering*). Esta área de conocimiento nace como una integración interdisciplinar para diseñar, gestionar, y optimizar los sistemas de servicios, así como tener una visión holística de estos sistemas.

De esta forma, como marco de referencia de la investigación se toma tres campos: la ciencia de los servicios, la gestión del conocimiento y modelos de inteligencia, y la programación de tareas; para el desarrollo de la propuesta. En estos tres campos de conocimiento se evidencian algunos desarrollos relacionados con los problemas de toma de decisiones principalmente en el nivel estratégico y táctico con empleo de métodos cualitativos y de análisis económico. Mientras que en el nivel operativo las aplicaciones en la literatura revisada son pocas, y es difícil la clasificación de problemas dada la heterogeneidad de los servicios. Los principales problemas en este nivel de toma de decisiones están relacionados con programación, ruteo, personal, y control de operaciones, y se caracterizan por la utilización de recurso humando para el desarrollo de sus tareas, la programación de estos en cuanto a turnos, zonas de trabajo y conformación de equipos, y la necesidad de que se trasladen al lugar de la necesidad de los clientes. Estas características hacen común la integración entre estos problemas, y por tanto su complejidad aumenta. En cuento a las herramientas de modelación empleadas para abordar estos problemas se encuentran principalmente aplicaciones de optimización, algunos modelos estocásticos, heurísticas y metaheurísticas, sin embargo, el empleo de sistemas basados en conocimiento es bajo, así como su integración con las otras herramientas.

Por tanto, en la integración de estos tres campos se evidencia el principal aporte científico de esta tesis de doctorado al proveer de un método basado en un método híbrido para la programación de tareas en sistemas de servicios con el fin de identificar el tipo de problema, la medida de desempeño y la técnica de solución para el problema.

El propósito de esta tesis de doctorado es la creación y utilización de un sistema experto (SE) para proveer un mecanismo de razonamiento que emplearía un experto humano en la programación de tareas en sistemas de servicios y aprovechar este conocimiento para dar respuesta a este problema, integrando técnicas de modelación matemática y algoritmos heurísticos con modelos de gestión del conocimiento e inteligencia, y así proporcionar un sistema de apoyo a la decisión para los analistas encargados de esta labor. Las ventajas de emplear un SE radican en: el empleo de conocimiento especializado de un problema; permite generar múltiples soluciones a un problema; es un procedimiento heurístico; permite explicación del razonamiento; se pueden incorporar mecanismos de aprendizaje y actualización; y se puede integrar con otros métodos como modelos de optimización, algoritmos heurísticos y metaheurísticos, y simulación. Como desventaja se encuentra el esfuerzo computacional debido a las diferentes integraciones a realizar y la construcción de las bases de conocimiento.

En la Tesis Doctoral se presentan como resultados novedosos: un SE híbrido compuesto por dos SE, el primero para la clasificación de actividades económicas de acuerdo con el estándar de clasificación industrial internacional uniforme, y el segundo para la identificación de problema de programación de tareas, medida de desempeño y técnica de solución. Un segundo aporte en la representación de un sistema de servicio para la programación de tareas enmarcada en una definición y una notación de cuatro campos: cliente, recurso, control de flujo, y medida de desempeño. Adicionalmente, se obtuvieron los aportes relacionados con el prototipo computacional *SchES* y la aplicación de la propuesta en tres casos de estudios que corroboraron los resultados obtenidos y permitieron contrastar la hipótesis de investigación.

Los resultados de esta investigación se podrán utilizar para la toma de decisiones en los sistemas de servicios a nivel operativo, de manera que los principales usuarios serían los analistas y profesionales relacionados con la programación de tareas. Por otro lado, los beneficiados con el uso de este SE serán los clientes de los diferentes sistemas se servicios con un mejor cumplimiento de sus requerimientos y las organizaciones con el aumento de la eficiencia en la utilización de sus recursos.

La estructura general de esta Tesis Doctoral está compuesta por: el Capítulo 1 donde se describe la fundamentación de la investigación, motivación y antecedentes del problema de

investigación, la hipótesis y los objetivos general y específicos, y los aspectos metodológicos más relevantes en el desarrollo de la investigación; el Capítulo 2 que presenta el marco referencial de la investigación, la revisión de literatura, la definición de sistema de servicio y la notación propuesta para el problema de programación de tareas en sistemas de servicios; el Capítulo 3 que describe el SE propuesto para programación de tareas en sistemas de servicios y presenta el prototipo computacional *SchES*; el Capítulo 4 presenta la aplicación de la propuesta en tres casos de estudio en los sectores de mensajería, cuidado a la salud domiciliaria y mantenimiento; el Capítulo 5 resume las conclusiones, contribuciones, recomendaciones, publicaciones y trabajos futuros derivadas de la investigación, y finalmente, se muestran las referencias bibliográficas y un grupo de Anexos complementarios.

Página en blanco intencionalmente

Capítulo 1. FUNDAMENTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Este capítulo se divide en seis secciones. En la primera se presenta la generalidades y motivación acerca de los sistemas de servicios y sus problemas de toma de decisiones. En la segunda parte se identifica el problema de investigación y se da su justificación y antecedentes. En la tercera sección se establece la hipótesis de investigación junto con los objetivos general y específicos. En la cuarta sección se presenta la justificación de la investigación, y en la quinta sección se describen los aspectos metodológicos empleados durante el desarrollo de la investigación. Finalmente, en la sexta sección se describen los capítulos que estructuran esta Tesis Doctoral.

1.1 Generalidades y motivación

En el mundo los servicios representan aproximadamente el 66% del Producto Interno Bruto (PIB) y en los últimos catorce años han conservado esta proporción, pasando del 64.31% en el 2000 al 66.11% en el 2016, según datos del Banco Mundial (2018). Colombia ha mantenido una participación cercana al 58% en promedio, según el reporte de (Banco Mundial, 2018). Los servicios son un dinamizador de la economía debido a su participación en el PIB y su tendencia creciente; y también tiene un alto impacto social causado en la generación de empleos. Dada la importancia de los sistemas de servicios y teniendo en cuenta que para mejorar su productividad estos deben ser eficientes en la utilización de sus recursos, se evidencia la necesidad de que todas sus áreas funcionales tengan un buen desempeño. Lo cual se puede lograr con la ayuda de herramientas de apoyo a la decisión que permitan administrar la información y conocimiento para la mejora de las funciones organizacionales.

Existen diferentes niveles de las funciones organizacionales relacionadas con la toma de decisiones. Estos niveles frecuentemente se caracterizan por el alcance temporal de sus decisiones, en el largo plazo se tiene el nivel estratégico, en el mediano el táctico y en el corto el operativo (Méndez, 2003). Respecto a los dos primeros, se han realizado diferentes aproximaciones para la toma de decisiones en lo referente al diagnóstico organizacional, diseño de procesos, pronóstico de ventas, planeación de recursos, análisis de capacidades, entre otros. Aunque en términos de investigaciones teóricas y aplicadas hay un sin número de enfoques respecto a estos dos niveles, se ha descuidado el nivel operativo de la toma de decisiones, en el cual se lleva a cabo la prestación del servicio con una relación frente a frente con el cliente y sus necesidades. Entonces, para las empresas de servicios es vital cubrir esta necesidad en busca de una sostenibilidad y competitividad duradera en el tiempo.

Dentro de las decisiones operativas, la programación de tareas (*scheduling*) juega un rol crucial para todo tipo de empresas (manufactura o servicios). En un estudio presentado por Méndez et al. (2013) se reporta que para las Pequeñas y Medianas Empresas (*Pymes*) solo el 1.8% de ellas tiene a cargo de un profesional la labor de programación de producción. Esta cifra permite extrapolar un comportamiento a los sistemas de servicios, en los cuales gran parte de ellos pueden ser Pymes y establece que pocas de ellas no tienen profesionales para esta función. De esta manera, la utilización de un profesional de programación de tareas es una posible causa de que los sistemas de servicios sean menos competitivos y como consecuencia

se tengan problemas como el manejo ineficiente de recursos, los retrasos en la atención de clientes, la insatisfacción de estos, la pérdida de credibilidad, entre otros, que de una u otra manera terminan en pérdidas económicas y sociales.

La programación de tareas es un proceso crítico de toma de decisiones a nivel operativo tanto en sistemas de manufactura como en servicios. Se caracteriza por ser un problema de naturaleza combinatoria que intenta satisfacer objetivos múltiples en cuanto a la utilización de recursos y satisfacción de clientes mediante la optimización en la asignación de recursos y la secuenciación de actividades en el tiempo. En general, la programación de tareas ha sido un problema bastante tratado en la literatura académica, científica y especializada, mediante métodos de optimización, heurísticas, metaheurísticas, y métodos híbridos.

Para los sistemas de servicios, la programación de tareas juega un rol crucial y se puede evidenciar en una gran variedad de problemas, por ejemplo, la asignación de puertos o pistas a los aviones, la reserva de sitios de trabajos, equipos u otras instalaciones (M. L. Pinedo, 2009). Por otro lado, es muy frecuente ver en los sistemas de servicios (aunque también en algunos de manufactura) la dependencia de la experticia y conocimiento de las personas, donde las organizaciones suelen delegar tareas de planeación y programación (proceso de toma de decisiones) en sistemas de alta complejidad a personal con experiencia, confiando en su intuición y conocimiento. Cuando estos se ven enfrentados a gran cantidad de información y relaciones que hacen complicado el entendimiento del sistema, incluso para personas experimentadas, sólo pueden considerar un número limitado de posibilidades para generar programas factibles. Además, a menudo se necesita un tiempo largo para generar (casi siempre de forma manual) un programa factible. Por tanto, es necesario que el sistema productivo utilice de manera ordenada y sistemática el conocimiento individual de su personal experimentado, para resolver un problema complejo como lo es la programación de tareas.

La literatura relacionada con programación de tareas se ha enfocado en dos aspectos principalmente: la clasificación de problemas de acuerdo los sistemas de producción (principalmente en manufactura), y las técnicas de solución.

Para la clasificación de problemas de programación de tareas, principalmente en manufactura, es común encontrar taxonomías de problemas relacionadas de acuerdo al tipo de sistema productivo como un máquina, múltiples máquinas, flujos de proceso (*Flow shop, Job shop, Open Shop*), y sistemas híbridos, de acuerdo con (Méndez-Giraldo, 2011; M. L. Pinedo, 2016). Estas clasificaciones se basan usualmente en la notación introducida por Graham (1979) de tres campos relacionados con tipo de problema, restricciones y medida de desempeño. Esta notación es la de mayor aplicación en la mayoría de sistemas de manufactura y permite realizar las clasificaciones de problemas y de técnicas de solución, aunque para algunos sistemas híbridos y específicos no representa en su totalidad sus características y por tanto se han realizado modificaciones y extensiones como las de (Bloch & Manier, 1999; Manier & Bloch, 2003).Para los sistemas de servicio, no se aplica un sistema de clasificación que permita identificar problemas dada la gran diversidad de servicios que existen, y por otro lado la notación de Graham y otras relacionadas no tienen la capacidad de representar en su totalidad al sistema, por ejemplo en características como la intangibilidad, la heterogeneidad, la variabilidad, y la coproducción. Estos aspectos representan una necesidad primordial al momento de identificar los problemas de programación de tareas, y por tanto es imprescindible contar con un mecanismo que permita clasificar a un sistema de servicio dentro de un estándar establecido para poder realizar comparaciones y también con una manera de representar los problemas de programación de tareas en sistemas de servicios.

En cuanto a las técnicas de solución se puede identificar diferentes herramientas para la toma de decisiones en programación de tareas que se han desarrollado y que cada vez toman en cuenta más aspectos que se asemejan a la realidad. Estas técnicas se pueden clasificar en tres

grupos: desde los métodos clásicos, las heurísticas y metaheurísticas, y las basadas en inteligencia artificial y sistemas inteligentes.

En los métodos clásicos, las técnicas se caracterizan por el empleo de modelos de programación entera mixta (Goel & Meisel, 2013; M. Pinedo, Zacharias, & Zhu, 2015; Duffuaa, 2000; M. L. Pinedo, 2016); programación dinámica (Stefansson, Jensson, & Shah, 2006; Huynh Tuong, Soukhal, & Billaut, 2010; Gromicho, van Hoorn, Saldanha-da-Gama, & Timmer, 2012; Chu & You, 2013); heurísticas (Laha, 2007; Blazewicz, Ecker, Pesch, Schmidt, & Weglarz, 2007; Méndez-Giraldo, 2011; M. L. Pinedo, 2016); y métodos de búsqueda (C.-Y. Lee, Lei, & Pinedo, 1997; Méndez-Giraldo, 2011; M. Pinedo et al., 2015). La principal ventaja de este grupo consiste en que algunas pueden garantizar optimalidad en la solución, sin embargo, solo es posible para problemas pequeños por su naturaleza combinatoria. De tal forma, que su aplicación es limitada a problemas reales debido a que no se puede incorporar todas las características en los modelos empleados, y no es posible obtener una solución en tiempo razonable.

El segundo grupo se caracteriza por la utilización de heurísticas y métodos básicos de búsqueda inmersos en metaheurísticas, como metodologías de uso general, que aceleran su desempeño para resolver el problema. Algunos ejemplos de estas son: recocido simulado, búsqueda tabú (Laha, 2007; Sadegheih, 2006; Werner, 2011); algoritmos genéticos (Omara & Arafa, 2010; Laha, 2007; Sadegheih, 2006; Werner, 2011); optimización de enjambres (Ventresca & Ombuki, 2004; C. S. Chong et al., 2006; C. Zhang, Sun, Zhu, & Yang, 2008; Mönch & Almeder, 2009; Ana Madureira, Sousa, & Pereira, 2011; Ana Madureira, Cunha, & Pereira, 2014); sistemas artificiales inmunes (Saravanan, Vijayakumar, & Srinivasan, 2014); entre otros. La característica principal de este grupo de técnicas es que intentan acelerar el proceso de búsqueda de una solución mediante mecanismos inspirados en la naturaleza o mecanismos artificiales. Su ventaja radica en que necesitan menos tiempo en comparación con las técnicas clásicas, aunque sacrifican optimalidad en la solución obtenida y se requiere un gran esfuerzo computacional.

Por último, desde la inteligencia artificial (IA) y los sistemas inteligentes que buscan incorporar características propias de cada sistema para que a partir de la interacción entre ellas emerja la solución del problema a resolver. Ejemplos de estas técnicas en programación de tareas se presentan a continuación: autómatas celulares (Abdolzadeh & Rashidi, 2009; Witkowski, Antczak, Antczak, & Elzway, 2011); sistemas de multi-agente (Guo & Zhang, 2008; Hsieh & Lin, 2014); inteligencia colectiva (A. Madureira, Pereira, Pereira, & Abraham, 2014; Ana Madureira, Pereira, & Sousa, 2010); sistemas basados en conocimiento (Méndez-Giraldo, 2001); sistemas expertos (Méndez-Giraldo et al., 2013; Metaxiotis, Askounis, & Psarras, 2002); entre otros. Este grupo de enfoques se caracteriza por la completitud en la representación, ya que permite incorporar muchos elementos que hacen complejo el problema. Sin embargo, su tiempo de solución puede ser extenso y es necesario emplear otras técnicas como las del segundo grupo para reducir ese tiempo de computación. Como ventajas se encuentran que las soluciones son robustas, adaptables y dinámicas, y su principal desventaja que requiere un gran esfuerzo computacional para obtener soluciones.

Sin embargo, la utilización del conocimiento representado en la experticia del personal se ha trabajado muy poco. Algunos ejemplos se plantean en trabajos como el de Atabakhsh (1991) quien plantea un método basado en IA para encontrar programas factibles en un sistema restringido, del tal manera que se cumplan el mayor número de restricciones pero no involucra la totalidad del razonamiento humano en el sistema artificial. Méndez-Giraldo (2001) plantea un proceso para la programación de producción empleando sistemas cooperativos entre máquina – hombre, el cual consiste en utilizar las bondades de generar información y gestionarla por parte de la máquina, pero sumándole el conocimiento, la intuición y las reglas de decisión propias del hombre "experto particular" del sistema con el fin de que la máquina

genere un conjunto de programas factibles y el decisor escoja en concordancia a los requerimientos y disponibilidades, conocimientos y experiencias y nueva información disponible, el que más le convenga. Berglund y Karltun (2007) presentan un análisis realizado sobre cuatro compañías con el fin de evaluar el impacto de aspectos humanos, tecnológicos y organizacionales en los procesos de programación de tareas. Sus resultados demuestran cómo estos tres factores en conjunto son los causantes de las mejoras en el proceso de programación. En particular el factor humano tiene un alto impacto en la actividad de programación relacionado con la experiencia en el sistema y la necesidad de que este entienda el sistema como un todo (es decir desde aspectos estratégicos, de ventas, etc., y no solo los particulares del sistema de producción). Madureira, Pereira, & Sousa (Ana Madureira et al., 2010) y Madureira, Pereira, Pereira & Abraham (2014) presentan métodos para programación de tareas en un ambiente dinámico basados en inteligencia social y colectiva, donde los agentes deben interactuar y colaborar con el fin de mejorar la programación global. Los resultados empíricos y datos estadísticos muestran que el mecanismo de negociación influye de manera significativa en el rendimiento general del sistema y en su eficacia, basado en inteligencia de enjambre para la minimización del *makespan* y en la maximización de la ocupación de la máquina. Pereira y Madureira (2013) presentan la aplicación de un módulo de aprendizaje para la resolución de problemas de programación de tareas en ambientes estáticos y dinámicos, en el cual se emplea el razonamiento basado en casos como mecanismo de aprendizaje para el cálculo de parámetros de algunas metaheurísticas empleadas para resolver el problema. Su aporte se centra en el hecho de que este mecanismo de aprendizaje realiza la parametrización con información propia del sistema y se mejora con la salida del mismo proceso, que generalmente es una labor que se realiza con antelación a la implementación de las metaheurísticas.

Estos son algunos de los trabajos que emplean modelos basados en conocimiento para ayudar a resolver el problema de programación de tareas, generando impactos significativos en las medidas de desempeño de los sistemas o en el funcionamiento de los procedimientos diseñados para resolver el problema. Sin embargo, la mayoría de las aproximaciones de solución han sido desarrolladas para los sistemas de manufactura y posteriormente son aplicadas a los servicios. La mayoría de estas adaptaciones fallan al no tener en cuenta características como la coproducción inherente a los mismos, la cual origina una inseparabilidad entre el cliente, el proveedor y el servicio, generando así un carácter dinámico que ocasiona errores al no contar con un mecanismo de adaptación y reprogramación. Adicionalmente, características como la intangibilidad de los servicios y que no se permita almacenar y diferir entregas, ocasionan que las técnicas empleadas en la programación de tareas no respondan adecuadamente, ocasionando cambios en la programación y por ende costos inesperados.

Dadas estas características de los sistemas de servicios y que los métodos tradicionales que se han planteado para resolver el problema de programación de tareas en manufactura no responden a todas estas, surge la necesidad de establecer métodos y herramientas para la función de programación de tareas motivada por cuatro aspectos fundamentales: (1) la necesidad de tratar sistemas complejos como lo constituyen los propios del sector de servicios por sus características ya mencionadas; (2) la necesidad de desarrollar métodos de programación de tareas robustos y reactivos, es decir que puedan adquirir nueva información al sistema y responder de manera eficiente a estos cambios (característica dinámica de los sistemas de servicios); (3) integrar estos métodos de programación de tareas con el conocimiento del sistema a través del desarrollo de modelos basados en inteligencia que permitan utilizar la experticia individual de los actores en el sistema y resolver el problema de manera colectiva generando bases de conocimiento y procesos de aprendizaje organizacional; y (4) la necesidad de incorporar múltiples criterios de decisión para el proceso de toma de decisiones en la programación de tareas en sistemas de servicios.

1.2 Problema de investigación

De acuerdo con los presentado en la anterior sección, se evidencia una situación que conduce a la re-evaluación de los métodos tradicionales de programación de tareas en sistemas de servicios buscando métodos "*híbridos*" que permitan la aproximación de estos sistemas a través de estructuras simples con capacidad de adaptación frente a situaciones de características de múltiples variables e incluso no-lineales. Durante los últimos años, ha cobrado mucha importancia la integración de las técnicas basadas en gestión del conocimiento con las técnicas de modelización matemática y optimización. Lo anterior, debido a que técnicas como las redes neuronales artificiales (Azadeh, Faiz, Asadzadeh, & Tavakkoli-Moghaddam, 2011), lógica difusa y gestión del conocimiento (García-Galán, Prado, & Muñoz Expósito, 2012), la inteligencia colectiva (Ana Madureira et al., 2010; Pereira & Madureira, 2013), los sistemas expertos (Álvarez, Caicedo, Malaver, & Méndez, 2011; Méndez-Giraldo et al., 2013), entre otras, mejoran la respuesta del sistema a cambios en la producción o servicios, e incluso permite la implementación de nuevas respuestas a sus necesidades de programación de recursos.

Por lo anterior, se planteó como marco general de investigación la programación de tareas en sistemas de servicios. Este marco plantea dos aspectos distintivos. El primero, presenta el problema de programación de tareas que debe determinar la secuenciación de operaciones para llevar a cabo un conjunto determinado de trabajos y la asignación y sincronización de los recursos disponibles, generalmente restringidos, buscando optimizar simultáneamente medidas de desempeño relacionadas con la eficacia del sistema y la eficiencia del proceso. Para el cual se desea establecer un método que permita identificar el tipo de problema de programación de tareas, su medida de desempeño y sugerir una técnica de solución para resolverlo. En segundo lugar, se presenta los sistemas de servicios como un sistema complejo constituido por una gran cantidad de elementos como personas, operaciones, recursos, etc., que se interrelacionan para satisfacer la necesidad de unos clientes bajo una serie de restricciones y medidas de desempeño, teniendo como principales características: la coproducción, la intangibilidad, la inseparabilidad, la perecibilidad y la no transferencia de propiedad. El problema identificado en este aspecto consiste en como clasificar a un sistema como servicio y establecer un mecanismo de representación de sus problemas de programación de tareas.

Como alternativa para responder a este problema, se emplean los sistemas expertos (SE) que hacen uso del conocimiento de un experto o un grupo de expertos en un entorno computacional, que al ser integrado con otras técnicas permite representar el razonamiento humano a través de procesos de búsqueda y aprendizaje. Se selecciona esta herramienta de la inteligencia artificial, como un mecanismo general de sistemas basados en conocimiento que permite su integración con otras áreas de conocimiento y herramientas como la modelación matemática y algoritmos heurísticos, por tanto, es un enfoque híbrido.

El propósito de esta investigación consiste en la utilización de SE para representar el mecanismo de razonamiento que utilizaría un experto humano en la programación de tareas y aprovechar este conocimiento para dar respuesta a esta función de decisión operativa, integrando las técnicas de modelación matemática y algoritmos heurísticos con los modelos de gestión del conocimiento e inteligencia, para optimizar la solución y de esta manera proporcionar un sistema de apoyo a la decisión para los analistas encargados de esta función.

El propósito de investigación se plantea en el siguiente interrogante:

¿Qué estructura debe tener un sistema experto para resolver el problema de programación de tareas en sistemas de servicios, considerando las complejidades propias de estos y los criterios de eficiencia en la utilización de recursos y eficacia en la satisfacción de los clientes?

1.3 Hipótesis y objetivos

En correspondencia con los argumentos expuestos anteriormente y el propósito de esta investigación, se planteó como hipótesis general de investigación:

"La integración de técnicas de modelación matemática y algoritmos heurísticos con modelos de gestión del conocimiento e inteligencia, desarrollados en un sistema experto híbrido, mejoran el desempeño de la función de programación de tareas en sistemas de servicios considerando la eficiencia en la utilización de recursos y la eficacia en la atención al cliente".

Esta hipótesis general de investigación será validada en la aplicación de la propuesta a un sector específico de servicios mediante tres casos de estudio.

Para llevar a cabo la investigación doctoral se fijó el siguiente objetivo general:

Diseñar un sistema experto híbrido para la programación de tareas en sistemas de servicios mediante la integración de técnicas de modelación matemática y algoritmos heurísticos con modelos de gestión del conocimiento e inteligencia, considerando las complejidades propias de estos sistemas y los criterios de eficiencia en la utilización de recursos y eficacia en la satisfacción de los clientes.

Para alcanzar el objetivo general, se propusieron los siguientes objetivos específicos:

1. Determinar los factores más influyentes de los sistemas de servicios y sus relaciones que permitan la estructuración de la base de conocimiento y que afectan el proceso de programación de tareas.
2. Establecer métodos para la programación de tareas en sistemas de servicios, considerando la integración de técnicas de modelación matemática y algoritmos heurísticos con modelos de gestión del conocimiento e inteligencia.
3. Proponer una metodología que permita la construcción de un sistema experto para la programación de tareas en sistemas de servicios.
4. Elaborar un prototipo computacional del sistema experto para la programación de tareas en sistemas de servicios, contemplando las fases de adquisición, representación y proceso de toma de decisiones.
5. Evaluar la efectividad de los modelos desarrollados y el prototipo de sistema experto para las condiciones de los sistemas de servicios, ejemplificándose en uno o varios casos de estudio.

1.4 Justificación de la investigación

Dada la importancia de los sistemas de servicios en la economía mundial y colombiana representada en cerca del 70% del PIB, y al ser un dinamizador económico por su impacto en la generación de empleos, donde cerca del 65% de los empleos corresponden a este sector en Colombia según la Superintendencia de Sociedades. Entonces, los sistemas de servicios deben propender por la mejora significativa de su productividad, y por tanto deben ser más eficientes en la utilización de recursos, lo cual evidencia la necesidad de que todas sus áreas funcionales tengan un buen desempeño. Dentro de estas, el mejoramiento de la función de programación de tareas se puede lograr con la ayuda de herramientas de apoyo a la decisión que permitan administrar la información y el conocimiento, como lo plantea el propósito de esta tesis doctoral.

Por otro lado, el desarrollo de conocimiento científico alrededor de la programación de tareas en sistemas de servicios ayuda al incremento de herramientas para la toma de decisiones en las organizaciones de servicios, con el fin de que sean capaces de llevar a cabo una gestión efectiva de sus actividades a nivel operativo. Las herramientas generadas a partir del conocimiento científico de esta investigación doctoral tienen características relacionadas con

temas como sistemas complejos, flexibilidad, adaptabilidad, tratar grandes volúmenes de información, robustez, rapidez, y posibilidad de incorporar múltiples criterios de decisión.

Finalmente, la investigación proyectada y sus resultados plasmados en la presente Tesis Doctoral, posee un valor teórico y práctico, simultáneamente, que se fundamenta en lo siguiente:

El valor teórico radica en la exploración de modelos basados en gestión del conocimiento e inteligencia, que al ser integrados con las técnicas de modelación matemática y algoritmos heurísticos permitan establecer métodos alternativos de apoyo a la decisión en la función de programación de tareas en sistemas de servicios. Este aspecto evidencia la novedad científica de esta propuesta de investigación doctoral, ya que en la literatura científica revisada no se encontraron métodos para la programación de tareas en sistemas de servicios que involucren de manera conjunta estos enfoques.

Por otro lado, esta investigación tiene un valor práctico que se soporta en poner a disposición un cuerpo de conocimiento y técnicas de solución en un tipo de sistemas caracterizado por su complejidad y su creciente impacto en la economía en los países en desarrollo, como lo son los sistemas de servicios donde las técnicas tradicionales o las derivadas de los sistemas de manufactura no se han desempeño adecuadamente.

1.5 Aspectos metodológicos

El proceso de construir un SE es sustentado en la ingeniería del conocimiento (Méndez-Giraldo et al., 2013), siguiendo una metodología de tres fases: adquisición de conocimiento, representación de conocimiento y toma de decisiones, representadas en la Figura 1-1.

La Fase 1 se refiere a la identificación de características del dominio de conocimiento y a la adquisición de heurísticas, reglas y procedimientos, que representan la forma de pensar del experto humano, construyendo una base de conocimiento y hechos. En esta fase se responde a los objetivos específicos 1 y 2.

La Fase 2 consiste en una etapa de representación del conocimiento, en la cual se construye el prototipo mediante los motores de inferencia –algoritmos para deducir conclusiones y soluciones basadas en la base de conocimiento–, los módulos de explicación –encargados de justificar y analizar el razonamiento del sistema experto–, y los módulos de aprendizaje –encargados de establecer los mecanismos de generación de nuevo conocimiento y actualización de este para el sistema experto–. Esta fase sustenta los objetivos específicos 3 y 4.

La Fase 3 se refiere a la toma de decisiones, la cual debe considerar las medidas de desempeño claves para el sistema, la interfaz como mecanismo de interacción con el usuario y los mecanismos de validación para la solución del problema. En esta fase se soporta el objetivo específico 5 y se enmarca tres casos de estudio:

- Caso 1-Sector de servicios de mensajería: consiste en una empresa que entrega documentos y paquetes a clientes geográficamente distribuidos en la ciudad de Bogotá. El proceso sigue tres fases de asignar entregas en un horizonte de planeación de un número de días determinado, seguido se agrupan por cada día para ser asignados a un operador, y finalmente se debe indicar al operador como entregar los documentos (ruta). Se empleo una muestra real de una empresa de mensajería en la ciudad de Bogotá.
- Caso 2-Sector de servicios de cuidado a la salud domiciliaria: consiste en un servicio de salud ofrecido por una empresa promotora de salud (EPS) en la ciudad de Bogotá dentro de un plan complementario para realizar visitas a pacientes que lo requieren en sus hogares. Las solicitudes llegan a un analista quien debe asignar a un equipo de médicos para que realicen la visita de acuerdo con el tipo de necesidad y buscando garantizar una

adecuada promesa de servicio medida en el tiempo de respuesta. Se emplearon datos de una empresa que brinda el servicio para genera una instancia de caso de estudio.

- Caso 3-Sector de servicios de mantenimiento: consiste en la ejecución de un programa de mantenimiento preventivo a un conjunto de máquinas geográficamente distribuidas sujetas a fallas aleatorias por un conjunto de técnicos que se debe desplazar para realizar las operaciones de mantenimiento. Se realizo como una extensión del trabajo publicado en (E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, Dieulle, Labadie, & Medaglia, 2016) para el caso de múltiples periodos.

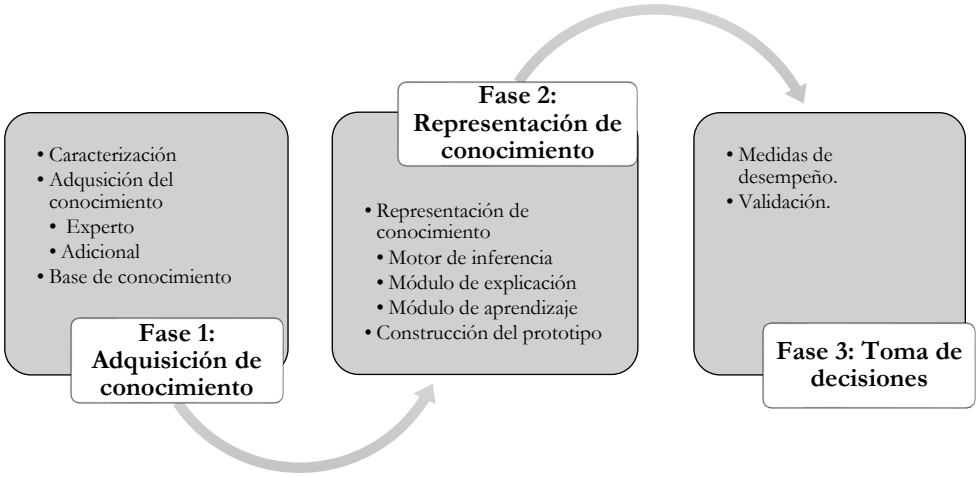


Figura 1-1 Metodología de construcción del sistema experto.

Fuente: Elaboración propia.

Esta investigación que se resume en esta tesis doctoral se desarrolló en el grupo de investigación Adquisición y Representación de Conocimiento mediante Sistemas Expertos y Simulación (ARCOSES), que trabaja en la línea de investigación de Sistemas Expertos. Esta línea estudia, analiza y modela sistemas complejos usando técnicas como la simulación y los sistemas expertos, entre otras, para representar el comportamiento de los sistemas analizados y permitir la experimentación y toma de decisiones.

1.6 Estructura de la tesis

Para su desarrollo, esta Tesis Doctoral se estructuró se estructuró además de este primer capítulo de Fundamentación de la investigación en otros cuatros capítulos.

El Capítulo 2 se divide en cuatro partes: el marco referencial de la investigación, la revisión de literatura, la definición de sistema de servicio y la notación propuesta para el problema de programación de tareas en sistemas de servicios, y una sección de conclusiones parciales Primero se presenta las generalidades de la ciencia de los servicios, la programación de tareas, y los modelos de inteligencia, definiendo sus características principales y métodos de solución. Segundo, se presenta el estado del arte de los problemas de toma de decisiones en la ciencia de los servicios. La tercera parte corresponde a la definición de sistema de servicio y la presentación de la notación propuesta para el problema de programación de tareas en sistemas de servicios. Se finaliza con unas conclusiones que resumen los principales aportes del capítulo.

El Capítulo 3 plantea la metodología y estructura del SE propuesto para programación de tareas en sistemas de servicios. Este capítulo se compone de cinco partes. La primera parte presenta la estructura general del SE propuesto. La segunda parte describe el primer SE que

determina el tipo de sistema de servicio y sus principales características utilizando un esquema de un sistema de adquisición de conocimiento y un sistema basado en reglas con el fin de identificar 31características propias del sistema. Con esta información y mediante un sistema de inferencia difuso y redes neuronales (ANFIS) se determina un conjunto de 12 atributos que son empleados en un sistema basado en reglas para determinar la clasificación del sistema de acuerdo con el sector (primario, manufactura, o servicio), la sección y la división de acuerdo con el CIIU (clasificación industrial internacional uniforme) del DANE. La tercera parte muestra el SE correspondiente a la clasificación de problemas y técnicas de solución, se toma como información de entrada la salida del primero y determina el tipo de problema de programación de tareas, la medida de desempeño y la técnica de solución recomendada, a través de tres sistemas basados en reglas ejecutados en cascada. Para esto, se emplean los campos de la notación propuesta para un sistema de servicio: Cliente, Recursos y Control de Flujo. Mediante un sistema de adquisición de conocimiento y con los resultados de las características y atributos del primer SE, se completan todos los valores de cada uno de los tres campos y los sistemas de reglas son aplicados sobre esta información. Como entradas se tiene las características y la clasificación de los sistemas de servicio, junto con los tipos de problemas de programación de tareas y las técnicas de solución. Este SE genera como salida la técnica, o técnicas, a emplear para resolver el problema y/o los pasos aplicables. La cuarta parte presenta el prototipo computacional *SchES* que plasma la operación de los dos SE desarrollados. Por último, se presenta un apartado con los principales aportes y conclusiones del capítulo.

El Capítulo 4 presenta la aplicación de la propuesta en tres casos de estudio en los sectores de mensajería, cuidado a la salud domiciliaria y mantenimiento. En cada uno se realiza una descripción de la aplicación, se presentan los modelos y algoritmos específicos desarrollados y los resultados obtenidos.

El Capítulo 5 resume las conclusiones, contribuciones, recomendaciones, publicaciones y trabajos futuros derivadas de la investigación. Finalmente, son presentadas las Referencias Bibliográficas y un grupo de Anexos como complemento de los resultados expuestos.

Página en blanco intencionalmente

Capítulo 2. SISTEMAS DE SERVICIOS Y PROGRAMACIÓN DE TAREAS

Este capítulo se divide en cuatro secciones. La primera muestra una revisión sobre los conceptos relacionados con la ciencia de los servicios, la programación de tareas y los modelos gestión de conocimiento e inteligencia artificial para construir el marco de referencia que alimenta la estructura del SE propuesto para el problema de programación de tareas en sistemas de servicios. La segunda presenta una revisión de literatura para caracterizar los problemas de toma de decisiones en la ciencia de los servicios. En la tercera sección se presenta la definición propuesta para el sistema de servicio y la notación propuesta para el problema de programación de tareas en sistemas de servicios, junto con una caracterización de literatura científica. Por último, se presenta unas conclusiones parciales del capítulo con los principales aportes al problema de investigación.

2.1 Marco referencial

La Figura 2-1 presenta la estrategia seguida para la construcción del marco referencial de la presente investigación.

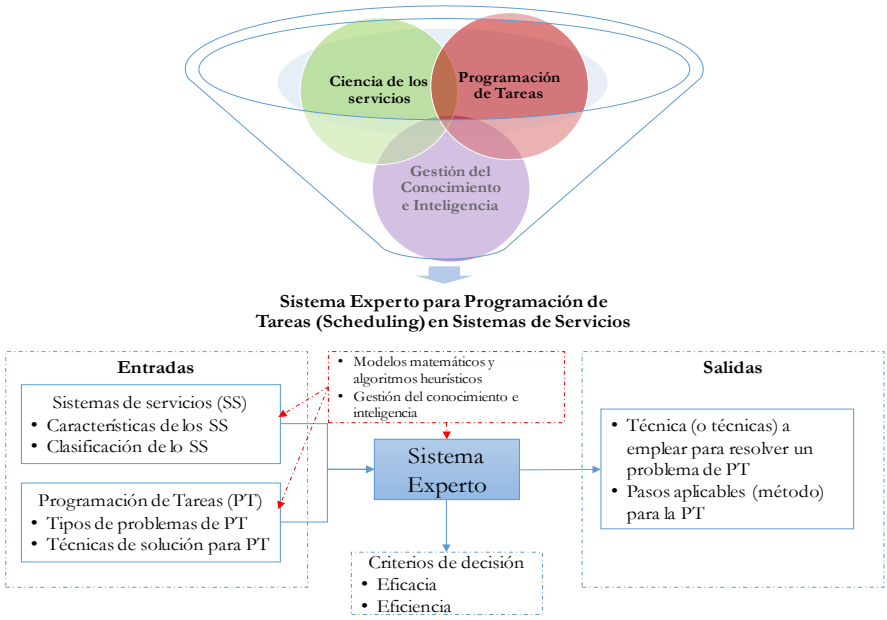


Figura 2-1 Estrategia para la construcción del marco teórico
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se describen los componentes de ciencia de los servicios, programación de tareas y de gestión del conocimiento e inteligencia.

2.1.1 Ciencia de los servicios

Los sistemas de servicios se han convertido en un área estratégica de la investigación científica con enfoques multidisciplinarios reflejados en una comunidad académica conocida como la Ciencia de los servicios (*Service Science*) o, como Ciencia, Ingeniería y Gestión de los Servicios (SSME, por sus siglas en ingles de *Service Science Management and Engineering,* término acuñado por IBM). La ciencia de los servicios es el estudio de los sistemas de servicios complejos, es una integración interdisciplinaria que involucra métodos y teorías de investigación de operaciones, ingeniería industrial, mercadeo, informática, psicología, sistemas de información, diseño, entre otros, aplicados para diseñar, gestionar, controlar y mejorar los sistemas de servicios (J. Spohrer et al., 2007; Haluk Demirkan, Spohrer, & Krishna, 2011).

En esta sección, primero se describe la importancia de los sistemas de servicios en el mundo y su impacto. Luego se presenta una revisión de las principales definiciones acerca de los sistemas de servicios para finalmente establecer un conjunto de diferencias entre los sistemas de servicios y los de manufactura. Por último, se muestran los principales aspectos de la toma de decisiones en la ciencia de los servicios.

2.1.1.1 Importancia de los sistemas de servicios

En el mundo los servicios representan aproximadamente el 66% del Producto Interno Bruto (PIB) y en los últimos catorce años han conservado esta proporción, pasando del 64% en el año 2000 al 66.11% en el 2016, según datos de (Banco Mundial, 2018). La Figura 2-2 presenta la evolución de los servicios en el valor agregado como porcentaje del PIB en los últimos catorce años. Colombia ha mantenido una participación cercana al 58% en promedio, siendo inferior a la del promedio mundial y a la de países como Brasil, Alemania y Estados Unidos que basan su economía en torno a los servicios. Países como China y Chile presentan participaciones inferiores a Colombia, sin embargo, presentan una tendencia creciente.

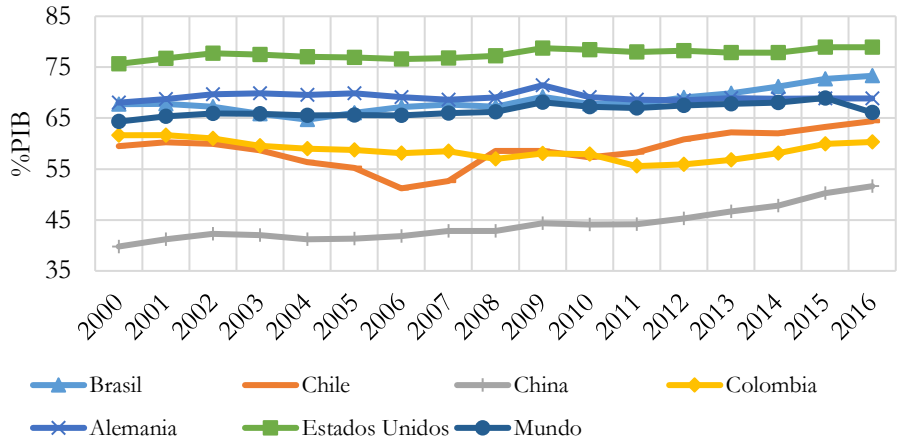
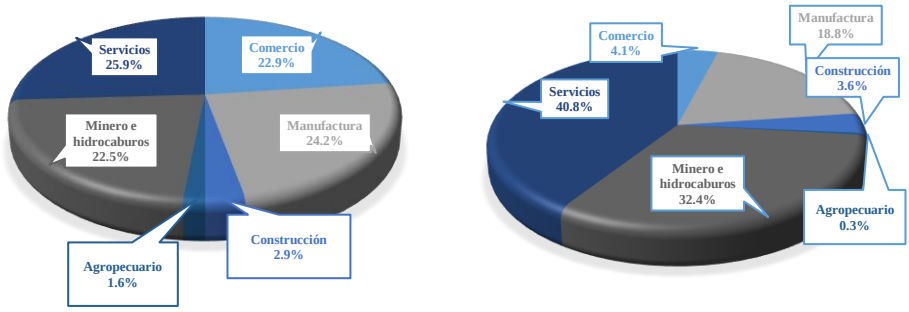


Figura 2-2. Valor agregado de los servicios como % del PIB.
Fuente: Datos de (Banco Mundial, 2018)- Elaboración propia.

La Superintendencia de Sociedades (2018) de Colombia en un informe del 2018 sobre las 1000 empresas más grandes de Colombia reporto que en el 2017 el PIB de Colombia registró un crecimiento del 1.8% respecto al 2016, siendo mayor que México y menor que Perú, en el contexto latinoamericano y con una tendencia decreciente desde el 2014 donde promediaba

el 4.4%. Algunas de las causas de esta tendencia se encuentran relacionadas con la crisis del sector petrolero, que afecta en gran proporción economías como la colombiana. Por otro lado, al analizar los sectores económicos presentados en la Figura 2-3 (parte *a* para ingresos operacionales y *b* para utilidades) se encontró que el sector Servicios presenta la mayor participación en ingresos operacionales y utilidades en el 2017, 25.9% y 40.8% respectivamente, explicada en mayor parte por los bajos precios internacionales del petróleo que impactaron el sector Minero e Hidrocarburos, el cual presentaba os mayores valores para los años anteriores. Seguido a este sector se encuentran Manufactura, con un 24.2% y un 18.8% para ingresos y utilidades respectivamente. Posteriormente se encuentran los sectores de Minero e hidrocarburos, Construcción y Agropecuario.



(*a*) (*b*)

Figura 2-3. Participación del ingreso operaciones (*a*) y de la utilidad (*b*) por sectores en el año 2017.

Fuente: Datos de Superintendencia de Sociedades: www.supersociedades.gov.co , (2018)
Elaboración Propia.

Los servicios incluyen actividades como el comercio al por mayor y al por menor, hoteles, restaurantes, transporte y servicios de la administración pública, financieros, profesionales y personales como educación, atención médica y actividades inmobiliarias. La Figura 2-4 presenta la distribución porcentual de la población ocupada para el 2017 según Asobancaria (2017). Se evidencia que el sector servicios ocupa al 36.9% de la población, seguida del sector comercio con el 27.5%. De ahí su importancia en la generación de empleos, ejemplificándose en que cerca del 65% de los empleos fueron originados a partir del sector servicios, evidenciando además su importancia social al ser un dinamizador de las economías en desarrollo.

De esta manera, las estadísticas presentadas en conjunto permiten establecer que:

- los servicios presentan una gran heterogeneidad,
- los servicios son un dinamizador de la economía debido a su participación en el PIB y su tendencia creciente, y
- los servicios son un dinamizador social causado por su impacto en la generación de empleos.

Dada la importancia de los sistemas de servicios y teniendo en cuenta que para mejorar su productividad estos deben ser más eficientes en la utilización de recursos, se evidencia la necesidad de que todas sus áreas funcionales tengan un buen desempeño. Lo cual se puede lograr con la ayuda de herramientas de apoyo a la decisión que permitan administrar la información y conocimiento para mejorar el desempeño organizacional.

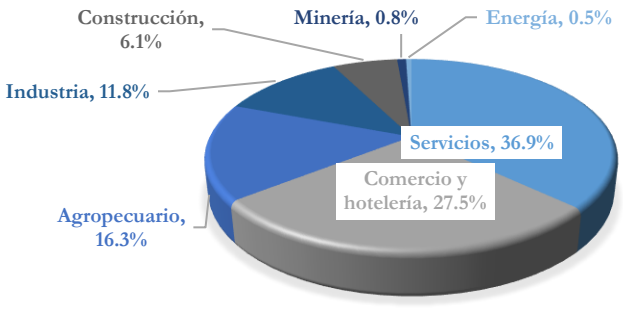


Figura 2-4. Porcentaje de población ocupada por sector económico en Colombia año 2017.
Fuente: Asobancaria (2017), www.asobancaria.com de datos del DANE.

2.1.1.2 Definición de sistemas de servicios

Varios autores han aportado a la definición de sistemas de servicios desde distintas disciplinas. La Tabla 2-1 presenta un listado de las principales definiciones de sistemas de servicios desde diferentes enfoques. Se puede observar que varios pertenecen a investigación de operaciones, gestión y ciencia de servicios, lo cual indica una tendencia a la importancia de la toma de decisiones en este tipo de sistemas. Por otro lado, desde la ingeniería de sistemas y las ciencias de la computación también se han realizado aportes presentando los servicios como un proceso de apoyo.

Tabla 2-1 Definiciones de sistemas de servicios

Autor	Definición	Enfoque
(M. L. Pinedo, 2009)	Conjunto de actividades realizadas por recursos mecánicos (maquinas) o humanos (personas) para satisfacer las necesidades o deseos de personas.	Investigación de Operaciones
(Bhatnagar, Prasad, & Prashanth, 2013)	Son sistemas en los que las personas (proveedor) prestan un servicio a los clientes, a diferencia de los sistemas de manufactura donde los trabajadores producen o ensamblan productos o mercancías.	Investigación de Operaciones
James C. Spohrer & Wendy M. Murphy en (Bhatnagar et al., 2013)	Son sistemas hechos por el hombre que buscan mejorar las interacciones entre cliente-proveedor. Algunos ejemplos son: el gobierno, la educación, la salud, las finanzas, retail, edificios, comunicaciones, energía, alimentos, agua y transporte	Ciencia de Servicios
(Vargo & Lusch, 2008a, 2008b)	Servicio se define como la aplicación de las competencias para el beneficio de otra parte y esas competencias podría manifestarse en una compleja combinación de bienes, dinero, actividades e instituciones dentro de un sistema de servicio.	Ciencia de los servicios
(Ing, 2011)	Es una distribución dinámica de recursos como tecnología, personas, tecnología e información, que crea y ofrece un valor entre el proveedor y el cliente a través del servicio.	Ciencia de los servicios
(Polyvyanyy & Weske, 2011)	Es una configuración dinámica entre un cliente y un proveedor, caracterizada por ser diversa, compleja, cambiante en el tiempo y que crea valor.	Gestión
(Bhatnagar et al., 2013)	Es una organización compuesta por un conjunto recursos que interactúan para el cumplimiento de las expectativas del cliente.	Gestión
(Böttcher & Fähnrich, 2011)	Es un conjunto de recursos que interactúan proporcionados por el cliente y el proveedor. Los servicios son una	Ciencias de la computación, Gestión

Autor	Definición	Enfoque
	funcionalidad ofrecida por la interacción de estos recursos, que conduce a un cambio de estado de al menos un recurso.	
(J. C. Spohrer, Demirkan, & Krishna, 2011)	Son productos intangibles, a diferencia de los productos tangibles de la agricultura o la manufactura. Servicio es un intercambio entre entidades económicas que no transfieren la propiedad, pero permite el acceso a los recursos y capacidades	Economía
(J. C. Spohrer et al., 2011)	Servicio se define como la solución al problema de un cliente, el resultado que el cliente quiere y se caracterizan por ser intangibles, heterogéneos, inseparable, perecederos, la aplicación de la competencia (por ejemplo, recursos, habilidades, capacidades) para el beneficio de otra entidad.	Mercadeo
(J. C. Spohrer et al., 2011)	Actividades, procesos, interacciones que no producen bienes, un proceso que se realiza (ejecuta), en lugar de un producto, un proceso de producción que requiere la colaboración de una entidad de cliente	Investigación de Operaciones
(J. C. Spohrer et al., 2011)	Una capacidad modular que puede ser computacionalmente en la que otros pueden acceder y modificar.	Ciencias de la computación
(J. C. Spohrer et al., 2011)	Un sistema (con entradas, salidas, límites de capacidad y características de rendimiento) que está interconectado con otros sistemas que pueden solicitar acceso a sus capacidades para crear beneficios, y en el que la optimización local de las interacciones del sistema puede no conducir a mejoras globales de rendimiento.	Ingeniería de Sistemas
(J. C. Spohrer et al., 2011)	Una experiencia de un cliente (entidad) que resulta de la interacción cliente – proveedor	Diseño y Psicología
(J. C. Spohrer et al., 2011)	Fenómenos de co-creación de valor entre las entidades que interactúan en el sistema de servicios.	Ciencia de los Servicios

Fuente: Elaboración propia.

En resumen, se pueden encontrar en estas definiciones de los servicios un elemento común que consiste en la noción de entidades que interactúan para lograr resultados que sean mutuamente aceptables y beneficiosos, lo cual es reafirmado por (J. C. Spohrer et al., 2011). Se encuentran algunas diferencias respecto a los bienes tangibles con los intangibles, contrastando el acceso a los recursos con la propiedad de los recursos, la interacción directa con la indirecta en el proceso, etc. Sin embargo, cada disciplina parece centrarse en algún aspecto de las entidades, las interacciones y los resultados, y deja fuera otras características para satisfacer sus propios intereses disciplinarios específicos.

Existen varias diferencias respecto a los sistemas de manufactura como que los servicios son intangibles y raramente almacenables, la demanda no puede posponerse (no hay posibilidad de espera o diferir a periodos futuros), los clientes no están dispuestos a esperar, la demanda es frecuentemente difícil de prever, por lo que está sujeta a variabilidad y condiciones dinámicas que implica reprogramación y ajustes, y son necesarios recursos adicionales al proceso para completar un servicio, por ejemplo transporte disponible para entregar un servicio o para el manejo de los equipos necesarios para el mismo. La Tabla 2-2 presenta un resumen de las principales diferencias entre los sistemas de manufactura y servicios obtenidos a partir de las definiciones dadas anteriormente.

2.1.1.3 Toma decisiones en la ciencia de los servicios

La SSME considera a los servicios como una nueva área de conocimiento. Martínez & Lázaro (Martínez & Lázaro, 2007) la justifican basado en que es una *Ciencia* debido a la forma de crear conocimiento, siendo una disciplina académica. Es *Gestión* en cuanto a que busca garantizar que este conocimiento se convierta en valor empresarial y social, es decir los procesos para la

conversión de conocimiento en valor. Y es *Ingeniería*, por el enfoque que aporta al mundo de los servicios, más allá de solo análisis económico y administrativo.

Tabla 2-2 Diferencias entre sistemas de manufactura y servicios

Características	Sistemas de Manufactura	Sistemas de Servicios
Productos	Físicos, durables	Intangible, perecedero
Inventario	Permitido	No permitido
Demanda	La demanda puede o no posponerse	Lo demanda no puede posponerse
Contacto con el cliente	Generalmente es durante el proceso de venta, no durante el proceso de producción	Generalmente es durante la prestación del servicio
Tiempo de respuesta de la demanda	Tiempo de aprovisionamiento	Tolerancia del cliente, función de paciencia
Localización	No necesariamente cerca al cliente.	Varios: proveedor, cliente, remoto, entre otras
Medida de calidad	Existen características específicas del producto	Puede ser subjetivo
Momento de consumo y de producción	No son simultáneos	Pueden ser simultáneos
Falta o exceso de capacidad	Genera inventarios o demoras	Genera colas o abandonos
Recursos	Los recursos son máquinas automatizadas u operadas por máquinas	El uso de máquinas es menos frecuente que el contacto con personas
Propiedad	La propiedad de un producto es transferida al cliente	La propiedad del servicio no se transfiere al cliente

Fuente: Elaboración propia.

Para gestionar los sistemas de servicios hay diferentes niveles de toma de decisiones, los cuales pueden ser extraídos del enfoque jerárquico para la toma de decisiones en gestión de operaciones (Méndez, 2003) mostrado en la Figura 2-5.

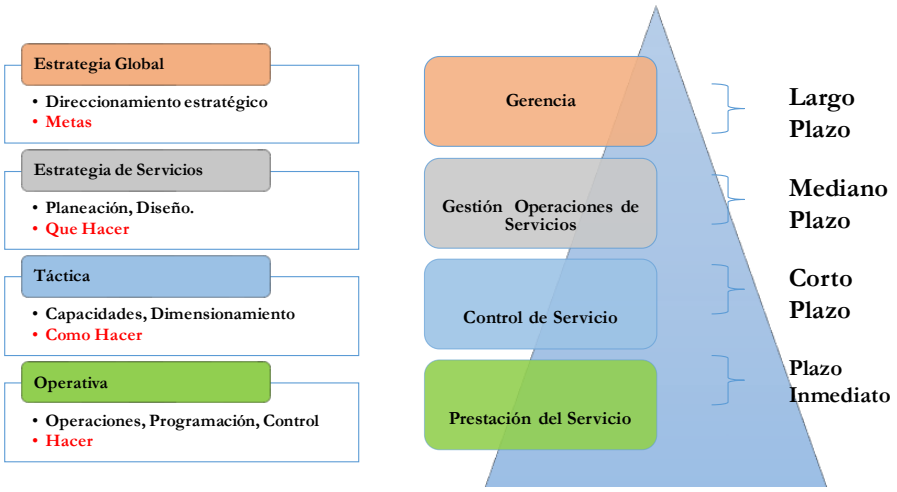


Figura 2-5. Estructura jerárquica de la toma de decisiones para sistemas de servicios
Fuente: Elaboración propia.

2.1.1.3.1 Nivel estratégico

En el nivel estratégico (o largo plazo), las decisiones establecen los objetivos, recursos y políticas de la organización en un horizonte de planificación a largo alcance, por ejemplo, un

problema típico consiste en pronosticar el tipo de servicios a prestar y la capacidad necesaria en los próximos tres años. A este nivel pertenece la Estrategia Global y la Estrategia de Servicios, y es común encontrar tres áreas de problemas: Estrategia, Diseño y Planeación, las cuales son las principales para las tendencias de investigación en los sistemas de servicios. A continuación, se define cada una de estas áreas:

Estrategia: esta área se define con la planeación estratégica, la cual consiste en un proceso explicito que determina los objetivos de un sistema a largo plazo y el cómo alcanzarlo mediante una serie de estrategias de menor alcance, la evaluación de estas y un proceso de control, (Méndez, 2003). Algunos de los aspectos relevantes son: Sostenibilidad, Innovación y TIC's.

Diseño: se refiere a un concepto creativo, y generalmente se puede entender como una representación que varía dependiendo del campo de concepción. Desde el punto de vista de la SSME, el diseño se refiere a un concepto integrado de producto y proceso (Heizer & Render, 2010). El diseño de servicios es una actividad de organización y planificación de personas, comunicación y componentes para mejorar la calidad del servicio. Se puede entender como una interacción entre el proveedor de servicios y los clientes la experiencia de los clientes (Voss & Hsuan, 2011).

Planeación: es un proceso de toma de decisiones en una organización para definir su estrategia o dirección, y asignar recursos para llevarla a cabo (Méndez, 2003). Incluye aspectos como la previsión de la demanda mediante métodos de pronóstico como series de tiempo, regresión, o métodos causales, etc., y la planeación a largo plazo en la evaluación de proyectos de inversión, análisis de riesgos, lanzamiento de nuevos productos o servicios, técnicas de optimización para la asignación de recursos, y técnicas cualitativas para el manejo de recursos y de riesgos, entre otras.

2.1.1.3.2 Nivel táctico

En el nivel táctico (o de medio plazo), las decisiones determinan en un modo grueso los recursos necesarios para llevar a cabo el servicio en un horizonte de planificación a mediano alcance, por ejemplo, un problema típico consiste en la determinación de la fuerza de trabajo requerida en seis meses. Una posible clasificación de los problemas a este nivel tiene que ver con la planeación y el dimensionamiento de capacidades. A continuación, se define cada una de estas áreas:

Planeación de capacidades: busca como objetivo alcanzar un nivel óptimo donde las capacidades satisfagan la demanda (Hopp & Spearman, 2011; Méndez, 2003). Las necesidades de capacidad incluyen equipamiento, espacio y habilidades de los empleados. La capacidad se refiere al potencial de un sistema para producir bienes o prestar servicios durante un intervalo de tiempo específico, su planificación implica consideraciones a corto y largo plazo. Las consideraciones a largo plazo se relacionan con el nivel estratégico de capacidad; las consideraciones a corto plazo se relacionan con las variaciones en los requisitos de capacidad debido a fluctuaciones estacionales, aleatorias e irregulares en la demanda.

Dimensionamiento: referente a las decisiones de capacidad dentro de una empresa, las cuales son muy importantes porque ayudan a determinar el límite de producción y proporcionan una visión importante para determinar los costos de operación. Las decisiones básicas sobre la capacidad a menudo tienen consecuencias a largo plazo. Una de las decisiones más importantes es encontrar un balance entre el suministro a largo y mediano plazo y las capacidades de una organización y el nivel previsto de demanda a largo y mediano plazo. Las organizaciones también tienen que planificar los cambios reales en la capacidad, los cambios en los deseos y la demanda del consumidor, la tecnología e incluso el medio ambiente.

Al evaluar alternativas en la planificación de capacidad, los analistas deben considerar aspectos cualitativos y cuantitativos del negocio. Estos aspectos involucran factores económicos, ambientales, sociales e incluso personales

La planificación inadecuada puede ser una importante limitación en la determinación de la capacidad. Los factores más importantes de la capacidad efectiva son los procesos y los factores humanos. Los factores de proceso deben ser eficientes y deben funcionar sin problemas, de lo contrario la tasa de producción disminuirá drásticamente. Los factores humanos deben estar bien entrenados y tener experiencia, deben estar motivados y tener un bajo ausentismo y rotación laboral.

2.1.1.3.3 Nivel operativo

En el nivel operativo (o de corto plazo), las decisiones determinan cómo llevar a cabo las tareas específicas a realizar en un servicio en el horizonte de planificación a un plazo inmediato o corto, por ejemplo, el problema de la asignación de una persona para realizar una tarea específica de un servicio en una hora determinada. En este nivel de toma de decisiones se encuentran generalmente dos tipos de problemas: Programación y Control. A continuación, se definen cada uno de estos.

Programación (*scheduling*): trata sobre la asignación de recursos limitados a ciertas tareas u operaciones a través de un periodo de tiempo (Blazewicz et al., 2007; Méndez-Giraldo, 2011; M. Pinedo et al., 2015), bien sean para poder realizar ajustes en niveles de inventario de un producto terminado o para poder cumplir con los pedidos de los clientes, con el fin de optimizar una o más medidas de desempeño. Como lo plantea (M. Pinedo et al., 2015), los principales problemas de programación de tareas en sistemas de servicios se puede clasificar como:

- Programación en Proyectos: relacionado con la gestión de recursos y la secuenciación de tareas en proyectos como construcciones, procesos de desarrollo, inversiones, etc.
- Programación en fuerza de trabajo: relacionado con el establecimiento de horarios y turnos de trabajo. Se describe en detalle más adelante.
- Horarios, reservaciones y citas: se refiere al desarrollo de programación de horarios en escuelas, universidades donde la cantidad de variables a considerar hace difícil el desarrollo manual de estas actividades. También en el sector turismo, con el manejo de reservaciones y de citas en el sector Salud.
- Programación en transporte: relacionado con el problema de ruteo de vehículos y sus aplicaciones en logística, el cual se describirá en el siguiente numeral.
- Programación en entretenimiento: relacionado con el desarrollo de itinerarios de grandes competiciones como mundial de futbol, ligas, y decisiones como la asignación de estadios y jueces a los partidos, donde múltiples restricciones deben satisfacerse.

De esta clasificación de problemas se observa que existe una relación importante en los sistemas de servicio con el problema de Ruteo(*routing*) y el de personal (*workforce scheduling*). A continuación, se define cada uno de estos:

Ruteo: relacionado con el problema de Ruteo de Vehículos (VRP, *Vehicle Routing Problem*), el cual consiste en determinar las rutas que utilizará una flota de vehículos para visitar un conjunto de clientes geográficamente distribuidos y satisfacer su demanda optimizando una medida de desempeño. Es por tanto uno de los problemas de optimización combinatoria más estudiados en la literatura, como se puede ver en (Braekers, Ramaekers, & Van Nieuwenhuyse, 2016). Este es un problema de optimización combinatoria categorizado como NP-*hard*, con diferentes aplicaciones en logista, transporte, comunicaciones, etc. Sin embargo, el problema ha tenido un gran número de variantes en la historia, las cuales han agregado más complejidad

al mismo y también más cercanía a la realidad como es el caso de los sistemas de servicios. Dentro de las principales variantes se tiene:

- CVRP (Problema de Ruteo con Capacidad): donde la flota de vehículos tiene una capacidad limitada.
- VRPTW (Problema de Ruteo con Ventanas de Tiempo): donde cada cliente tiene un horario en el cual puede ser visitado.
- VRPB (Problema de Ruteo de Vehículos con Recibo): se divide la flota de vehículos en aquellos que reciben y entregan bienes en los puntos.
- VRPSPD (Problema de Ruteo de Vehículos Recogiendo y Entregando Simultáneamente): el vehículo que visita el punto puede recibir como recoger bienes.
- MD-VRP (Problema de Ruteo de Vehículos con Múltiples Depósitos): Los vehículos parten de distintos depósitos y pueden terminar en cualquiera de ellos.
- MC-VRP (Problema de Ruteo de Vehículos con Múltiples Compartimientos): Los vehículos tienen diferentes áreas de almacenamiento a nivel interno.
- MT- VRP (Problema de Ruteo de Vehículos con Múltiples Viajes): Los vehículos pueden retornar al depósito y volver a salir.

Y en general, se puede dar múltiples combinaciones entre estas variantes, que hacen que este tipo de problemas sea aún más difícil de resolver.

Personal: en esta categoría se trata sobre el problema de programación de personal (*workforce scheduling*), el cual es un problema de encontrar un horario que es una asignación de personas a intervalos de tiempo que satisfaga la demanda del personal y tome en cuenta todas las demás restricciones, y lo más frecuente es que se optimice una función de costos (M. Pinedo et al., 2015; Van Den Bergh, Beliën, De Bruecker, Demeulemeester, & De Boeck, 2013).

Entre los requisitos y restricciones están: la cantidad de personal debe ajustarse a la demanda, calificación del personal programado debe concordar con las necesidades, los diferentes tipos de contratos deben ser considerados, las regulaciones legales deben ser cumplidas, el personal no debe trabajar más de lo especificado en el contrato, el personal no debe trabajar más de un turno por día, las vacaciones deben ser consideradas,- pueden ocurrir diferentes modelos de turnos (uno, dos, tres turnos, etc.) y las pausas y descansos deben ser considerados.

Control: este problema hace referencia a las actividades operacionales relacionadas con el seguimiento de los programas establecidos y tiene como principal característica que debe ejecutarse en línea (*on line*) con las operaciones, por tanto su complejidad es mayor (Hopp & Spearman, 2011). También, es frecuente conocerlo como re-programación, la cual consiste en la corrección de estándares y la actualización de los programas de actividades o tareas.

La complejidad de los problemas aumenta desde el nivel estratégico al nivel operativo, porque aumenta la información requerida (y más detallada) y el tiempo de respuesta es menor. Los problemas de programación de tareas pertenecen al nivel operativo del proceso de toma de decisiones y por lo tanto son problemas difíciles de resolver.

2.1.2 Programación de tareas

La programación de tareas (*scheduling*) trata sobre la asignación de recursos limitados a ciertas tareas u operaciones a través de un periodo de tiempo (Blazewicz et al., 2007; Méndez-Giraldo, 2011; M. L. Pinedo, 2016), bien sean para poder realizar ajustes en niveles de inventario de un producto terminado o para poder cumplir con los pedidos de los clientes con el fin de optimizar una o más medidas de desempeño.

En esta sección, primero se define el problema de programación de tareas con sus principales generalidades en el proceso de toma de decisiones. Luego se presentan las principales

notaciones de la literatura sobre el problema de programación de tareas. Por último, se presentan las principales técnicas de solución para este problema.

2.1.2.1 Definición de programación de tareas

La programación de tareas es un proceso de toma de decisiones con respecto a la mejor asignación de recursos. Debido a esto, se debe definir la manera en que los recursos se utilizaran según sea lo programado, para reducir significativamente los tiempos de procesamiento y los costos de producción. Su salida consiste en especificar el tiempo en que comienza una actividad y los recursos que consume, de esta forma se puede evidenciar una secuencia u orden de ejecución de las distintas actividades para alcanzar un objetivo, ya sea un bien o un servicio. Si cada trabajo comienza tan pronto como sea posible y se procesa sin interrupción para un tiempo dado de procesamiento, la secuencia determina los tiempos de inicio y terminación de cada actividad lo que en su conjunto determina la programación.

En los problemas de programación de tareas en sistemas de manufactura y servicios aparecen tres interrogantes importantes que se deben definir para dar su solución: *¿qué?, ¿quién? y ¿cuándo?* El *¿qué?* hace referencia al objetivo que se debe alcanzar y para esto determina lo que se debe realizar, por ejemplo, qué trabajos o actividades se pretenden realizar. El *¿quién?* indica el o los recursos que se deben asignar, representado en quién o quienes, qué personas o qué máquinas en concreto tienen que hacer dichas actividades. Finalmente, el *¿cuándo?* determina el orden o secuencia en que se deben realizar las operaciones, el momento en que se asignan los recursos y la disponibilidad de los resultados. Sobre este esquema de tres elementos se pueden analizar diferentes tipos de problemas reales en los ámbitos industrial, comercial, social, científico, e incluso de la vida cotidiana, siempre y cuando se pueda medir el desempeño de diferentes metodologías de solución, y en este punto aparece un cuarto componente que son las *medidas de desempeño* las cuales determinan el grado de aptitud del sistema respecto a una métrica definida, la cual se desea optimizar. La asociación de estos cuatro componentes permite comparar los diferentes métodos de solución que se planteen, respecto a los resultados que se obtienen de la medida de desempeño, la información que se extrae para aplicar en el sistema real y la rapidez y eficiencia de su ejecución, de esta manera comparar unas soluciones con otras, ofreciendo elementos de juicio para el decisor.

La complejidad de la programación depende de sus entradas, variables, restricciones y demás factores que puedan afectarla en su conjunto, para ello se han creado en el transcurso del tiempo una serie de técnicas que proveen de soluciones a distintos tipos de secuenciación, estas técnicas varían dependiendo de la complejidad algorítmica del problema y de la eficiencia de este, por lo que dependiendo del conjunto de problemas deriva el éxito de la herramienta a utilizar.

La labor de programación de tareas se enmarca en el nivel operativo de la toma de decisiones siguiendo el proceso de la Figura 2-6 en un sistema de manufactura. La programación se encuentra entre las funciones de planeación y control, y debido a su temporalidad se tiene esta precedencia, aunque en algunos sistemas de manufactura y servicios por su complejidad se solapan funciones en algunos periodos. Por otro lado, el flujo de realimentación establece un carácter de filtro y control para el mejoramiento del desempeño a través del tiempo.

El proceso de decisión empieza con la planeación que se encarga del análisis de carga, la planeación gruesa y la definición de tareas. En esta función se analiza las restricciones de capacidad de los recursos y se define la manera como se asignarán los trabajos a cada recurso o conjunto de recursos. La siguiente función corresponde a la programación de tareas, donde se determina la secuenciación de actividades y la programación detallada que establece los tiempos de inicio y fin de las tareas con sus recursos. Por último, se encuentra la función de control, la cual se encarga de la actualización de la información y el seguimiento de las

secuencias y los programas establecidos, con el fin de identificar desviaciones de estos o posibles interrupciones no controladas, y realizar si es pertinente la reprogramación de tareas.

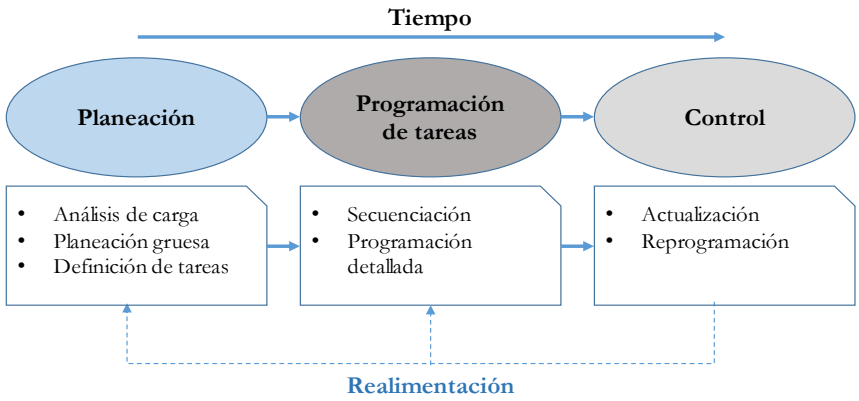


Figura 2-6 Funciones del proceso de toma de decisiones de programación de tareas en un sistema de manufactura
Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los sistemas de servicios, es difícil establecer un proceso típico de programación de tareas, dado que puede enfrentarse a una gran variedad de problemas como la disponibilidad de los recursos (por ejemplo, la asignación de pistas a los aviones) o la reserva de sitios de trabajos, equipos u otras instalaciones (M. L. Pinedo, 2009) y que a sus vez tenga que tomar decisiones de secuenciación de tareas y de control de las mismas. Por tanto, la función de programación de tareas en este nivel de toma decisiones continua con las tres funciones definidas (planeación, programación y control) pero que presentan intersecciones entre ellas a través del tiempo (ver Figura 2-7), lo cual representa la complejidad del proceso de toma decisiones.

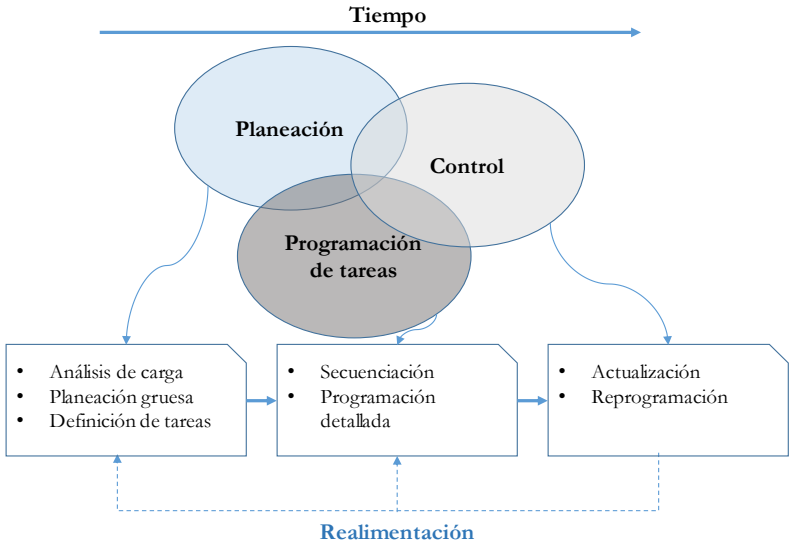


Figura 2-7 Funciones del proceso de toma de decisiones de programación de tareas en un sistema de servicios
Fuente: Elaboración propia.

2.1.2.2 Notaciones de programación de tareas

En la literatura se han desarrollado diferentes notaciones del problema de programación de tareas, las cuales intentan definir los aspectos más relevantes del problema y que permitan establecer componentes para representar el sistema a estudiar, y además clasificar los problemas. En el Anexo A se presenta un resumen de las 5 principales notaciones encontradas en la literatura.

La notación propuesta por (Conway, Maxwell, & Miller, 1967) presenta cuatro símbolos A / B / C / D, pertenecientes a los trabajos o piezas a procesar (A), las maquinas (B), el tipo de flujo de las piezas (C) y la medida de desempeño (D). Su ventaja es que es sencilla, pero no permite representar problemas estudiados en la literatura, como sistemas híbridos.

La notación de (Graham et al., 1979) consiste en tres campos $\alpha|\beta|\gamma$, donde α representa la configuración del sistema de producción, β representa las restricciones y/o características propias a las tareas y el sistema, y γ es la función objetivo que se va a optimizar. Esta notación es la más utilizada en la literatura para problemas de programación de tareas en los sistemas de manufactura, ha permito hacer clasificaciones de problemas como los conocidos como *Flow shop*, *Job shop,* y *Open Shop*., así como sus variantes e incluso establecer una clasificación de acuerdo con la complejidad computacional para resolver el problema. Aunque es una notación con varios campos, no representa en su totalidad los sistemas híbridos y en algunas ocasiones se han realizado extensiones específicas de la notación.

La notación de (Vignier, Billaut, & Proust, 1999) es una extensión de la propuesta por (Graham et al., 1979), desglosando el campo α en cuatro parámetros $\alpha = \alpha_1\alpha_2(\alpha_3\alpha_4^{(1)}, \alpha_3\alpha_4^{(2)}, \dots, \alpha_3\alpha_4^{(\alpha_2)})$, donde: α_1 permanece igual que en (Graham et al., 1979), α_2 indica el número de etapas en un flow-shop, α_3 y α_4: se repiten para cada una de las α_2 etapas. Esta notación es la más completa entre las analizadas y permite describir sistemas complejos y realísticos, pero solo de tipo flow shop

La notación propuesta en (Bloch & Manier, 1999) y (Manier & Bloch, 2003), también inspirada en la notación de (Graham et al., 1979) pero adaptada a un problema de programación de tareas en sistemas de transporte mediante grúas de elevación (*hoist scheduling problem* HSP). Está consiste en cuatro campos $\alpha|\beta|\delta|\gamma$, donde: α indica el tipo de sistema de HSP, β indica el sistema físico con 11 campos, δ describe el ambiente de producción considerado y γ indica el criterio a ser optimizado.

Para los sistemas de servicios se ha empleado una notación que representa los problemas desde la teoría de colas propuesta por (Kendall, 1953) que consiste seis campos 1/2/3/(4/5/6), donde el 1 indica el proceso de llegada, 2 el proceso de servicio (tiempo de servicio), 3 la capacidad del sistema, o el número máximo de clientes permitidos en el sistema, 4 la prioridad en la que los trabajos en la cola son servidos y 5 el tamaño de la fuente de origen de los clientes (población o fuente).

También es importante considerar una característica que no representa claramente ninguna de las notaciones presentadas, la cual consiste en si el problema es estático o dinámico. Los problemas estáticos se caracterizan porque los trabajos tienen un número finito y determinado y deben realizarse por un número finito de máquinas, y al momento de realizar la programación la ruta de cada pieza, las operaciones que la componen, en qué máquina debe realizarse cada operación y la duración correspondiente, son conocidas. Adicionalmente, todos los trabajos están disponibles al inicio del horizonte de planeación.

Para los problemas dinámicos, el horizonte de planeación se considera ilimitado hacia el futuro, o sea el número de máquinas se queda limitado, mientras el número de trabajos es ilimitado, la llegada, los tiempos de procesamiento, las rutas y la disponibilidad de recursos

puede ser (generalmente) desconocida, por tanto, la programación se realiza sobre la llegada de los trabajos. Es evidente que los problemas dinámicos requieran un enfoque distinto respecto a los problemas estáticos. En esta situación no es suficiente realizar un único programa, porque esto resultaría poco eficaz al trascurrir del tiempo, por lo tanto, es necesario establecer un conjunto de programas sucesivos a lo largo del tiempo.

Para los sistemas de servicio, esta característica de estático o dinámico del problema es fundamental de acuerdo con la interacción entre cliente y proveedor que origina un proceso de coproducción y por el tipo de información que puede ser determinístico o estocástico, por tanto, los problemas pueden tener las dos características en algunos de los componentes. La Tabla 2-3 presenta una comparación de las cinco notaciones mencionadas sobre 22 características seleccionadas de las más relevantes en la sección 2.1.1.2. para los sistemas de servicios. Se observa que el número de servidores, el tipo de flujo de trabajos, y los tiempos de procesamiento son características presentes en todas las notaciones. Por otro lado, características como tipo de sistema, capacidad, función objetivo, recursos limitados, y tiempo de liberación en 4 de las 5 notaciones. Estas están relacionadas con la disponibilidad de los recursos y el momento de realizar la programación. Por otro lado, la interrupción, precedencias y transferencia está en 3 de las 5 notaciones, y están relacionas con los trabajos y sus rutas de procesamiento. Características relacionadas con el proceso de llegadas de los trabajos como lo son disciplina de la fila, tamaño de la población, y sincronización están presentes en solo dos o menos de las cinco notaciones. Finalmente, características como la intangibilidad, transferencia de la propiedad, interacción cliente-recurso, y turnos no están explícitamente relacionadas en las notaciones analizadas, lo cual permite concluir que no se encuentra una notación específica para los problemas de programación de tareas en los sistemas de servicios.

Tabla 2-3 Comparación de notaciones para el problema de programación de tareas

Característica	I	II	III	IV	V	Frecuencia %
Tipo De Sistema		x	x	x	x	80%
Proceso de arribos	x	x				40%
Proceso de servicio	x					20%
Número de servidores	x	x	x	x	x	100%
Capacidad del sistema	x		x	x	x	80%
Disciplina de la fila	x					20%
Tamaño de la población	x					20%
Número de trabajos		x	x	x	x	80%
Tipo de flujo de los trabajos	x	x	x	x	x	100%
Función objetivo		x	x	x	x	80%
Interrupción de tareas			x	x	x	60%
Recursos limitados	x		x	x	x	80%
Precedencias			x	x	x	60%
Tiempos de liberación		x	x	x	x	80%
Tiempos de procesamiento	x	x	x	x	x	100%
Sincronización					x	20%
Transferencia			x	x	x	60%
Redes (precedencias)			x	x	x	60%
Intangible						0%
Transferencia de propiedad						0%
Interacción cliente-recurso						0%
Turnos						0%

I (Kendall, 1953)
II(Conway et al., 1967)
III (Graham et al., 1979)
IV(Vignier et al., 1999)
V (Bloch & Manier, 1999)

Fuente: Elaboración propia

2.1.2.3 Técnicas de solución

Existen varios tipos de técnicas para resolver problemas de programación de tareas, las cuales se clasifican como optimización, modelos estocásticos, heurísticas, metaheurísticas y otros. A continuación, se describen brevemente estos métodos.

2.1.2.3.1 Métodos de optimización

Son aquellos que garantizan el valor óptimo de la solución, habitualmente consta de un consumo computacional muy elevado, por lo que resulta adecuado para instancias pequeñas del problema. Pinedo (2016) clasifica los métodos como aplicaciones de Programación Lineal, Programación Dinámica, y Ramificación y Poda (*Branch & Bound*). Algunas de las ventajas de estos métodos son la optimalidad de la solución y que se cuenta con paquetes computacionales que los resuelven de una manera adecuada y rápida. Sin embargo, su desventaja principal es el alcance para problemas de un tamaño pequeño, además de las dificultades propias de estas técnicas de divisibilidad, es decir, se pueden tener soluciones donde una sola tarea se puede fraccionar en el tiempo como lo plantea (Méndez-Giraldo, 2011).

A continuación, se definen brevemente las principales técnicas de optimización:

- *Programación Lineal (Linear programming, LP):* es una técnica de optimización que asume una función objetivo y restricciones lineales, información conocida y determinística. Los métodos de solución son basados generalmente en Simplex y algoritmos iterativos.
- *Programación Lineal Mixta (Mixed Linear programming, MLP):* basada en LP, pero considera la integralidad de las variables de decisión. Los métodos de solución se basan principalmente en técnicas de descomposición como generación de columnas, ramificación y acotamiento, y de aproximación.
- *Programación dinámica (Dynamic programming, DP):* es una técnica de optimización basada en el principio de optimización de Bellman, en el cual se basa en la solución de subproblemas de forma iterativa garantizando la optimalidad mediante una función de recursividad y un conjunto de estados conectados a través de decisiones.
- *Programación por restricciones (Constraint programming, CP):* se basa en un proceso iterativo en el que se ajustan unas variables de decisión mediante la satisfacción de unas restricciones.
- *Optimización robusta (Robust optimization, RO):* se basa en modelos de optimización lineal considerando incertidumbre mediante un conjunto de escenarios y unas distribuciones de probabilidad.

2.1.2.3.2 Modelos estocásticos

Son aquellos que consideran información de tipo estocástica para los clientes (trabajos) y los recursos (máquinas) en el proceso (Méndez-Giraldo, 2011). Los métodos clasificados en esta categoría se clasifican como: programación estocástica, teoría de colas, procesos markovianos de decisión y simulación. Algunas de las ventajas de estos métodos son la incorporación de la incertidumbre propia del proceso de producción y de servicios, la cual no se refleja en los métodos de optimización, y que se cuentan con paquetes computacionales que facilitan su tratamiento. Adicionalmente, aportan una mayor representatividad del componente dinámico de los problemas de programación de tareas. Sin embargo, su desventaja principal se centra en el modelaje matemático, los supuestos y el tamaño de los problemas que se pueden resolver de una manera analítica, además de la implementación de las soluciones obtenidas.

A continuación, se describen brevemente los principales métodos:

- *Programación estocástica (Stochastic programming, SP)*: consiste en un modelo de optimización donde las variables y/o parámetros se modelan a través de variables aleatorias. Los métodos de solución se basan generalmente en procesos iterativos de dos etapas y

reducción de la variabilidad con el fin de obtener un valor esperado de las variables de decisión y de la función objetivo.

- *Teoría de Colas (Queueing theory, QT):* Dentro de los modelos estocásticos para el análisis de sistemas de servicios se encuentran la teoría de colas, la cual estudia los sistemas donde se configura una línea de espera el momento que un cliente llega a una instalación en búsqueda de un servicio y dadas sus características de capacidad se forma una cola o línea de espera (Hopp & Spearman, 2011; S. M. Ross, 1995). El recurso que brinda el servicio requerido (servidor) elige un cliente de la línea de espera para comenzar a prestar el servicio. Al culminar el servicio del cliente actual, se repite el proceso de elegir un nuevo cliente Las redes de colas (o de líneas de espera) se configuran cuando el servicio al cliente se completa por su paso en diferentes etapas donde es atendido de manera secuencial. Las principales técnicas para el análisis de líneas de espera son los modelos markovianos, redes de colas y procesos estocásticos.
  Dependiendo del propósito de la modelación de la red de colas, la técnica de solución es seleccionada siguiendo como criterio la precisión del resultado esperado respecto a los supuestos de funcionamiento del sistema. Dado que la terminología utilizada para clasificar los métodos de análisis no es precisa, Baldwin et al. (2003) propone su clasificación en dos (2) tipos a saber: Exactos y Aproximados. Dentro de las técnicas de análisis clasificadas como Exactas se identifican, las redes de Jackson y redes BCMP. Por otro lado, se identifican como técnicas Aproximadas: Mean Value Analysis (MVA) y Equilibrium Point Analysis.
- *Proceso markovianos de decisión (Markov decision process, MDP)*: son procesos estocásticos que intentan representar el problema mediante un esquema similar a programación dinámica mediante variables o etapas de decisión, función de recursión, estados y una función objetivo. Su forma de solución se establece a través de procesos iterativos y basados en PL que permiten obtener políticas de decisión (S. M. Ross, 1995).
- *Simulación (Simulation, S)*: se define como una técnica de la investigación de operaciones que se usa para representar sistemas en un entorno computacional con el fin de experimentar (Méndez-Giraldo, 2011). Incluye el diseño y desarrollo para representar el sistema, con el fin de entender y predecir su comportamiento a lo largo del tiempo. Con respecto a programación de tareas, básicamente se ha hecho uso de dos enfoques de modelos de simulación: discreta y multi agentes.
  La simulación discreta se ha empleado para representar y explicar el flujo de los recursos en un proceso de producción y servicios caracterizados por la existencia de colas y acumulaciones en estaciones de trabajo, donde la función de programación de tareas juega un rol importante en la armonización de estos flujos (Méndez-Giraldo, 2011). Por otro lado, la simulación basada en agentes se ha empleado para explicar el comportamiento de los recursos y su interacción en con otros recursos y con los medios de producción (Ana Madureira et al., 2010).

2.1.2.3.3 Métodos de heurísticas

Una heurística permite llegar a una muy buena solución, pero no óptima en un tiempo limitado, por lo tanto, la heurística comprende algoritmos de exploración en los que las soluciones se hallan mediante la evaluación en la búsqueda de un resultado final mediante pasos que conducen a soluciones de un menor costo computacional, comparado con los métodos exactos.

Un tipo especial de heurísticas en los problemas de programación de tareas son las *reglas de despacho (Distpaching rules, RT)*, las cuales consisten en reglas de decisión sencillas para la asignación de trabajos o clientes a maquinas o recursos (Méndez-Giraldo, 2011; M. L. Pinedo, 2016). Dentro de las reglas de despacho más populares en problemas de programación de tareas se tienen:

- FIFO (*first in, first out*): consiste en seleccionar la primera operación en una fila para la misma máquina.
- LIFO (*last in, first out*): consiste en seleccionar la última operación en una fila para la misma máquina.
- SPT (*shortest processing time*): consiste en seleccionar una operación con el tiempo de procesamiento más corto.
- LPT (*longest processing time*): consiste en seleccionar una operación con el tiempo de procesamiento más largo.
- MWR (*most work remaining*): consiste en seleccionar una operación para el trabajo con el mayor tiempo de procesamiento pendiente.
- LWR (*least work remaining*): consiste en seleccionar una operación para el trabajo con el menor tiempo de procesamiento pendiente.
- EDD (*earliest due date*): consiste en seleccionar un trabajo con la fecha de entrega más temprana.
- RND (*random*): consiste en seleccionar una operación en forma aleatoria.

Algunas de estas incluso garantizan optimalidad, por ejemplo para una máquina y n trabajos con tiempos de procesamiento determinísticos y estático, la regla SPT garantiza el makespan óptimo (M. L. Pinedo, 2016).

Por otro lado, se pueden diseñar heurísticas que permiten obtener soluciones óptimas para ciertas configuraciones, como es el caso de la Regla de Jhonson para el problema de *Flow shop* en 2 máquinas (Méndez-Giraldo, 2011). El uso de la heurística es útil en el caso que se acepte una solución aproximada y el costo computacional para resolver el problema sea elevado, por otro lado, este método de solución puede ser muy eficaz como un paso intermedio hacia una metaheurística.

2.1.2.3.4 Metaheurísticas

Las metaheurísticas son algoritmos aproximados y se definen como metodologías de búsqueda de propósito general (Laha, 2007). Parten de una solución factible inicial (obtenida frecuentemente con otra heurística) y mediante alteraciones de la solución, van iterando a otras soluciones factibles de su entorno, almacenando la mejor de ellas hasta que se cumpla un criterio de detención.

Las metaheurísticas poseen algunas características importantes que permiten comparar su desempeño y elegir con cual, o cuales trabajar, para un problema determinado. Una de ellas es el número de soluciones, y pueden ser poblacionales (varias soluciones en cada iteración) o de trayectoria (una única solución). También, respecto a la función objetivo siendo estática o dinámica en cuanto a la modificación de esta en el proceso de búsqueda. Otro aspecto importante es la vecindad, en la cual pueden tener una estructura única y unitaria, o una estructura variable. Por otro lado, pueden tener un componente de memoria o sin memoria para almacenar la historia de las soluciones.

De acuerdo con estas características, algunas de las principales metaheurísticas empleadas en problemas de programación de tareas se definen a continuación y en la Tabla 2-4 se presentan sus características principales:

- Optimización por Colonia de Hormigas *(Ant Colony Optimization, ACO):* consiste en un algoritmo inspirado en el comportamiento de las hormigas, donde un conjunto de hormigas simuladas busca una solución alrededor de un grafo que representa el problema a resolver. Su funcionamiento se inspira en seguir el rastro de feromonas que las hormigas van dejando al caminar a través de una buena solución. A medida que aumentan las iteraciones se llega a un óptimo global de la solución.

- Equipos Asincrónicos *(Asynchronous Teams, AT*): es una metaheurística multi-poblacional y multi-agente que consiste en dividir en subproblemas de tal forma que cada uno de ellos mantenga una población de soluciones candidatas. Cada población es modificada por agentes, con el objetivo de mejorar la calidad de dicha población.
- Algoritmos Culturales (*Cultural Algorithms, CA*): es una metaheurística poblacional, que establece que la toma de decisiones depende de la cultura heredada y de las creencias de la población actual. La aceptación de soluciones es basada en el establecimiento de estas reglas.
- Algoritmos de Estimación de la Distribución (*Estimation of Distribution Algorithms, EDA*): con el fin de reemplazar el cruce y mutación de los algoritmos evolutivos, se emplea el uso de una estimación y posterior muestreo de una distribución de probabilidad aprendida a partir de individuos seleccionados.
- Búsqueda por Entorno Adaptativo Difuso (*Fuzzy Adaptive Neigborhood Search, FANS*): es un procedimiento basado en búsqueda local que incorpora componentes difusos para decidir si acepta o no una solución de acuerdo con unas funciones de pertenencia definidas.
- Algoritmos Genéticos (*Genetic Algorithm, GA)*: este algoritmo hace evolucionar una población de individuos sometiéndola a acciones aleatorias semejantes a las que actúan en la evolución biológica, utilizando una selección de acuerdo con algún criterio donde se decide cuáles son los individuos más adaptados para ser solución.
- Procesos Aleatorizados y Adaptativos de Búsqueda Voraz *(Greedy Randomized Adaptative Search Procedures, GRASP):* la cual es un procedimiento de búsqueda basado en funciones aleatorias que se adaptan a una nueva solución, permitiendo sencillez y facilidad en su implementación. Las iteraciones consisten en una fase de construcción y de mejora, en donde se aplican algoritmos de búsqueda local que permitan elegir el mejor resultado, agregando estos resultados para encontrar una solución mejor, que de no existir o encontrarse se finalizaría esta metodología.
- Búsqueda Local Guiada (*Guided Local Search, GLS*): basada en penalizaciones por encima de un procedimiento de búsqueda local, con el fin de ayudarlo a escapar de un óptimo local.
- Concentración Heurística (Heuristic Concentration, HC): es un procedimiento que emplea información proporcionada por múltiples ejecuciones de un algoritmo heurístico, mediante la cual se construye una solución que puede ser mejor a las ya encontradas.
- Búsqueda Local Iterativa (*Iterated local search, ILS*): se basa en un procedimiento de búsqueda local sobre un subconjunto de soluciones del optimo local con el fin de intensificar el espacio de búsqueda.
- Algoritmos Meméticos *(Memetic Algorithmss, MA*): es un algoritmo evolutivo que involucra un aspecto de transferencia entre las generaciones de la población. Se basa en un procedimiento de búsqueda local sobre un GA, que intenta mejorar el espacio de búsqueda de soluciones.
- Métodos Multi-arranque *(Multi start, MSM):* es un algoritmo iterativo en el que cada iteración tiene dos fases. En la primera fase se genera una solución, que se mejora en la segunda fase. Su objetivo es ayudar a escapar de optimo locales.
- Reencadenamiento de Trayectorias *(Path relinking, PR):* consiste en una metaheurística que genera nuevas soluciones mediante la exploración de trayectorias en el espacio de soluciones. Para esto, partiendo de dos soluciones de buena calidad, se establece un camino que las una, y entre ellas podría existir una buena solución.
- Recocido Simulado *(Simulated Annealing, SA):* el cual utiliza técnicas de optimización no determinísticas, es decir, no busca la mejor solución del entorno de la solución actual, sino que genera aleatoriamente una solución cercana si tiene el menor costo.

- Inteligencia de Enjambre (*Swarm Intelligence, SI):* este tipo de algoritmos se basa en la toma de decisión de cada individuo, en donde se determina el movimiento de este para alcanzar una nueva posición. De este método, el más conocido es la optimización por enjambre de partículas *(Particle Swarm Optimization, PSO).*
- Búsqueda Dispersa *(Scatter Search, SS)*: es una metaheurística que se basa en formulación de estrategias de decisión y la combinación de ellas y así obtener una mejor solución a partir de la combinación de reglas y no de cada una por separado.
- Métodos de Aceptación del Umbral (*Threshold Accepting method, TAM*): consiste en que solo los movimientos que mejoren la función objetivo serán aceptados, y solo se aceptaran aquellos que no mejoren la función objetivo si no superan un umbral.
- Búsqueda Tabú *(Tabu Search, TS):* la cual aumenta el rendimiento del método de búsqueda local mediante el uso de estructuras de memoria, es decir, una vez dada una solución que es abandonada se tienen en cuenta para no volver a ella y encontrar una mejor solución en un número de iteraciones limitado.
- Búsqueda en Vecindad Variable *(Variable Neighborhoog Search, VNS):* es un proceso que busca cambiar sistemáticamente las estructuras de vecindades dentro de un procedimiento de búsqueda local.

Tabla 2-4 Características de metaheurísticas utilizadas en problemas de programación de tareas

Metaheurística	I	II	III	IV	V	VI	VII
ACO	Población.	Estática	Única	Explicita	No	No	Si
AT	Población.	Estática	Única	Explicita	Si	No	Si
CA	Población.	Estática	Variable	Explicita	No	Si	Si
EDA	Población.	Estática	Única	Implícita	No	No	Si
FANS	Trayectoria.	Dinámica	Única	No	Si	No	Si
GA	Población.	Estática	Única	Implícita	No	Si	Si
GRASP	Trayectoria.	Estática	Variable	No	Si	Si	No
GLS	Trayectoria.	Dinámica	Única	Explicita	Si	No	No
HC	Trayectoria.	Estática	Única	Explicita	Si	No	No
ILS	Trayectoria.	Estática	Única	No	Si	Si	No
MA	Población.	Estática	Única	Implícita	Si	Si	Si
MSM	Trayectoria.	Estática	Única	No	Si	Si	No
PR	Población.	Estática	Única	Implícita	Si	No	Si
SA	Trayectoria.	Estática	Única	No	Si	Si	No
SI	Población.	Dinámica	Variable	Implícita	No	Si	Si
SS	Población.	Estática	Única	Explicita	Si	No	Si
TAM	Trayectoria.	Estática	Única	No	Si	No	No
TS	Trayectoria.	Estática	Variable	Explicita	Si	No	No
VNS	Trayectoria.	Estática	Única	No	Si	No	No

I Número de Soluciones
II Función Objetivo
III Vecindad
IV Memoria
V Búsqueda Local
VI Aleatorio
VII Adaptativo

Fuente: Elaboración propia.

2.1.2.3.5 Otras técnicas de solución

En esta categoría se clasifican los métodos que utilizan técnicas diferentes a las mencionadas en las tres anteriores. Dentro de esta, es importante mencionar, la inteligencia artificial como parte de las ciencias computacionales (Russell & Norvig, 2010). Es una ciencia multidisciplinaria basada en economía, neurociencia, psicología, computación y teoría de

control, entre las principales, y busca crear artefactos artificiales dotados de inteligencia. Algunas de los principales métodos son, lógica difusa, redes neuronales, autómatas celulares, sistemas multi-agente, inteligencia colectiva, sistemas basados en conocimiento, sistemas cooperativos y los sistemas expertos. Sus aplicaciones se dan en reconocimiento de patrones, visión artificial, robótica, lenguaje natural, diagnóstico empresarial, diagnóstico médico, multimedia y realidad virtual.

Las tecnologías basadas en agentes proveen una forma para contextualizar sistemas complejos y dinámicos, así como comprender la interacción social de entidades independientes actuando, aprendiendo y evolucionando de manera separada en respuesta a interacciones y estímulos de su ambiente local (Lopez-Santana, Méndez-Giraldo, & Florez Becerra, 2015). Un agente inteligente percibe el ambiente a través de sensores y actúa sobre el ambiente basado en un conjunto de reglas, a través de efectores o actuadores lo cual le permite ser conceptualizado como un sistema adaptativo y auto-organizado frente a comportamientos complejos y estrategias específicas.

Los agentes se pueden caracterizar de acuerdo a los "atributos o propiedades que posean (y que definen su comportamiento) frente a la resolución de un determinado problema" Los sistemas multi-agente o los modelos basados en agentes han sido utilizados durante los últimos años para realizar el ruteo de vehículos (Dan, Cai, & Zheng, 2009) así como para realizar programación de tareas en diferentes industrias ya sea de manufactura como de servicios (Y. Chen, Wang, Lin, & Tang, 2006; Usher, 2003). Al explotar las características de los agentes (autonomía, cooperación y coordinación) se puede realizar planeación en tiempo real, es decir, se pueden obtener soluciones que pueden ser alteradas al ingresar nuevas demandas al sistema. Lo anterior es realizado en tiempos de computación razonables y la calidad de las soluciones alcanzadas por éste método es comparable con las soluciones arrojadas por los métodos tradicionales (Erol, Sahin, Baykasoglu, & Kaplanoglu, 2012).

Los sistemas expertos constituyen otro método que puede ser utilizado para realizar procesos de planeación en el entorno del cuidado a la salud domiciliario. Mediante una base de conocimiento, motores de inferencia computacional y una interfaz de usuario los sistemas expertos pueden simular el proceso de aprendizaje, memorización, razonamiento y comunicación de un experto en humano (Álvarez et al., 2011; Méndez-Giraldo et al., 2013; Metaxiotis et al., 2002). Este método se traduce en un robusto programa computacional que puede apoyar las decisiones de programación en ambientes de manufactura así como de servicios (Álvarez et al., 2011).

2.1.3 Gestión de conocimiento y modelos de inteligencia

La gestión del conocimiento y los modelos de inteligencia son herramientas que permiten la representación de sistemas involucrando componentes que las herramientas tradicionales como la optimización e incluso las heurísticas y las metaheurísticas no ofrecen en diferentes campos de la toma de decisiones. Específicamente para la programación de tareas, componentes como la incertidumbre de los procesos tanto en manufactura como en servicios y el conocimiento y la experiencia de los analistas encargados de la toma de decisiones, son factores importantes que justifican la necesidad de involucrar esta área de conocimiento en el desarrollo de técnicas que ayuden a mejorar el proceso de toma de decisiones en los sistemas de servicios.

Esta sección se divide en tres partes. La primera describe las generalidades de la inteligencia y la segunda sobre la gestión del conocimiento. La tercera parte presenta una descripción de los conceptos sobre sistemas expertos, sus características y su aplicación en el problema de programación de tareas.

2.1.3.1 Generalidades de modelos de inteligencia

Para *inteligencia* se han propuesto definiciones a lo largo de la historia desde la psicología, la teoría de juegos, la inteligencia de negocios y la inteligencia organizacional, entre otras. Por ejemplo, la inteligencia es la "capacidad para entender o comprender" y la "capacidad para resolver problemas", según el diccionario de la Real Academia de la Lengua Española. La Tabla 2-5 presenta algunas de las principales definiciones de Inteligencia.

Tabla 2-5 Conceptos de inteligencia

Áreas de Conocimiento	Concepto
Psicología	Capacidad mental e incluso la relacionan con la capacidad de comprender el entorno (Gottfredson, 1997).
Teoría de juegos	Capacidad de tomar la mejor decisión posible (Gibbons, 1993).
Organizaciones	Efectividad en la toma de decisiones (Liebowitz, 2000). Capacidad y necesidad de los individuos que hacen parte de la organización y de ella misma, como un todo, teniendo en cuenta el medio en que está inmersa (Svobodová & Koudelková, 2011).
Inteligencia de Negocios	Proceso de análisis de todo lo existente, para abstraer conocimiento que apoye la toma de decisiones y mejore la efectividad de la organización.

Fuente: Elaboración propia.

Aunque las definiciones son concebidas por disciplinas distintas, tienen en común la toma de decisiones como una medida de desempeño de la inteligencia.

Los modelos de inteligencia se centran en herramientas matemáticas y computacionales, que permiten tanto la representación como el análisis de los sistemas. Herramientas como la simulación, los sistemas expertos y la teoría de juegos, al igual que otros modelos matemáticos, permiten la representación y pueden ser soporte para la toma de decisiones, teniendo como base para su construcción estudios de comportamiento, tanto individual como colectivo, al igual que modelos parciales del sistema, provenientes de artículos científicos y de otros estudios relacionados.

En la literatura se encuentran algunos modelos de inteligencia como el de North y Poschl, el de Pinheiro, Hernández y Raposo y el modelo de Halal adaptado por Guerra, Molinillo y Bermudez. El primero es un modelo de inteligencia organizacional basado en variables (North & Pöschl, 2003). Se compone de la capacidad de respuesta, la capacidad de resolución del problema, la capacidad de aprendizaje/creatividad/innovación, la memoria organizacional y la inteligencia emocional.

El segundo es un modelo estructural propuesto por (Pinheiro, Hernández, & Raposo, 2007) basado en las variables de North y Poschl, comprende la creación del conocimiento, memoria, su transferencia, conocimiento para las acciones, aplicación del mismo, capacidad de respuesta y capacidad de resolver problemas.

Por último, Guerra, Molinillo y Bermúdez hicieron una adaptación del modelo de inteligencia organizacional de Halal (Guerra, Molinillo, & Bermúdez, 2009), identificando las siguientes variables: tecnología y sistemas de información, estructura organizacional, activos del conocimiento, procesos estratégicos, cultura organizacional, relaciones de interesados y rendimiento.

2.1.3.2 Gestión del conocimiento

La gestión del conocimiento es la planeación, organización, motivación y control de personas, procesos y sistemas de una organización para asegurar que sus activos relacionados con el conocimiento se mejoran y se utilizan de una manera eficaz (Bray, 2007; King, 2009; Patil & Kant, 2014). En este siglo es denominada la era del conocimiento (King, 2009), y está ganando bastante popularidad en las herramientas de gestión para todo tipo de organizaciones (Delen,

Zaim, Kuzey, & Zaim, 2013). Un aspecto importante es lo que se denomina conocimiento, King (2009) define conocimiento como *creencia personal justificada*, y lo presenta en dos de sus taxonomías como tácito y explícito.

Existen varios modelos de gestión del conocimiento que se ha propuesto en la literatura que se pueden detallar en trabajos como (Bray, 2007; Dalkir, 2011; Haslinda & Sarinah, 2009; M. R. Lee & Chen, 2012; McAdam & McCreedy, 1999; Sensuse, Sucahyo, Rohajawati, & Anggia, 2014). Sin embargo, estos modelos se pueden agrupar en dos etapas de un modelo de inteligencia como lo son adquisición y representación de conocimiento, como lo plantea (Méndez Giraldo, 2014). Se inicia con la creación y con la adquisición de conocimiento, tanto al interior y exterior de la organización, luego este debe ser introducido en la memoria de la organización con el fin de lograr el mayor uso a largo plazo. El refinamiento consiste en seleccionar, filtrar, purificar y optimizar el conocimiento para que pueda ser almacenado. La transferencia incluye la comunicación enfocada de conocimiento de un emisor a un receptor. El proceso de compartir el conocimiento se basa en la difusión, finalmente, puede ser usado o aplicado a la innovación, al aprendizaje colectivo e individual, y a la resolución de problemas (King, 2009).

En general, se pueden sintetizar estas y otras propuestas en un modelo de gestión que tiene un conjunto de procesos o pasos en el cual se toma (adquisición) el conocimiento disponible, se procesa (transformación), se administra (gestión) y se utiliza (aplicación). Existen cuatro fuentes de aprendizaje rápido provocado por un proceso de internalización, estas son: 1) el trabajo en red (alianzas), 2) mediante la incorporación de personal capacitado, 3) mediante la imitación (seguimiento tecnológico) y 4) mediante la búsqueda (vigilancia tecnológica).

En (Patil & Kant, 2014) se identifica que en el campo de la gestión del conocimiento falta un aplicación de la modelación matemática y la integración con otras perspectivas que le permitan explotar el conocimiento almacenado para la toma de decisiones efectivas. De esta manera se evidencia como la gestión del conocimiento integrada con los modelos matemáticos y heurísticas permite dar una perspectiva alterna para la solución de problemas en organizaciones de servicios y en específico la programación de tareas.

2.1.3.3 Sistemas expertos

Un Sistema Experto (SE) es especializado en un campo específico y su objetivo es la solución de problemas mediante métodos de razonamiento que emulan el desempeño de un experto humano (Díez, Gómez, & Martínez, 2001; Adeli, 1988; Siler & Buckley, 2004; Tyler, 2007; Méndez-Giraldo et al., 2013). Los SE poseen características como amplio conocimiento específico del campo de interés, aplicación de técnicas de búsqueda a través de heurísticas, habilidad para inferir nuevos conocimientos a partir de la correlación de los conocimientos actuales y de las experiencias obtenidas durante su operación, capacidad para explicar su propio razonamiento y empleo de diversas técnicas de solución de problemas.

Un SE es un programa de computadora que razona y utiliza una base de conocimientos para resolver problemas complejos en un dominio particular (Krishnamoorthy & Rajeev, 1996; Kusiak, 1990). La Figura 2-8e presenta la arquitectura de un SE. Los componentes principales de un SE son una base de conocimiento y un motor de inferencia que consiste en uno o más mecanismo de inferencia. La base de conocimiento es un conjunto de conocimientos necesarios para resolver problemas y el motor de inferencia comprueba los hechos disponibles, selecciona la fuente de conocimiento apropiado para la base de conocimientos, coincide con los hechos con el conocimiento y genera hechos adicionales (Krishnamoorthy & Rajeev, 1996).

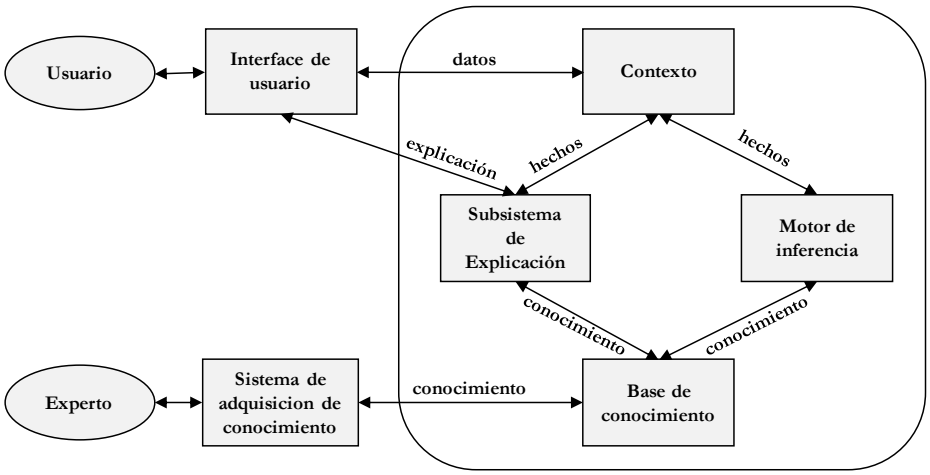


Figura 2-8 Arquitectura genérica de un SE.
Fuente: modificado de (Krishnamoorthy & Rajeev, 1996)

El SE opera de la siguiente manera (Krishnamoorthy & Rajeev, 1996): cuando inicia el proceso de inferencia, es necesario un contexto o memoria de trabajo que representa el conjunto de hechos establecidos. El sistema de explicación simula el proceso de un experto en respuestas a preguntas como: *¿Cómo* llega a una decisión? y *¿por qué* un dato nos necesita? Puesto que la base de conocimiento tiene que ser continuamente actualizada y/o ajustada dependiendo el crecimiento del conocimiento en el dominio, es necesaria una interfaz entre el experto y el SE. El sistema de adquisición de conocimiento ejecuta esta interfaz y no es un componente en línea, pueden implementarse de muchas maneras. Además, es necesario entre el usuario y el SE otra interfaz. La interfaz de usuario permite que este interactúe con el SE dando información, definiendo datos y supervisando el estado de la resolución de problemas.

Uno de los rasgos relevantes de los SE consiste en el proceso de buscar los conocimientos apropiados y a partir de éstos deducir nuevos conocimientos, por tanto, se necesita una capacidad de representación simbólica del conocimiento y de razonamiento. Por otro lado, un SE hace referencia a un dominio de conocimiento técnico y altamente especializado, por lo cual es imprescindible establecer el dominio de conocimiento de este. También un SE debe contar con una capacidad para proceder heurísticamente más que algorítmicamente en la búsqueda de soluciones y de esta manera poder brindar explicaciones de sus razonamientos, preguntas y conclusiones.

Los SE poseen un alto grado de efectividad en la resolución de problemas, debido a que pueden generar múltiples soluciones por contemplar varias hipótesis, además pueden incorporar reglas inciertas y manejo de incertidumbre. Adicionalmente, los SE emplean generalmente una interfaz de lenguaje natural, donde se permite la interacción con el humano o con el medio que controlan.

Los componentes de un SE son el componente humano, la base de conocimiento, el motor de inferencia, el subsistema de adquisición de conocimiento y el de aprendizaje, y la interfaz de usuario. El *Componente Humano* es normalmente el insumo para el desarrollo del SE, el cual se logra con la interacción de uno o varios expertos humanos especialistas en un determinado campo y los ingenieros del conocimiento quienes representan el mismo a un lenguaje capaz de ser entendido por el SE. En esta etapa se requiere mucha dedicación dada la diferencia de conocimientos y lenguajes entre especialistas e ingenieros.

La *Base de Conocimiento* es el lugar donde se almacena todo el conocimiento suministrado por los especialistas en una forma ordenada y estructurada bajo un conjunto de relaciones, tales como reglas o distribuciones de probabilidad, hechos y heurísticas que representan la forma de pensar del experto. La mayoría de lo SE utilizan reglas como la base de su operación, aunque también se pueden emplear esquemas de representación como redes semánticas, *frames*, entre otros. La base de conocimiento es independiente de los mecanismos de inferencia y los métodos de búsqueda. Es necesario diferenciar entre *datos* y *conocimiento*, puesto que el conocimiento se refiere al conjunto de relaciones que existen entre un conjunto de objetos y son de carácter permanente, mientras que los datos son hechos conocidos de una situación determinada y son variables, por lo que son destruidos después de usarlos.

El *Subsistema de Adquisición de Conocimiento* verifica el flujo del conocimiento que circula desde el experto humano a la base de datos del sistema. Mantiene un constante proceso de mantenimiento y actualización de la base de conocimiento.

El *Motor de Inferencia* lleva a cabo dos tareas principales (Harmon & King, 1988). En primer lugar, examina los hechos y reglas, y si es posible, añade nuevos hechos. En segundo lugar, decide el orden en que se hacen las inferencias. Es importante destacar que las conclusiones que obtiene el motor de inferencia se realizan con base en información de tipo determinista o estocástico y pueden ser simples o compuestas.

La *Interface de Usuario* es el enlace de comunicación entre el SE y el usuario. Debe incluir mecanismos para mostrar y adquirir información de forma fácil y entendible, ya que se considera un vínculo importante para solicitar información necesaria al usuario y presentar las conclusiones del proceso de inferencia.

El *Subsistema de Explicación* permite al usuario conocer el porqué de una conclusión presentada como verdadera e inclusive explicar el razonamiento seguido para llegar a esa conclusión.

El *Subsistema de Aprendizaje* es una de las principales características de un SE es su capacidad para aprender. Esto permite al programa analizar las razones de sus éxitos y fracasos para mejorar la base de conocimiento y ser más eficaz y efectivo en el futuro, como así también incluir nuevos conocimientos. Se distinguen dos tipos de conocimiento: el *estructural* que hace referencia a la estructura de representación del conocimiento (reglas, distribuciones probabilísticas); y el *paramétrico* que está relacionado con los parámetros necesarios para la construcción de la base de conocimiento.

Es escasa la utilización de SE en la literatura para programación de tareas, estos proveen medios flexibles para obtener soluciones a una variedad de problemas que muchas veces no pueden resolverse por métodos tradicionales. Los SE son una tendencia de la Inteligencia Artificial relacionada con el diseño e implementación de programas que son capaces de emular o ampliar las habilidades cognitivas humanas, tales como la solución de problemas, percepción visual y entendimiento del lenguaje. Estas características permiten que los SE sean una alternativa para resolver los problemas presentados en la programación de tareas (Metaxiotis et al., 2002; Méndez-Giraldo et al., 2013).

Méndez et al (2013) presenta un SE para la programación de producción en sistemas de manufactura. Los autores establecen las ventajas de la utilización de un SE en cuanto a la disponibilidad en todo momento en contraste con el humano, el SE tiene toda la experticia dentro, nunca se cansa o muere. Dependiendo del software y hardware usado, un SE puede responder más rápido en caso de que sea necesaria una respuesta inmediata o en tiempo real. Por otro lado, aún los mejores expertos pueden cometer errores o pueden olvidar un punto importante. Una vez un SE es programado para pedir y usar ciertas entradas, no está propenso a ser olvidadizo. Si una línea de razonamiento es aceptable, permanecerá así en diferentes consultas.

Otra ventaja es que puede ser añadido conocimiento individual en la base de conocimiento del SE. El cambio de algunas reglas no afecta a las demás. Debido a que toda la información debe ser codificada dentro de la estructura apropiada del esquema de representación del conocimiento, la información puede ser entendida fácilmente por otra persona.

También las personas en entrenamiento pueden usar el SE como un área de pruebas para ver qué pasa en situaciones típicas bajo la aplicación de las reglas y el razonamiento utilizado por el SE. Adicionalmente, los SE pueden ayudar a las organizaciones a preservar y a diseminar experticia por toda la organización, dan mayor consistencia a la toma de decisiones y mejoran la calidad de los productos, el SE puede explicar clara y detalladamente el razonamiento que conduce a una conclusión, lo que aumenta la confianza en que se tomó la decisión correcta.

Los SE también tienen desventajas como lo plantea (Méndez-Giraldo et al., 2013) en cuanto a que el alcance del problema tiene que ser definido de una manera suficientemente estrecha para hacer que la tarea de construcción de la base del conocimiento sea factible. Un problema fundamental es especificar qué se quiere decir cuando una regla dice por ejemplo "tal vez" ó "probablemente". Así mismo sucede en la definición de las combinaciones aritméticas entre ellas. El flujo de ejecución no es secuencial en un SE, de tal forma que es imposible leer de forma lineal un código y entender cómo opera el sistema. En otras palabras, el conocimiento algorítmico no es expresado naturalmente.

2.2 Revisión sobre toma de decisiones en la ciencia de los servicios

De acuerdo con los antecedentes presentados en sección 2.1.1.3, se presenta una revisión de los principales problemas de toma de decisiones en los sistemas de servicios en los niveles estratégico, táctico, y operativo[1].

La metodología de búsqueda en bases de datos científicas, en este caso Scopus, se realizó de acuerdo con la Figura 2-9. Primero se realiza una búsqueda inicial en el periodo de tiempo especificado. En este caso se empleará las palabras clave descritas. Luego se procede a una fase de búsqueda específica, en la cual se realizará un filtro de las referencias en las áreas de conocimiento relacionadas a los niveles estratégico, táctico y operativo. Luego se procede a realizar unos filtros que limitará a las áreas de conocimiento que son relevantes para el objeto de estudio y se limitara a Artículos, Artículos de conferencias, y Revisiones de Literatura como tipo de documento, en idioma inglés. Finalmente, se selecciona una muestra de 50 documentos de acuerdo con el mayor número de citaciones y su relevancia para el objeto de estudio con el fin de realizar la clasificación de la literatura. Adicionalmente, se seleccionaron 15 documentos de manera manual relacionados con el enfoque operativo de la toma de decisiones en los sistemas de servicios en temas de programación de tareas.

2.2.1 Resultados iniciales

Para esta muestra se toma una clasificación realizada en cuanto al alcance de la decisión de cada uno los documentos en cuanto al ambiente estratégico, táctico y operativo, y no la clasificación de Scopus. La Figura 2-10 muestra los resultados del número de documentos por año para la muestra de 65 artículos. En este caso se observa un mayor número de documentos en el aspecto estratégico, seguido por el táctico y por el operativo. Sin embargo, en los últimos dos años se observa un incremento en el nivel operativo.

[1] Esta sección se basa el trabajo sin publicar titulado "*Estado de Arte: Tendencias en la toma de decisiones en la ingeniería de servicios*". Este trabajo fue realizado en colaboración con la Fundación Universitaria Agustiniana-Uniagustiniana- Bogotá, Colombia, quien financio la investigación desarrollada.

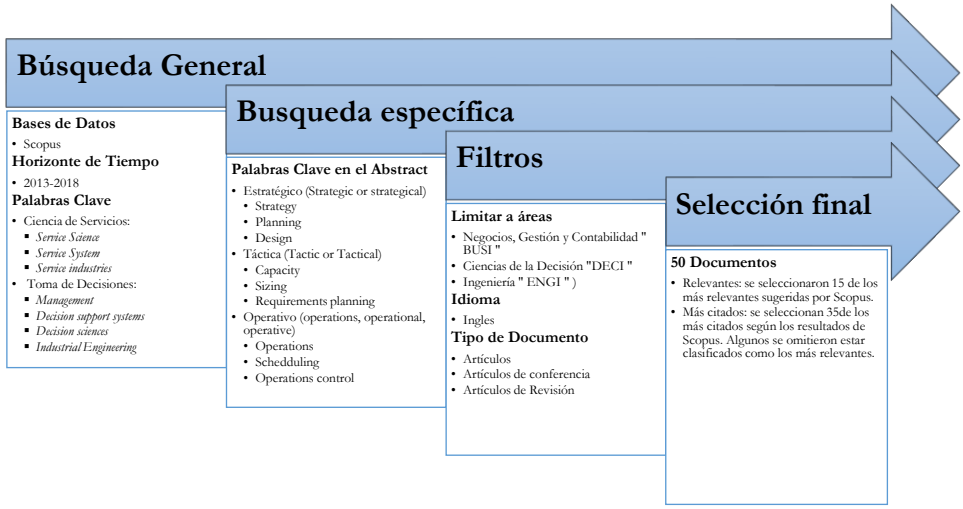


Figura 2-9 Metodología de búsqueda de literatura de problemas de toma de decisiones en ciencia de los servicios.
Fuente: Elaboración propia.

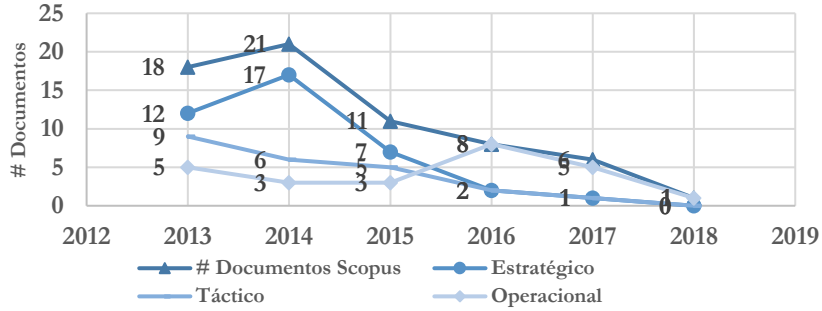


Figura 2-10. Número de documentos por año y clasificación de alcance de la decisión para la revisión de literatura.
Fuente: Datos de Scopus.

La Figura 2-11 muestra la comparación de los documentos clasificados respecto al nivel estratégico, táctico y operativo y sus intersecciones respectivas para la muestra inicial y la muestra final. Para la última muestra, en cuanto al alcance de la decisión, se observa un cambio en cuanto a la distribución de los documentos, incrementándose en los aspectos tácticos de la toma de decisiones y disminuyendo los estratégicos y operativos. Adicionalmente, l tendencia en las intersecciones de los niveles de toma de decisiones no cambia.

En la Tabla 2-6 se presenta el listado de las fuentes de revistas con por lo menos dos artículos presentes en la muestra final. En el Anexo C se presentan el listado completo de estas fuentes para ser consultadas. Las fuentes consultadas están relacionadas principalmente con Investigación de Operaciones, Ciencias de la decisión, Administración y Gestión. En la Tabla 2-6, se puede observar que *European Journal of Operational Research* se presentan 5 artículos, con la mayor frecuencia y de estos 3 son clasificados en el ámbito estratégico y táctico, y uno en el operativo. En total 19 son clasificados en el ambiente estratégico, 11 en el táctico, y 15 en el operativo, conservando la misma tendencia encontrada.



Figura 2-11. Comparación de las áreas de clasificación muestra inicial vs muestra final .
Fuente: Datos de Scopus.

Tabla 2-6 Listado de fuentes de revistas clasificadas según documentos y citas

Fuente	# documentos	Estratégico	Táctico	Operativo	Suma de Citas
European Journal of Operational Research	5	3	3	1	81
International Journal of Production Economics	3	1	2	1	45
Annals of Operations Research	3		1	3	16
Computers and Industrial Engineering	3	1		3	46
Journal of Cleaner Production	3	3			283
International Journal of Operations and Production Management	3	2	1	1	146
Decision Support Systems	2	2	1		204
Managing Service Quality	2	2			105
Lecture Notes in Business Information Processing	2	2	1	1	4
Computers & Operations Research	2			2	26
Operations Research for Health Care	2		1	2	44
International Journal of Production Research	2	2			42
IFIP Advances in Information and Communication Technology	2	1	1	1	16
Total	**34**	**19**	**11**	**15**	**1058**

Fuente: Datos de Scopus.

Respecto al número de citaciones, la de mayor citación es *Journal of Cleaner Production* con 283, las cuales pertenecen a (Tukker, 2015) con 175 la cual presenta una revisión de literatura concerniente a la investigación en el campo de PSS (*product service systems*) encontrando que se ha vuelto más prolífica, también se ha integrado en una gama más amplia de campos de la ciencia como fabricación, TIC, gestión empresarial y diseño; (Ceschin, 2013) con 82 la cual también presenta una revisión de PSS y su relación con la gestión estratégica; y (Joore & Brezet, 2015) con 26, donde se estudian métodos de diseño en PSS. La de segunda mayor citación es *Decision Support Systems* con 204 citaciones en total, las cuales corresponden a (H Demirkan & Delen, 2013) con 191 citaciones, siendo la de mayor citación, que presenta una revisión de requisitos para los DSS (*decisión support systems*, o sistemas de soporte a la decisión) orientados a servicios; y (Dong & Srinivasan, 2013) con 13, en el que establece un estructura basada en agentes para el desarrollo de un marco que reconozca explícitamente la necesidad de un diseño basado en la prestación del servicio y poder contribuir al desarrollo de DSS. Después esta la revista *International Journal of Operations and Production Management* con 146 citaciones en total, donde se presenta una revisión de contribuciones de conocimiento sobre la sovietización (Lightfoot, Baines, & Smart, 2013; Smith, Maull, & Ng, 2014) y presenta las

tendencias a nivel estratégico, mientras que en (Reim, Parida, & Sjödin, 2016) presenta un marco de toma de decisiones de administración de riesgos en ciencia de servicios a nivel táctico y operativo. Seguido en el número de citaciones, en cuarto lugar, esta *Managing Service Quality* con 105 citaciones, y, en quinto lugar, esta *European Journal of Operational Research* con 81 citaciones.

2.2.2 Clasificación problemas a nivel estratégico

En la Tabla 2-7 se presentan las 39 referencias clasificadas respecto al nivel estratégico junto con su número de citaciones y su tipo de contribución. De los 39 documentos, 12 están clasificados también en el nivel táctico, y 3 en el operativo. Solo 2 referencias, presentan las tres clasificaciones de forma simultánea. Por otro lado, de los 39 documentos 10 son de aplicación, 15 de revisión y 14 teóricos.

Tabla 2-7 Información de literatura clasificada a nivel estratégico

No.*	Información Adicional		Alcance de la decisión		
	No. de Citaciones	Tipo de Contribución	Estratégico	Táctico	Operativo
1	191	Revisión	1	1	
2	175	Revisión	1		
3	82	Revisión	1		
4	79	Revisión	1		
5	66	Revisión	1		
6	53	Teórico	1		
7	50	Revisión	1	1	
8	39	Teórico	1		
10	29	Teórico	1		
11	28	Teórico	1		
12	26	Teórico	1		
13	25	Aplicación	1		
14	24	Teórico	1	1	
15	22	Aplicación	1	1	
16	22	Teórico	1	1	
17	21	Teórico	1		
20	17	Revisión	1		
21	16	Teórico	1		
24	14	Aplicación	1		
25	14	Aplicación	1	1	
26	14	Teórico	1		
28	13	Revisión	1		
29	13	Revisión	1		
30	13	Revisión	1	1	
31	13	Aplicación	1		
33	12	Teórico	1		
34	12	Teórico	1	1	
35	12	Revisión	1		
36	11	Aplicación	1		
37	11	Aplicación	1		
39	7	Aplicación	1	1	
40	4	Teórico	1		
41	3	Revisión	1		1
44	0	Aplicación	1	1	
46	0	Teórico	1	1	1
48	0	Revisión	1		
49	0	Revisión	1		
50	0	Aplicación	1		
53	4	Revisión	1	1	1
Total			**39**	**12**	**3**

* corresponde a la referencia de Anexo B.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2-8 se presenta la clasificación de la literatura respecto a las tres áreas de aplicación ya definidas y el tipo de técnica empleada. En la Figura 2-12 se observa que la distribución de los documentos y sus diferentes intersecciones en cuanto al área y al enfoque del tipo de técnica. La mayoría está en el aspecto de estrategia (22 de los 39), seguido de diseño (17) y por último en planeación (10). En cuanto a sus intersecciones, 2 de los documentos presentan las tres áreas, 4 en la de planeación-diseño y planeación-estrategia y 6 para la estrategia-diseño. En cuanto al tipo de técnica, 30 son cualitativos y 17 cuantitativos, predominando los cualitativos y 8 de ambos enfoques.

Tabla 2-8 Clasificación de la literatura respecto a las áreas de aplicación y tipos de técnicas de solución a nivel estratégico

N.*	Área**			Técnica de Solución		
	Pla	Dis	Est	Cualitativos	Cuantitativos	Observación
1	1	1	1	1		Listado de Factores
2		1	1	1		Listado de Factores
3		1	1	1		Listado de Factores
4			1	1		Listado de Factores
5			1	1		Listado de Factores
6		1	1	1		Listado de Factores
7			1		1	Técnicas de Calidad
8		1		1		Listado de Factores
10		1		1	1	Valor presente neto, Ciclo de Vida.
11		1		1		Listado de Factores
12		1	1		1	Simulación
13		1		1	1	AHP, Fuzzy, Programación Lineal, QFD
14			1	1		Listado de Factores y procesos
15	1		1		1	Balanced Scorecard.
16			1	1		Listado de Factores
17		1		1		Listado de Factores
20			1	1	1	Estadística
21			1	1		Listado de Factores
24			1	1		Listado de Factores
25	1				1	Programación Lineal Entera
26			1	1		Listado de Factores
28		1		1	1	Indicadores KPI
29		1		1		Diseño concurrente y colaborativo
30			1	1		Listado de Factores, Tecnologías de la Información.
31		1		1		Diseño Concurrente
33		1		1		Metodología de Diseño
34	1	1		1		Redes de valor (VNA) y modelado de procesos de negócio orientado a 44atérias (S-BPM).
35			1	1		Listado de Factores
36			1		1	Six sigma
37			1	1		Listado de Factores, TICs.
39	1		1		1	Simulación, Dinámica de Sistemas
40			1	1		Listado de Factores
41					1	Investigación de Operaciones
44				1	1	MICMAC—Matrice des impacts croisés – Multiplication appliquée à une classification
46	1	1	1	1	1	Listado de técnicas de un currículo de SSME
48	1				1	ERP
49	1			1	1	Técnicas de Ingeniería Industrial
50	1			1	1	Técnicas de Ingeniería Industrial
53	1	1			1	Modelos de Planeación
Total	**10**	**17**	**22**	**30**	**17**	

* corresponde a la referencia de Anexo B.

** Pla= Planeación, Dis=Diseño, Est=Estrategia.

Fuente: Elaboración propia.

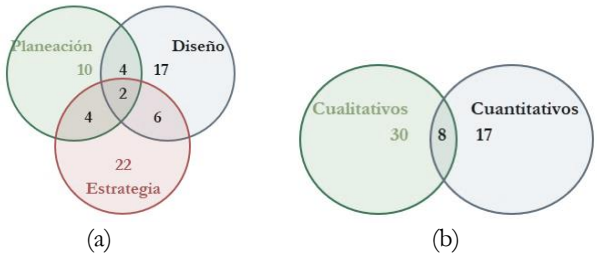


Figura 2-12 Distribución de los documentos a nivel estratégico según el área (a) y al tipo de técnica (b).
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2-13 se observa para cada área el tipo de técnica y su intersección. Se observa que en la planeación predomina el enfoque cuantitativo, mientras que en el diseño y la estrategia predomina el enfoque cualitativo, y para las intersecciones se encuentra un número bajo en todos los casos. Este resultado permite identificar una línea de investigación en cuanto a fortalecer la integración de enfoques cualitativos y cuantitativos en las áreas de diseño, y estrategia, en particular desarrollando aplicaciones que involucren métodos cuantitativos en la SSME.

2.2.3 Clasificación problemas a nivel táctico

En la Tabla 2-9 se presentan las 23 referencias clasificadas respecto al nivel táctico junto con su número de citaciones y su tipo de contribución. De los 23 documentos clasificados en este nivel, 12 están clasificados también en el aspecto táctico, y 9 en el operativo. A diferencia del enfoque estratégico, este nivel tiene más relación con los demás niveles, principalmente por la importancia de sus decisiones en el largo y mediano plazo. Solo 2 referencias, presentan las tres clasificaciones de forma simultánea. Por otro lado, de los 23 documentos 9 son de aplicación, 6 de revisión y 8 establecen aspectos teóricos.

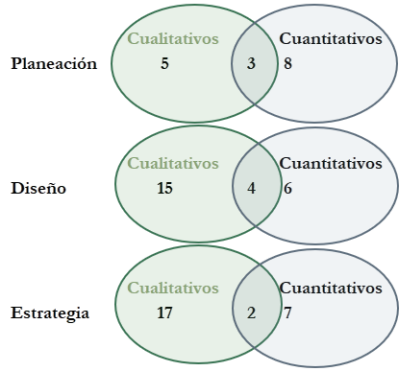


Figura 2-13 Distribución del tipo de técnica para cada área del nivel estratégico.
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2-10 se presenta la clasificación de los documentos respecto a las áreas de aplicación definidas y los tipos de técnicas en el nivel táctico de la toma de decisiones. En la Figura 2-14 se observa que la distribución de los documentos en la clasificación del tipo de área y del tipo de técnica empleada, así como sus diferentes intersecciones. La planeación de capacidades y el dimensionamiento presenta la misma proporción de 16 documentos cada uno, y su intersección es de 9 documentos. En cuanto al tipo de técnica, 4 son de optimización, 4 de heurísticas, 6 de económico y 16 de otras. Este resultado muestra, que en

los servicios se emplea técnicas diferentes a las tradicionales de optimización y heurísticas tradicionales en los sistemas de manufactura.

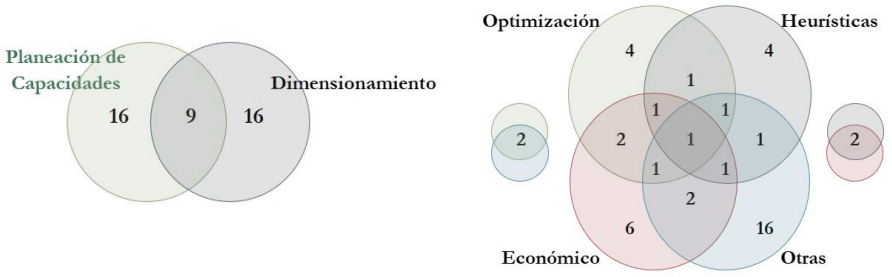
Tabla 2-9 Información de referencias a nivel táctico

	Información Adicional		Alcance de la decisión		
No*	**No. de Citaciones**	**Tipo de Contribución**	**Estratégico**	**Táctico**	**Operativo**
1	191	Revisión	1	1	
7	50	Revisión	1	1	
9	29	Teórico		1	1
14	24	Teórico	1	1	
15	22	Aplicación	1	1	
16	22	Teórico	1	1	
18	20	Teórico		1	
19	19	Teórico		1	
22	15	Aplicación		1	
23	14	Teórico		1	1
25	14	Aplicación	1	1	
27	14	Aplicación		1	
30	13	Revisión	1	1	
32	13	Aplicación		1	1
34	12	Teórico	1	1	
39	7	Aplicación	1	1	
42	3	Aplicación		1	1
43	1	Revisión		1	1
44	0	Aplicación	1	1	
46	0	Teórico	1	1	1
47	0	Aplicación		1	1
53	4	Revisión	1	1	1
61	42	Revisión		1	1
Total			**12**	**23**	**9**

* corresponde a la referencia de Anexo B.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2-10, se presenta el detalle de las técnicas clasificadas como otras, las cuales son análisis cualitativo, técnicas de calidad, teoría de juegos, simulación, entre otras. En cuanto a las intersecciones se observa que todas las posibilidades tienen al menos un documento, indicando la tendencia a la integración de diferentes enfoques para la toma de decisiones. Las de mayor valor (2) son las intersecciones de: optimización-otras, optimización-económico, económico-otras, y económico-heurísticas. De esta manera, se evidencia la importancia del factor económico en las decisiones tácticas y su integración con los demás tipos de técnicas.



(a) (b)

Figura 2-14 Distribución de los documentos del nivel táctico según área (a) y al tipo de técnica.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2-10 Clasificación de la literatura respecto a las áreas de aplicación y tipos de técnicas de solución a nivel táctico

No.*	Área**		Tipo de Técnica***				
	Pla.Cap.	Dim.	Opt.	Heu.	Eco.	Otras	Nota
1	1	1				1	Análisis Cualitativo
7		1				1	Técnicas de Calidad
9	1	1			1		Análisis de Riesgo
14	1					1	Listado de Factores
15	1				1		Balanced Scorecard.
16		1				1	Listado de Factores
18	1	1	1		1		Modelo de costos basado en actividades y programación entera
19	1	1				1	Basado en expertos e incertidumbre. Fuzzy Delphi, Fuzzy Analytical Hierarchy Process (fuzzy AHP)
22	1					1	Teoría de juegos
23	1				1	1	Análisis de Riesgos
25	1	1	1				Programación Lineal Entera
27		1		1	1		Renew Management
30	1					1	Listado de Factores, Tecnologías de la Información.
32		1		1			Modelo Empírico, basado en Reglas
34		1				1	Redes de valor (VNA) y modelado de procesos de negócio orientado a materias (S-BPM).
39	1					1	Simulación, Dinámica de Sistemas
42		1				1	Simulación
43	1	1				1	Teorías de colas, cadenas de markov, procesos estocásticos, programación dinámica.
44	1			1			MICMAC- Matrice des impacts croisés – Multiplication appliquée à une
46	1	1	1	1	1	1	Gestión de operaciones
47		1				1	Métodos y tiempos
53	1	1	1			1	Modelos de localización, y de planeación de capacidades
61	1	1				1	Simulación, Teoría de Colas
Total	**16**	**16**	**4**	**4**	**6**	**16**	

* corresponde a la referencia de Anexo B.
** Pla= Planeación de Capacidades, Dim=Dimensionamiento
*** Opt.=Optimización, Heu=Heurísticas, Eco=Económico.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.4 Clasificación problemas a nivel operativo

En la Tabla 2-11 se presentan las 25 referencias clasificadas respecto al nivel operativo de la toma de decisiones junto con su número de citaciones y su tipo de contribución. De los 25 documentos clasificados en este nivel, 3 están clasificados también en el aspecto estratégico, y 9 en el táctico. A diferencia del enfoque estratégico y táctico, este nivel tiene más relación con el nivel adyacente que es el táctico, principalmente por la importancia de sus decisiones en mediano plazo que lo pueden afectar en cuanto a la capacidad. Solo 2 referencias, presentan las tres clasificaciones de forma simultánea. De los 25 documentos, 8 son de aplicación, 14 de revisión y 3 relacionados con aspectos teóricos.

En la Tabla 2-12 se presenta la clasificación de los documentos respecto los problemas definidos y los tipos de técnicas de solución en el nivel operativo de la toma de decisiones.

En la Figura 2-15 se observa la distribución de los documentos respecto al tipo de problema y del tipo de técnica empleada, así como sus diferentes intersecciones. El problema con mayor frecuencia es programación con 16, seguido de personal con 14, ruteo con 13, y, por último, control con 6. En cuanto a las intersecciones, se observa que la de mayor frecuencia es programación-personal con 9, seguida de ruteo-personal con 8, y programación-ruteo con 7. Estas intersecciones, representan la importancia del factor humano en los programas de

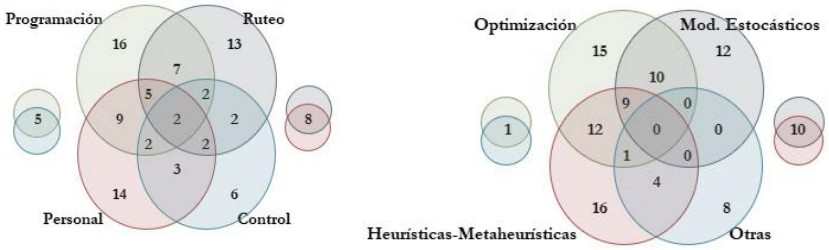
decisión a nivel operativo en los sistemas de servicios, donde el uso de personas para la prestación de servicios es una característica permanente y por tanto las decisiones de programación y ruteo tiene relación con este aspecto, lo cual evidencia la siguiente intersección con 5 documentos de programación-ruteo-personal. Otra intersección con 5 documentos es programación-control, la cual muestra la importancia en el seguimiento de las decisiones en línea, junto con la de personal-control. Las demás intersecciones presentan una frecuencia de 2 documentos, sin embargo, es importante resaltar que están presentes en todas las posibilidades, indicando una relevancia importante en los problemas de toma de decisiones en los sistemas de servicios de considerar varios aspectos de forma integral.

Tabla 2-11 Información de referencias a nivel operativo

	Información Adicional		Alcance de la decisión		
No. *	**No. de Citaciones**	**Tipo de Contribución**	**Estratégico**	**Táctico**	**Operativo**
9	29	Teórico		1	1
23	14	Teórico		1	1
32	13	Aplicación		1	1
38	8	Revisión			1
41	3	Revisión	1		1
42	3	Aplicación		1	1
43	1	Revisión		1	1
45	0	Aplicación			1
46	0	Teórico	1	1	1
47	0	Aplicación		1	1
51	11	Revisión			1
52	4	Revisión			1
53	4	Revisión	1	1	1
54	24	Revisión			1
55	16	Revisión			1
56	39	Revisión			1
57	1	Revisión			1
58	4	Revisión			1
59	2	Revisión			1
60	0	Revisión			1
61	42	Revisión		1	1
62	18	Aplicación			1
63	2	Aplicación			1
64	10	Aplicación			1
65	0	Aplicación			1
Total			**3**	**9**	**25**

* corresponde a la referencia de Anexo B

Fuente: Elaboración propia.



(a) (b)

Figura 2-15 Distribución de los documentos en cuanto al problema (a) y al tipo de técnica (b) del nivel operativo.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las técnicas de solución empleadas en el ambiente operativo, se observa en la Figura 2-15 (b) la clasificación de los documentos. La de mayor frecuencia es heurísticas y

metaheurísticas con 16 documentos, seguida de Optimización con 15, luego esta Modelos Estocásticos con 12 y por último Otras con 8. En cuanto a las intersecciones, se observa que la de mayor frecuencia es Optimización-Heurísticas-Metaheurísticas con 12, seguida de Optimización-Modelos Estocásticos y Modelos Estocásticos-Heurísticas-Metaheurísticas, cada una con 10. Luego, se encuentra Optimización-Modelos Estocásticos-Heurísticas-Metaheurísticas con 9 documentos, seguida de Heurísticas-Metaheurísticas-Otras con 4, y por último esta Optimización-Otras y Optimización-Heurísticas-Metaheurísticas-Otras con 1 documento. Para las demás intersecciones no se encuentran coincidencias para la revisión realizada.

Tabla 2-12 Clasificación de la literatura respecto a las áreas de aplicación y tipos de técnicas de solución a nivel operativo

No. *	Área**				Técnica***				
	Pro	Rut	Per	Con	Opt	Mod. Est.	Heu-Met	Otras	Nota
9			1	1				1	Análisis de Riesgos
23	1			1				1	Análisis de Riesgos
32		1					1	1	Modelo Empírico, Reglas
38	1	1	1		1	1	1		Revisión de técnicas de scheduling en servicios.
41		1							Investigación de Operaciones
42	1						1	1	Simulación
43	1	1	1	1		1			Teorías de colas, cadenas de markov, procesos estocásticos, programación dinámica.
45	1	1	1	1	1	1	1		Investigación de Operaciones
46	1		1		1	1	1		Gestión de operaciones
47	1		1					1	Métodos y tiempos
51	1	1	1		1				Programación Lineal Entera
52	1		1		1				Programación Lineal Entera.
53		1	1		1		1		Programación Lineal Entera, Heurísticas.
54			1		1	1	1		Teoría de Colas, Metaheurísticas, PL.
55		1	1		1	1	1		Métodos de solución para el HHC.
56		1			1	1	1		Métodos de solución para el VRP.
57					1	1	1		Métodos de solución para el VRP dinámico.
58	1	1			1	1	1		Métodos de solución para el ruteo y programación.
59		1	1		1		1		Métodos de solución para el HHC.
60	1	1			1	1	1		Métodos de solución para el ruteo y programación.
61	1		1			1	1		Simulación, Teoría de Colas.
62	1						1	1	Sistemas multi agente, PSO, ACO.
63	1			1				1	Agentes Inteligentes
64	1			1	1	1			Teoría de Colas, Programación dinámica.
65	1	1	1		1		1	1	Sistemas Expertos, Programación lineal, heurísticas de clustering, ACO.
Total	**16**	**13**	**14**	**6**	**15**	**12**	**16**	**8**	

* corresponde a la referencia de Anexo B

** Pro=Programación, Rut=Ruteo, Per=Personal, Con=Control.

*** Opt=Optimización, Mod. Est.=Modelos Estocásticos, Heu-Met=Heurísticas-Metaheurísticas.

Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados permiten extraer, aunque la optimización es el método clásico para resolver este tipo de problemas que generalmente son de orden combinatorio, debido a la complejidad de los mismos, es necesario la utilización en muchos casos de técnicas aproximadas como las clasificadas en Heurísticas-Metaheurísticas, adicionalmente, en los sistemas de servicios es necesario incluir aspectos como la incertidumbre que hace necesario la utilización conjunta

de métodos que involucren aleatoriedad como los modelos estocásticos, por eso estas intersecciones son las de mayor frecuencia.

Por otro lado, en la revisión realizada no se encontraron métodos que integraran todas las categorías planteadas, o aquellas que incluyeran las metodologías categorizadas como otras, lo cual permite establecer la necesidad de explorar estos métodos con el fin de determinar si pueden ofrecer métodos alternativos de solución o mejorar los resultados en cuanto a calidad y rapidez

Ahora, para cada tipo de problema se observa la clasificación de las técnicas de solución en la Figura 2-16. Para los problemas de programación, ruteo y personal, las técnicas con mayor frecuencia de empleo son heurísticas-metaheurísticas, Optimización y Modelos Estocásticos, junto con sus principales intersecciones, mientras que, para el problema de control, las más utilizadas son las clasificadas como Otras. Este resultado sugiere, que el problema de control se ha manejado de forma independiente a los otros tipos de problemas, y al tener como principal característica la necesidad de control on-line, se aborda con metodologías no tan tradicionales.

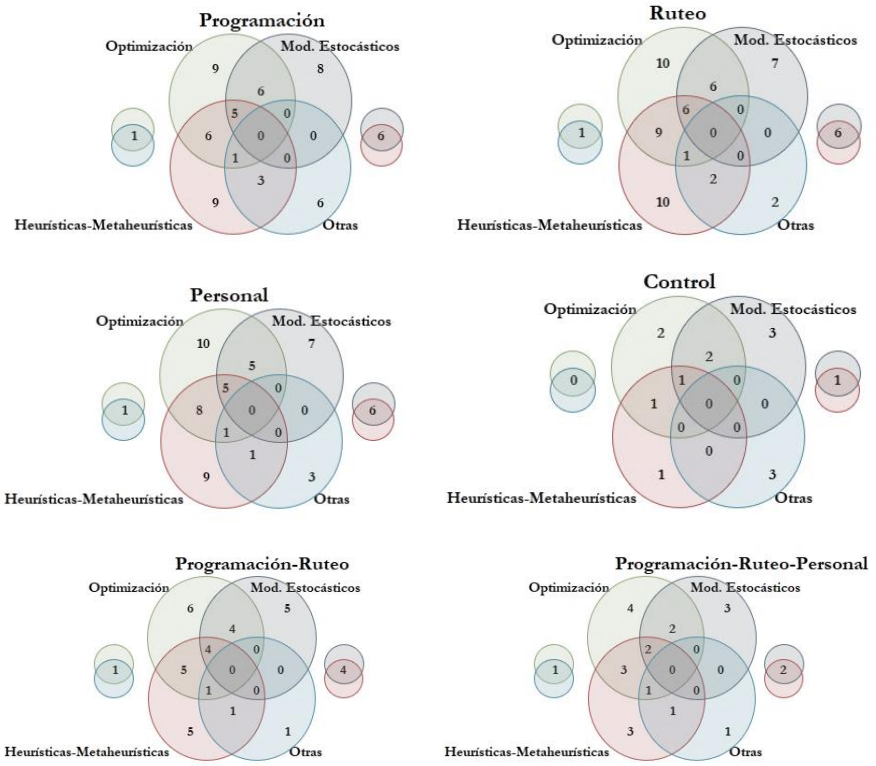


Figura 2-16 Clasificación de los documentos en cuanto al tipo de técnica por tipo de problema del enfoque operativo.
Fuente: Elaboración propia.

2.3 Definición de sistema de servicio y notación propuesta

En esta sección se divide en tres partes. La primera presenta la definición propuesta para sistema de servicio y sus componentes. La segunda sección describe la notación propuesta para el problema de Programación de Tareas en Sistemas de Servicios (PTSS). La última

presenta una caracterización de la notación sobre una base de artículos científicos relacionados con el problema de PTSS.

2.3.1 Definición para sistema de servicio

De acuerdo con las definiciones presentadas en la Tabla 2-1 para sistema de servicios desde diferentes enfoques y dada las características del problema de programación de tareas, se propone la siguiente definición de sistema de servicio desde el punto de vista de las ciencias de la decisión para abordar los diferentes problemas de toma de decisiones y en especial el de PTSS. La definición se enuncia como:

Un sistema de servicio es una configuración dinámica entre cliente y recurso que permite mediante un control de flujo la interacción entre ellos con el fin de agregar valor a un resultado tomando un conjunto de entradas, procesos y estructuras desarrollando una actividad organizada mediante la coproducción entre cliente y recurso.

Adicionalmente, se definen los siguientes términos:

Cliente: es un recurso que actúa como solicitante de un resultado o una necesidad a satisfacer.

Recurso: es quien suple el requerimiento o necesidad del cliente.

Control de Flujo: es el conjunto de procesos que permiten la interacción entre cliente y recursos.

Actividad: es el proceso mediante el cual el proveedor satisface el requerimiento o la necesidad del cliente

Resultado: es la salida de la actividad.

Esta definición es representada en la Figura 2-17 para la lógica de los productos (bienes) y los servicios planteada por (Vargo & Lusch, 2008a). En esta se puede observar las diferencias entre los sistemas de manufactura y los de servicio, y con los campos Cliente, Recurso y Control de Flujo establecer la notación presentada a continuación. En los sistemas de manufactura puros, los sistemas de producción y consumo están separados, mientras que, en el sistema de servicio puro, tanto los sistemas de producción como los de consumo están relacionados por las interacciones y la coproducción. Esto es representado como control de flujo.

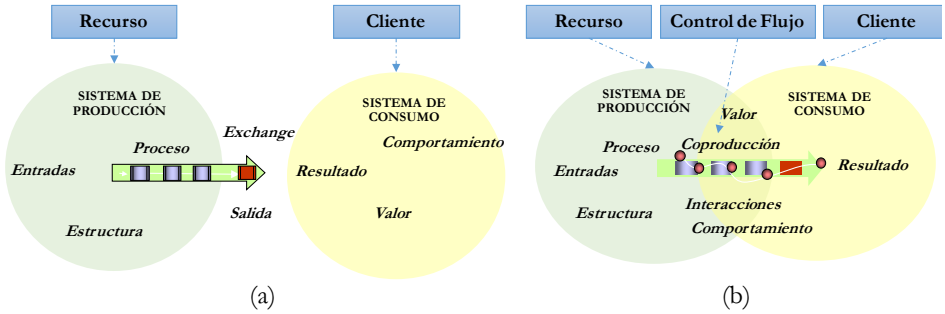


Figura 2-17 Representación de definición de sistema de servicios a) vista de la lógica de productos, b) vista de la lógica de servicios
Fuente: Elaboración propia, adaptada de (Vargo & Lusch, 2008a).

2.3.2 Notación para programación de tareas en sistemas de servicios

Se propone una notación de cuatro campos $C|R|F|\gamma$, donde C es el Cliente, R es el Recurso, F es el Control de Flujo y γ es la Medida de desempeño.

El campo Cliente tiene dos componentes: Trabajos y Proceso de arribo. Las salidas asociadas a cada parámetro son definidos en la Figura 2-18.

Trabajos corresponde a la necesidad que tiene el cliente por satisfacer y sus parámetros asociados son: el número de trabajos, el número de tareas, la expectativa del cliente, el tipo de necesidad, durabilidad, demanda, población, múltiples periodos, requerimientos, ventanas de tiempo, agrupación y distribución geográfica. El componente proceso de arribo hace referencia a la manera como llegan los trabajos de los clientes al sistema de servicio y sus parámetros asociados son: tiempo de liberación, tiempo de entrega, naturaleza, tiempo de llegada, tamaño de lote, lugar de arribo, precedencia y disciplina.

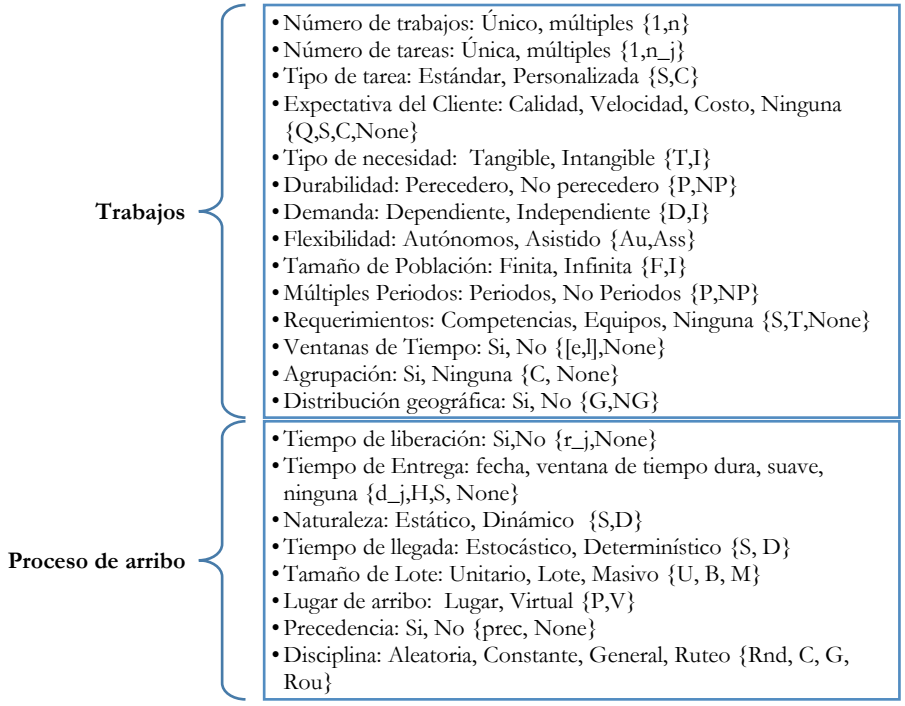


Figura 2-18 Parámetros del campo Cliente (*C*) de la notación
Fuente: Elaboración propia.

El campo Recurso tiene tres componentes: Fila-Cola, Servidores y Atención-Salida. Estos tres componentes caracterizan al recurso como un proveedor del servicio. Las salidas de los parámetros de cada componente son descritas en la Figura 2-19 son sus siglas respectivas.

El componente Fila-Cola representa la manera como los trabajos deben organizarse para esperar a ser atendidos en el sistema o ser satisfecha su necesidad. Los parámetros asociados a este componente son: capacidad de la fila, su disciplina, si puede tener incumplimiento y abandono, y si se realiza algún procesamiento en la fila.

Los servidores se refieren al recurso que presta el servicio y son los que definen la forma de atención. Sus parámetros asociados son: número y tipo de servidores, si permite algún tipo de agrupación, la capacidad del sistema, naturaleza de los tiempos de procesamiento, las competencias, el tipo de recursos, la disponibilidad, si existen paradas, la tecnología, las estrategias de ampliación de capacidad, el lugar de prestación, y el lugar de origen.

El siguiente componente corresponde al proceso de atención-salida en el cual se caracteriza cuando el cliente deja el recurso. Sus parámetros asociados son la calidad del servicio, el lugar-destino y la disciplina de salida.

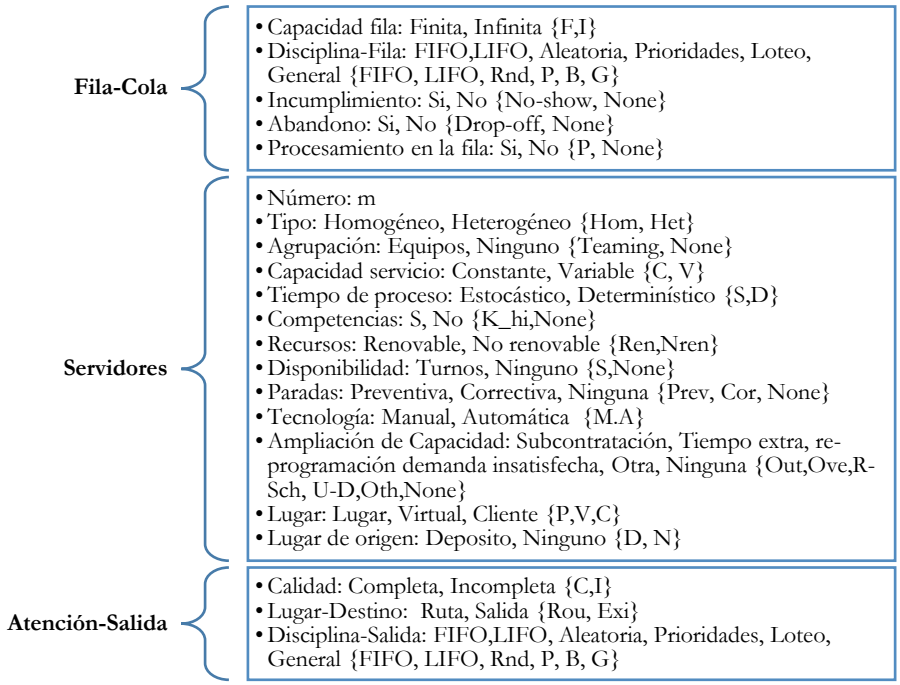


Figura 2-19 Parámetros del campo Recursos (*R*) de la notación
Fuente: Elaboración propia.

Para el campo de Control de flujo se tiene tres componentes: Propiedad, Atención y Movimiento. Estos componentes poseen características de la interacción entre Cliente y Proveedor. Las salidas de los parámetros de cada componente son descritas en la Figura 2-20 son sus siglas respectivas.

La Propiedad se refiere a la característica de usabilidad del resultado del sistema de servicio. Sus parámetros son: el acceso, el tiempo de acceso, la cantidad de accesos y la posibilidad de rechazo.

El componente de Atención representa la manera como se presta el servicio. Sus parámetros asociados son: la simultaneidad entre cliente y recurso, si es agendado, la disciplina de atención, si es en lotes, la personalización, si es posible la elegibilidad de servidores, y el consumo de recursos.

El componente de Movimiento caracteriza la manera en que fluye el cliente en el sistema de servicio. Sus parámetros asociados son: la ruta de procesamiento, la posibilidad de recirculación, si es de tipo no espera, la interrupción de actividades, si es posible almacenar inventario, la agrupación de tareas, la sincronización de tares y de recursos.

El campo de medida de desempeño tiene dos componentes: número de criterios y los criterios. Estos campos representan la naturaleza de la función objetivo para el problema de programación de tareas. Las salidas de los parámetros asociados están descritas en la Figura 2-21. El componente de número de criterios representa si se tiene un único criterio o múltiples. El Componente criterios tiene cuatro parámetros asociados respecto a si el objetivo

es de un problema relacionado con ruteo o programación, o si está asociada a los clientes o a los recursos.

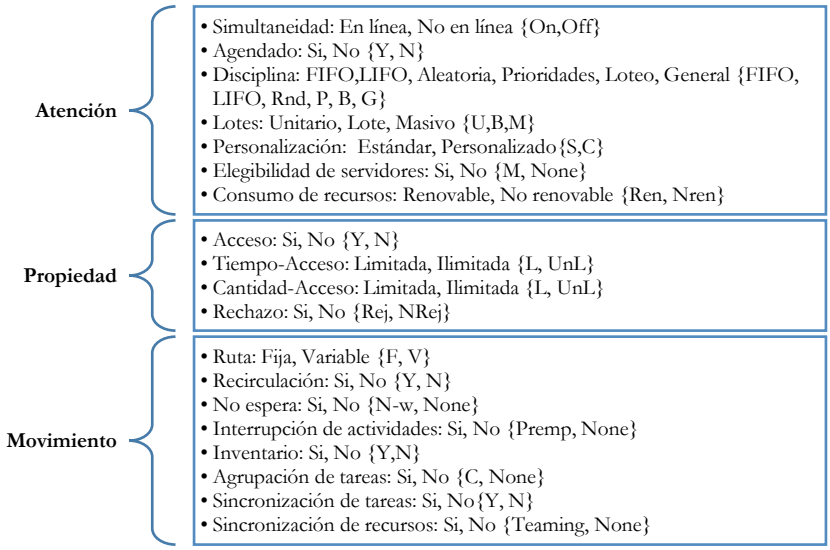


Figura 2-20 Parámetros del campo Control de Flujo (*F*) de la notación
Fuente: Elaboración propia.

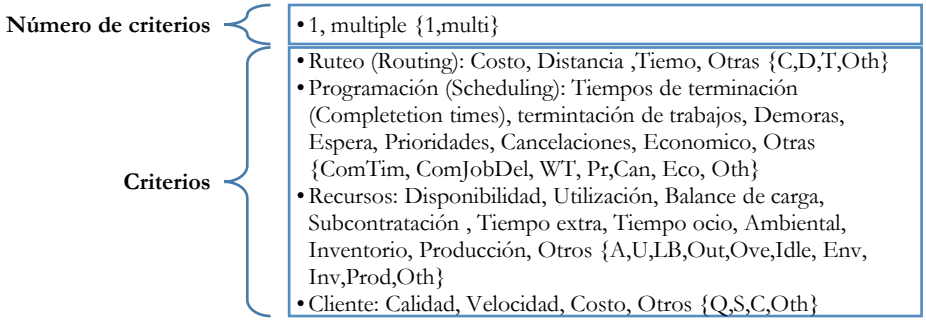


Figura 2-21 Parámetros del campo Medida de desempeño (*γ*) de la notación
Fuente: Elaboración propia.

2.3.3 Caracterización de literatura sobre la notación propuesta

Para el problema específico de PTSS se construye una revisión[2] de literatura científica con el fin de realizar una caracterización de los tipos de problemas y sus técnicas de solución de acuerdo con la notación definida en la sección anterior. La metodología se presenta en la Figura 2-22, sobre un conjunto de bases de datos especializadas en área de ingeniería y en las palabras clave descritas**.** Se buscó literatura del tema en los últimos cinco años, desde el 2013 hasta el 2017, aunque también se incluyeron 17 documentos de los 498 revisados previos a este año dada su relevancia. Esta información se sistematizo en el Anexo I.

[2] Esta caracterización fue realizada en colaboración con los estudiantes de Ingeniería Industrial Jhonnatan Martínez y Daniel Chavarria de la Universidad Distrital quienes realizaron el registro de los documentos.

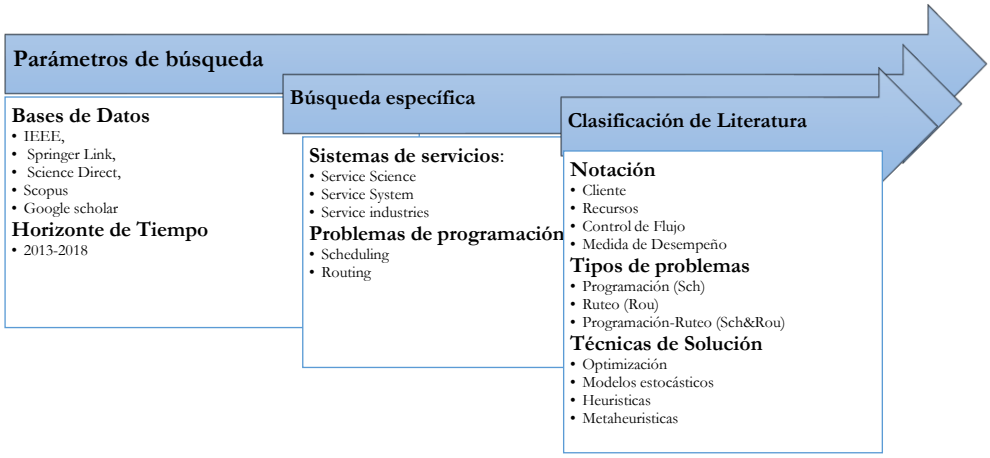


Figura 2-22 Metodología de búsqueda de literatura de problemas de programación de tareas en sistemas de servicios.
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los resultados de la clasificación de literatura en cuanto a los parámetros de la notación y las técnicas de solución clasificadas como Optimización, Modelos Estocásticos, Heurísticas, y Metaheurísticas de acuerdo con la sección 2.1.2.3. Por otro lado, de acuerdo con los resultados de la sección 2.2.4 se definió como tipo de problemas de programación de tareas tres categorías: programación (Sch), Ruteo (Rou) y la combinación de Programación-Ruteo (Sch&Rou).

La Figura 2-23 presenta el número de trabajos de la literatura clasificados en cada tipo de problema respecto a cada uno de los parámetros del componente Trabajos del campo Cliente. Adicionalmente se muestra la distribución en porcentajes en la gráfica para cada salida de cada uno de los parámetros. En promedio el 50% corresponde a programación (Sch), el 23% para ruteo (Rou) y el restante 27% para el problema combinado.

En estos resultados se puede observar que predomina en más del 50% el problema de programación en algunos parámetros como: la naturaleza tangible, el no ser distribuidos geográficamente, cuando es un solo trabajo, la población infinita, el costo y velocidad como expectativa del cliente, la tarea personalizada, la flexibilidad de tipo autónomo y cuando se puede agrupar los trabajos. Estas características permiten identificar el tipo de problemas como programación pura. Mientras que para ruteo su mayor frecuencia se observa cuando son distribuidos geográficamente y la combinación de calidad, costo y velocidad como expectativa del cliente. El problema combinado también se presenta con mayor frecuencia en el caso de clientes geográficamente distribuidos y la necesidad de naturaleza intangible. El problema combinado no se presenta en el caso de un único trabajo para el cliente. En cuanto a la clasificación de la literatura revisada, se observa la relevancia de características como: tipo de necesidad intangible, número de tareas desconocido, sin requerimientos específicos, la demanda independiente, sin ventanas de tiempo, número de trabajos mayor que uno, población finita, sin expectativa definida del cliente, tipo de tarea estándar, flexibilidad asistida y sin agrupación de trabajos.

La Figura 2-24 muestra la distribución de los documentos por tipo de problemas respecto a los parámetros del proceso de arribos del cliente. Se observa que el de mayor frecuencia es programación, excepto para la disciplina en el caso de ser de ruteo donde el de mayor frecuencia es el problema combinado. Luego está ruteo con ventanas de tiempo suaves para el tiempo de entrega. En promedio el 46% corresponde a programación, 24% a Ruteo, y el 30% al problema combinado. Se observa en cuanto a las salidas de cada parámetro, una mayor

tendencia a trabajos sin precedencias, con disciplina general, de tipo estáticos, sin tiempos de liberación, con lugar de arribo al proveedor y lotes unitarios, y con tiempo de llegada determinístico.

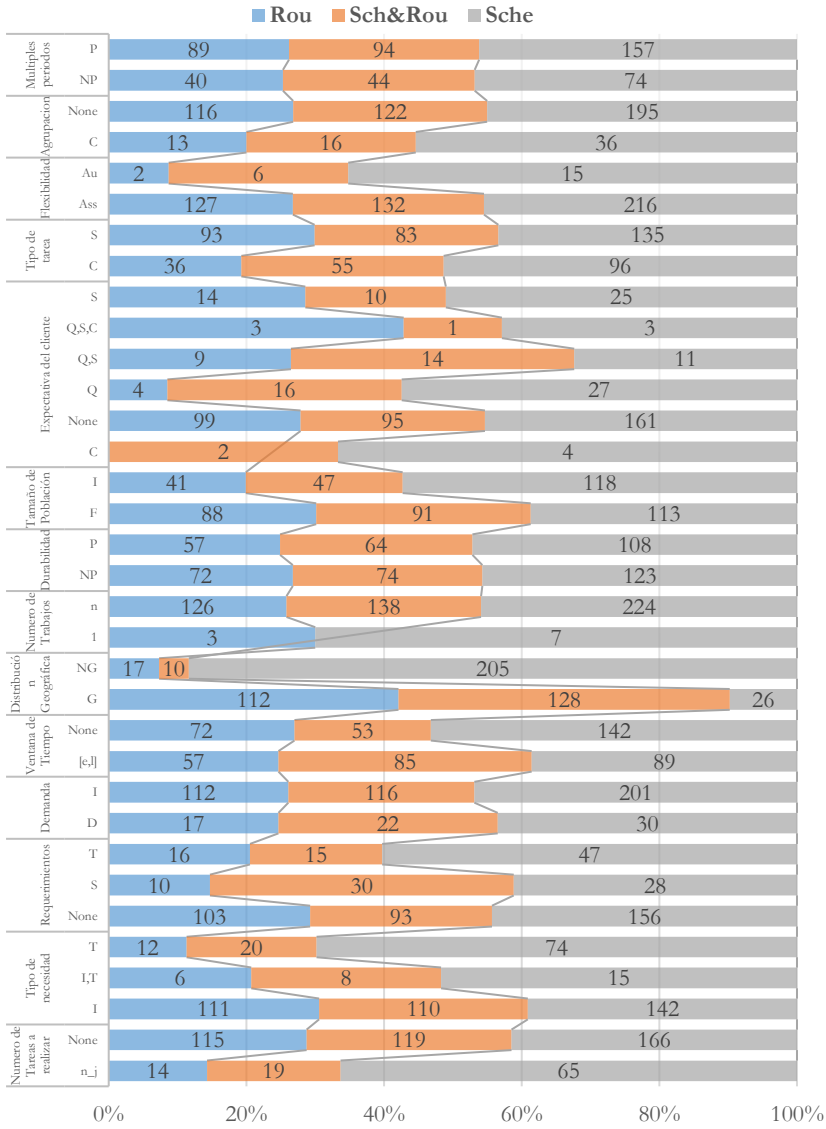


Figura 2-23 Resultados de caracterización por tipo de problema para el componente Trabajos de campo Cliente.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2-25 presenta los resultados de clasificación del tipo de problemas para el componente fila-cola y sus parámetros del campo recurso. Se observa que existe una distribución similar a los anteriores predominando el tipo de problema de programación, sin embargo, para la disciplina de tipo aleatoria y de lotes es 100% problema combinado. Cuando existe un procesamiento en la fila no se encontraron problemas de ruteo y el combinado es de solo el 20%. Para la distribución de la literatura se observa una tendencia hacia no permitir

el incumplimiento, disciplina general en la fila, capacidad finita de la fila, no abandono, y sin procesamiento en la fila.

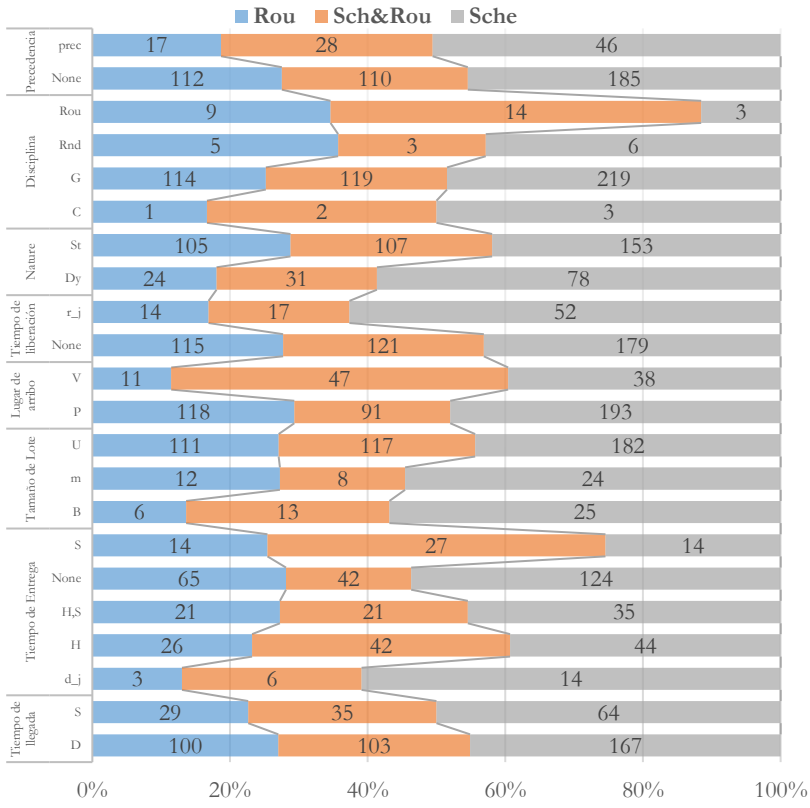


Figura 2-24 Resultados de caracterización por tipo de problema para el componente Proceso de llegada-Arribos del campo Cliente.
Fuente: Elaboración propia.

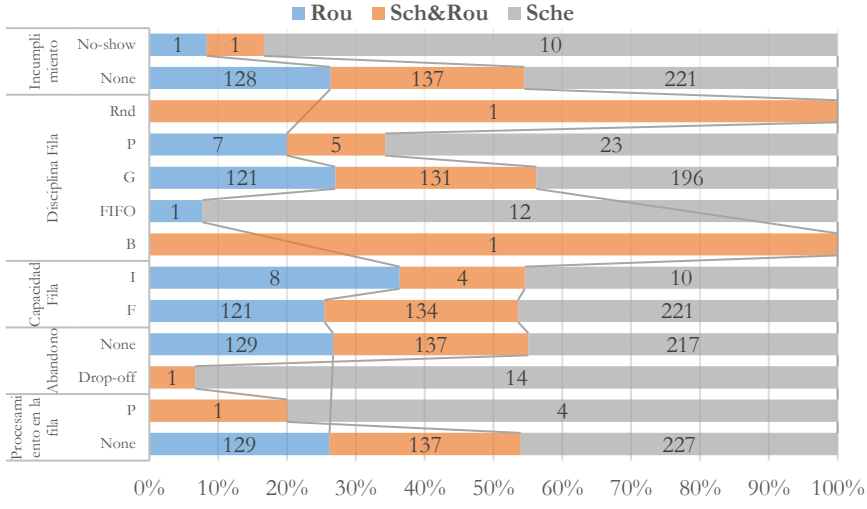


Figura 2-25 Resultados de caracterización por tipo de problema para el componente Fila-cola del campo Recurso.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2-26 presenta la distribución de los tipos de trabajo respecto a servidores del campo de recursos. De manera similar a los anteriores se observa una mayor frecuencia de los problemas de programación. Cuando se tiene un solo servidor, la mayor frecuencia es de programación con 74%, mientras que si se tiene un número mayor la distribución baja al 44%.

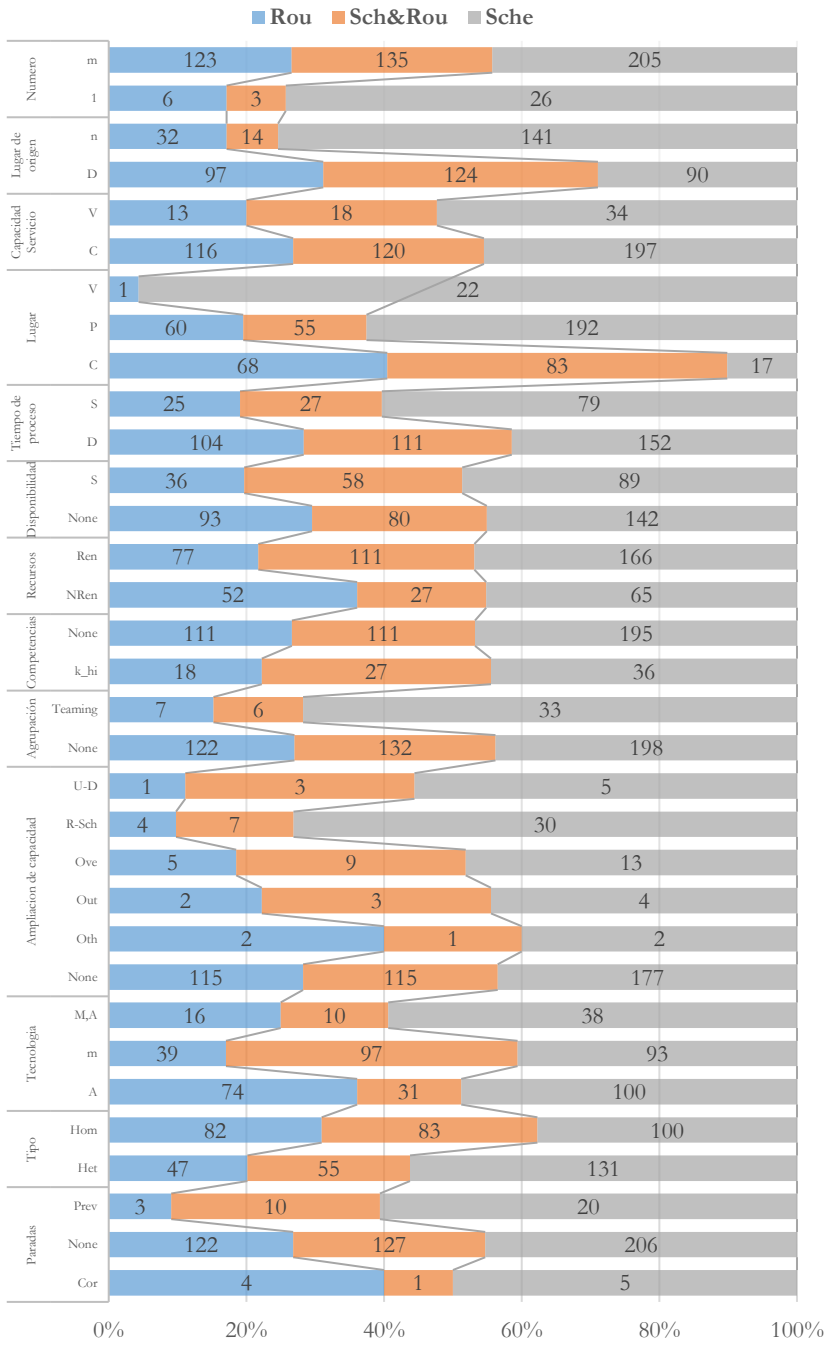


Figura 2-26 Resultados de caracterización por tipo de problema para el componente Servidores del campo Recurso.
Fuente: Elaboración propia.

En estos resultados se observa que si no hay un depósito fijo es del 75% para programación, y si se tiene un depósito fijo pasa al 29%. El ruteo se incrementa al momento de tener varios servidores y un depósito fijo, propio de los problemas típicos de ruteo. Para el lugar de prestación del servicio, si es virtual se tiene un 96% de problemas de programación, y el resto ruteo sin problemas combinados. Mientras que, si es en el proveedor, el problema incrementa los problemas de ruteo y combinados, y cuando es en el lugar del cliente pasa a ser mayor el tipo combinado con 49% y 40% los de ruteo, con solo 10% de programación. Cuando los tiempos de proceso son determinísticos la distribución es cercana al 30% para ruteo y combinado cada una, mientras que si pasan a ser estocásticos bajan a cerca del 20%. Las distribuciones de los tipos de problemas resultan ser similares cuando se presentan competencias y turnos, mientras que si requiere formación de equipos programación tiene el 72%, ruteo solo 15% y combinado 13%. Para la ampliación de capacidad, se observa que la reprogramación y la demanda insatisfecha es presente en mayor proporción en los problemas de programación, mientras que las demás estrategias están más presentes en problemas de ruteo y combinado. Las características con mayor tendencia son: número de servidores mayor que uno, capacidad constante, lugar en el proveedor, tiempos determinísticos, sin turnos, recursos renovables, sin competencias específicas, sin formación de equipos, tecnología manual, servidores homogéneos, y sin paradas por mantenimiento.

La Figura 2-27 presenta los resultados de tipo de problema para el componente atención-salida del campo recurso. Se puede observar una tendencia hacia una disciplina general, utilización de rutas y la calidad como completo en la prestación de servicios. En cuanto a la distribución se observa una mayor tendencia de problemas de programación, excepto para la disciplina general y rutas en el lugar destino. Para la calidad incompleta, solo se presentan problemas combinados.

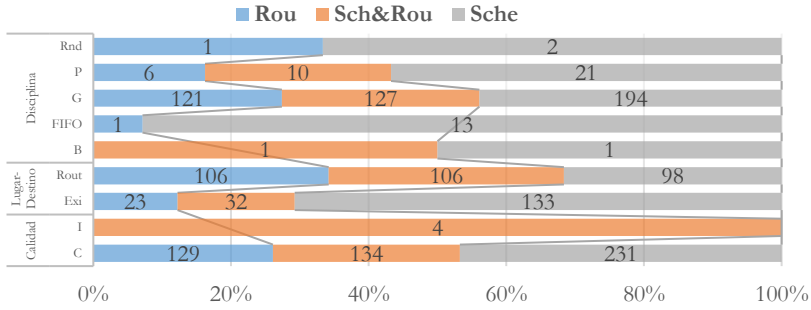


Figura 2-27 Resultados de caracterización por tipo de problema para el componente Atención-Salida del campo Recurso.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2-28 muestra los resultados del componente propiedad del campo control de flujo. Se observa que no se permite acceso a la propiedad en la mayoría de los documentos clasificados y no se permite el rechazo, como una característica principal de los sistemas de servicios. Para los casos que se acepta el acceso, el tiempo y el número de accesos es ilimitado en la mayoría de los casos. En cuanto a la distribución del tipo de problemas se observa una tendencia similar de mayor proporción de problemas de programación en los casos de que se acepte el acceso de la propiedad, y en los demás casos esta proporción disminuye en favor de problemas de ruteo y combinados.

La Figura 2-29 presenta los resultados del tipo de problemas para el componente de Movimiento del control de flujo. Se encontró que predomina los problemas de programación para el caso de no espera, se presenten interrupciones, la ruta se fija y no sea necesaria la sincronización de recursos. Mientras que para los casos de que el cliente puede esperar, la ruta es variable, no se permite la interrupción de actividades y es necesaria la sincronización de

recursos, se incrementa la presencia de problemas de ruteo y problemas combinados de programación-ruteo. El comportamiento es similar cuando no se permite la agrupación de tareas y no se permite el almacenamiento de inventarios. Esto permite evidenciar que la complejidad en el movimiento es presente en el caso de los sistemas de servicios con características de ruteo y programación simultaneas. En cuanto a la a la tendencia hacia una característica en particular se observa solo en el caso de no espera, no agrupar tareas y de no permitir el almacenamiento de inventarios. Las demás características presentan unas características distribuidas de manera uniforme.

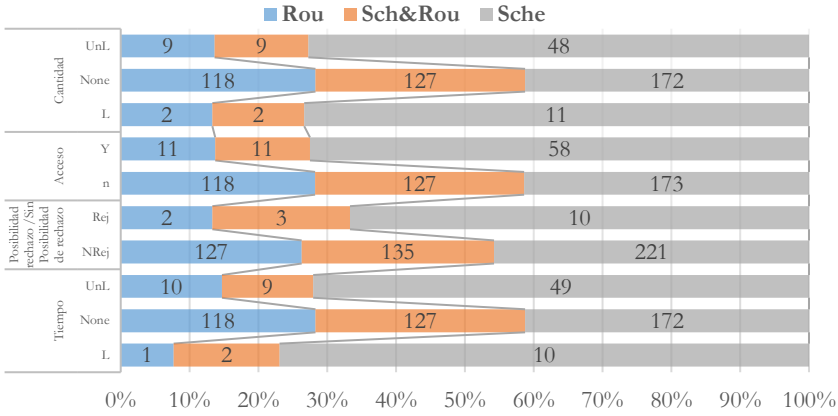


Figura 2-28 Resultados de caracterización por tipo de problema para el componente Propiedad del campo Control de Flujo.

Fuente: Elaboración propia

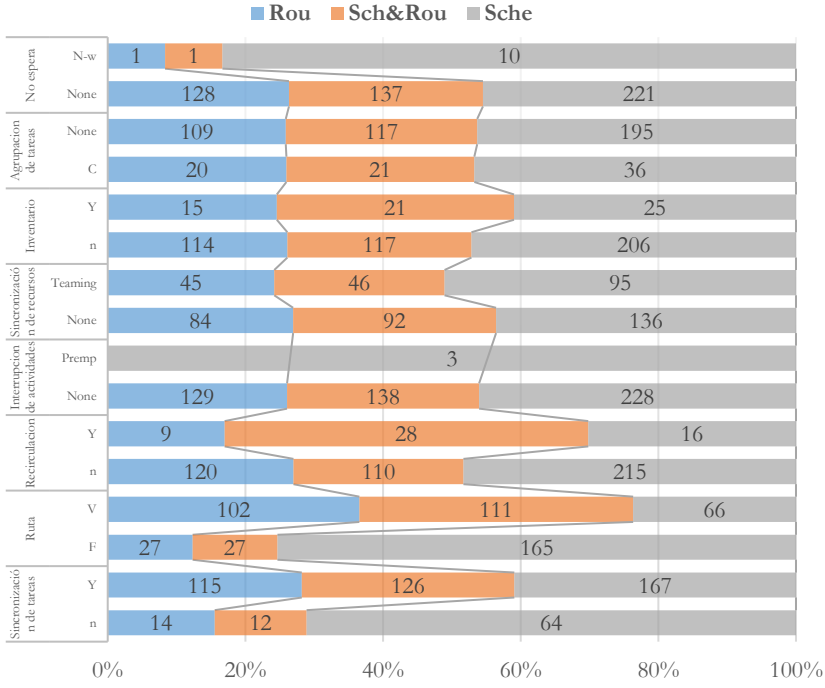


Figura 2-29 Resultados de caracterización por tipo de problema para el componente Movimiento del campo Control de Flujo.

Fuente: Elaboración propia

La Figura 2-30 muestra los resultados del componente tipo de atención para el campo de control de flujo. En este caso se resalta la presencia en la mayoría de los documentos de características con como: la no elegibilidad de máquinas, disciplina general, no simultaneidad, consumo de recurso renovables, lotes unitarios, estandarización y agendados. La tendencia en la distribución de documentos es similar a los anteriores, se resalta la presencia de problemas de ruteo en el caso de no simultaneidad, y de agendamiento en la programación.

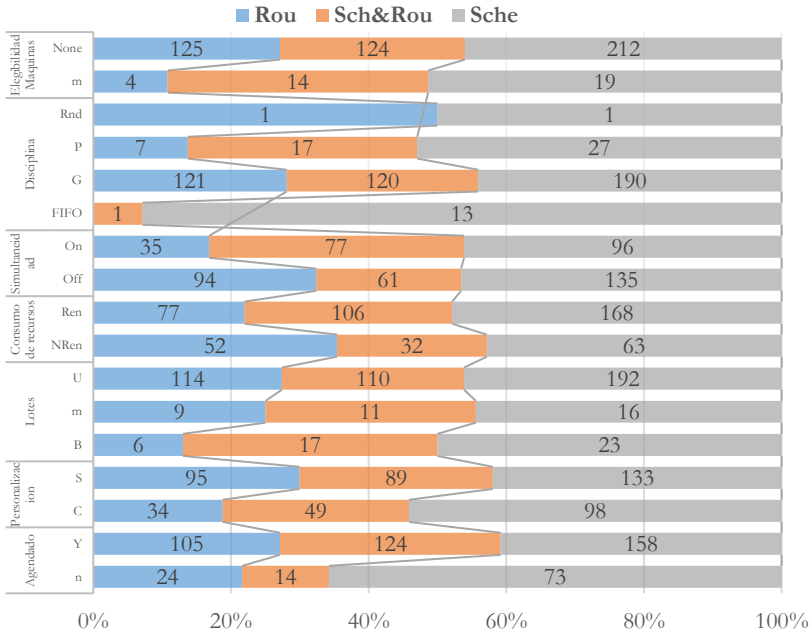


Figura 2-30 Resultados de caracterización por tipo de problema para el componente Tipo de Atención del campo Control de Flujo.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 2-31 muestra una clasificación de los problemas por tipo para dos categorías: servicios y general. La categoría de servicios presenta en detalle las áreas de servicios más representativas encontradas en la literatura, donde se resalta por su frecuencia: transporte, salud, recogida y entrega, educación, personal y asignación. La categoría de problemas general se definió para clasificar aquellos documentos que no representaban una aplicación específica de problemas de servicios, pero si relacionados, se destacan por su frecuencia: programación de fuerza de trabajo, asignación y programación de proyectos. Los resultados evidencian una mayor presencia de problemas de ruteo y combinados entre programación-ruteo para los casos de mayor frecuencia, de esta manera se indica una tendencia en los sistemas de servicios a tener problemas de programación de tareas enfocados hacia el ruteo y la programación de manera simultánea.

Para el campo de medida de desempeño, se caracterizó sus dos campos de manera general. La Figura 2-32 presenta la distribución en cuanto al número de objetivos para los tres tipos de problemas descritos. Se observa una mayor participación de un solo objetivo para los tres problemas, con mayor proporción y cantidad en el caso de problemas de programación. En promedio el 62% de los documentos tiene un solo objetivo, y el restante es de múltiples objetivos.

En cuanto al tipo de medida de desempeño, se consideraron las cuatro categorías descritas en la notación y sus resultados se presentan en la Figura 2-33. Del total 32% son de tipo de programación, 26% de ruteo, 24% de recursos y 18% de clientes. La proporción del tipo de

medida de desempeño se incrementa de acuerdo con el tipo de problema, es decir en el caso de problemas de programación la mayor proporción es para medidas de este tipo, mientras que para problemas de ruteo y combinados se incrementa la proporción de medidas de tipo de ruteo. En cuanto a las medidas de recursos y clientes, la proporción se incrementa para los problemas de programación.

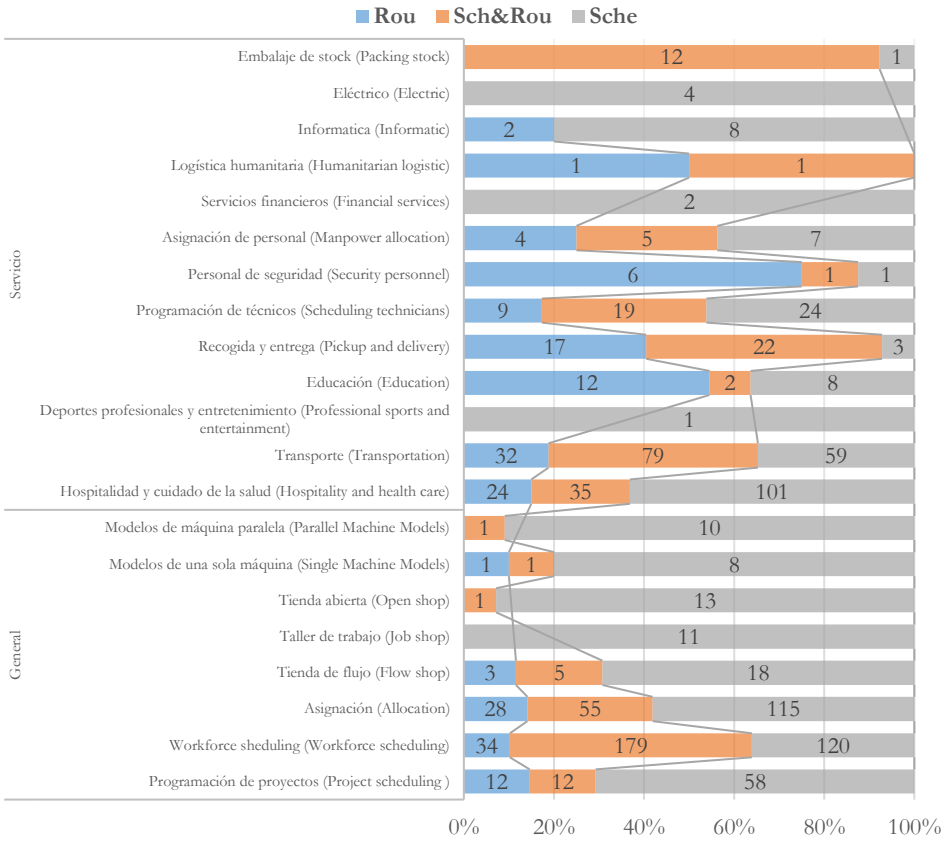


Figura 2-31 Resultados de caracterización de por tipo de problema para problemas clasificados de servicio y generales.
Fuente: Elaboración propia

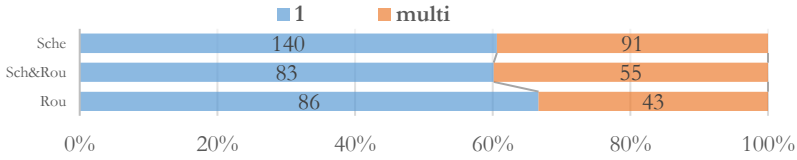


Figura 2-32 Resultados de caracterización de número de criterios por tipo de problema.
Fuente: Elaboración propia

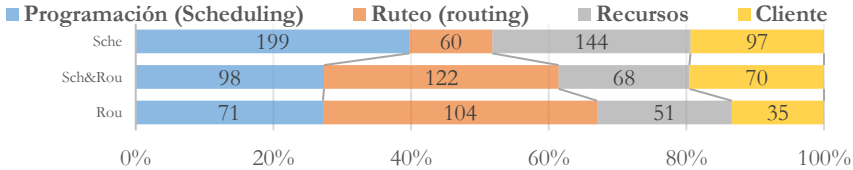


Figura 2-33 Resultados de caracterización de media de desempeño por tipo de problema.
Fuente: Elaboración propia.

Ahora, al analizar las intersecciones entre número de objetivos y el tipo de medidas en la Figura 2-34, se observa como las distribuciones de los tipos de objetivos cambian para cada tipo de problema. Para los de programación, se mantiene mayor frecuencia de medidas de tipo de programación, sin embargo, se observa un incremento en la proporción de los de tipo de recursos, y en el caso de múltiples objetivos se observa la presencia de intersecciones entre Cliente-Recurso y Programación-Ruteo. Para los de ruteo, el comportamiento es similar conservando mayor proporción para las medidas de ruteo y se incrementa las de recursos en el caso de múltiples objetivos. Para el problema combinado las proporciones cambian y se vuelven más uniformes, resaltando en mayor proporción las medidas de cliente y recursos, y la intersección de programación-ruteo para múltiples objetivos.

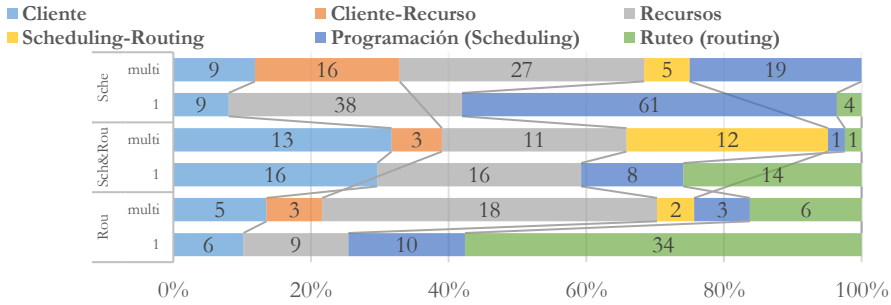


Figura 2-34 Resultados de caracterización de número de criterios por tipo de problema.
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las técnicas de solución, en la Figura 2-35 se observan los resultados de clasificación de los cuatro grupos de técnicas para cada tipo de problema. La mayor proporción se da para optimización con 55%, seguida de metaheurísticas con 18%, luego heurísticas con 16% y por último modelos estocásticos con 10%. Por cada tipo de problema, las proporciones se mantiene con algunos cambios pequeños entre heurísticas y metaheurísticas.

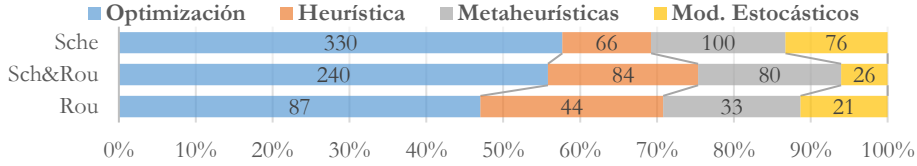


Figura 2-35 Resultados de caracterización de tipo de técnica de solución por tipo de problema.
Fuente: Elaboración propia.

El mismo comportamiento se evidencia en los resultados de la Figura 2-36 para una clasificación en cuanto a problemas de servicios y problemas de tipo general, y en detalle para cada tipo de problema en la Figura 2-37. De tal manera que se confirma la utilización de técnicas de optimización y metaheurísticas para problemas de servicios y generales como principales técnicas de solución.

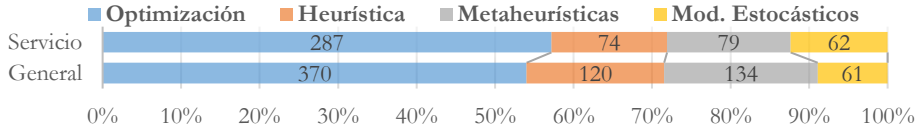


Figura 2-36 Resultados de caracterización de tipo de técnica de solución para problemas de servicio y general.
Fuente: Elaboración propia.

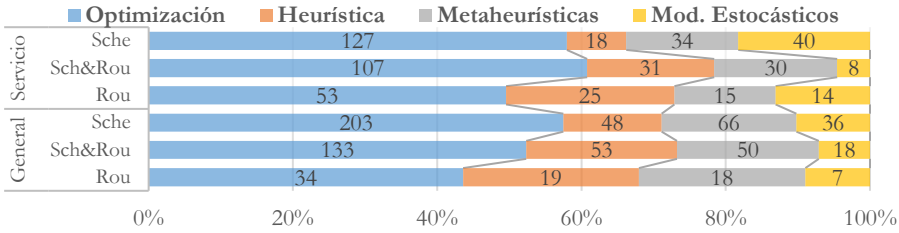


Figura 2-37 Resultados de caracterización de tipo de técnica de solución para problemas de servicio y general y por tipo de problema.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2-38 se presentan los resultados de la clasificación de técnicas de solución para los tipos de problemas detallados.

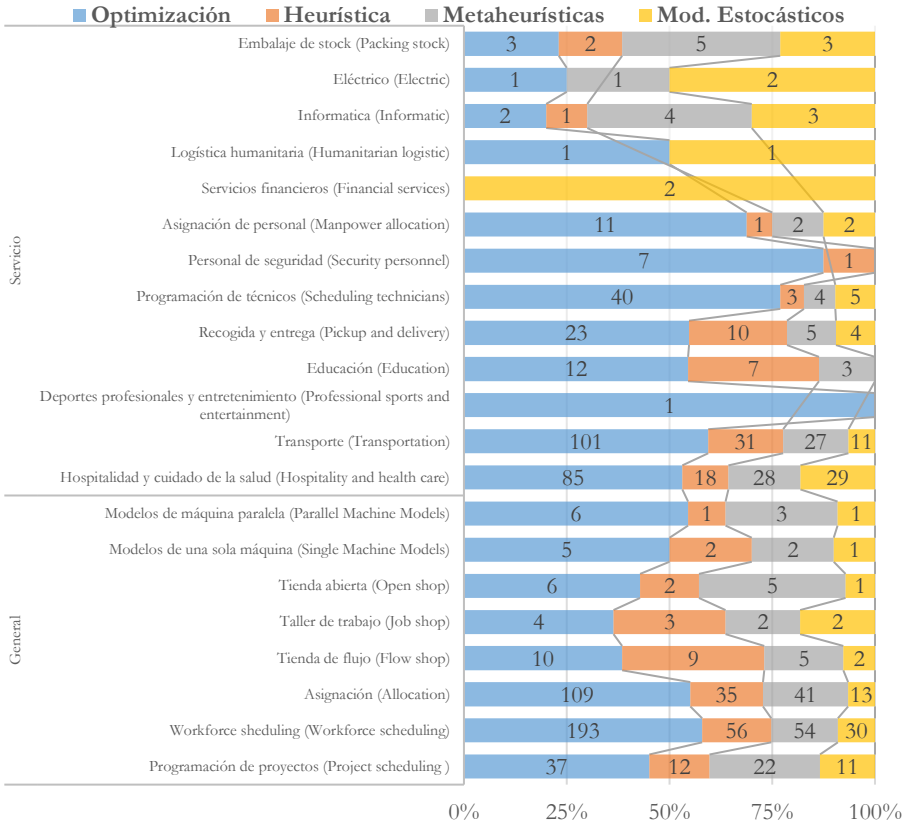


Figura 2-38 Resultados de caracterización de tipo de técnica de solución para problemas de servicio y genera detallados.
Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los servicios se observa una mayor proporción para la técnica de optimización, sin embargo, en el caso de servicios financieros solo se emplean modelos estocásticos y en el caso de deportes y entretenimiento solo optimización. Los de mayor frecuencia son transporte, recogida y entrega, salud y programación de técnicos, para los cuales la tendencia es similar a los resultados agregados presentados en la Figura 2-36. Para el caso de problemas generales, que tienen que ver con problemas de servicios pero que por sus características se

presentaron de esta manera se evidencia la conservación de la misma tendencia y una mayor utilización de metaheurísticas, que se explica por ser problemas con mayor presencia en la literatura científica Se observa que el de mayor frecuencia es la programación de fuerza de trabajo, el cual es un problema típico en sistemas de servicios.

Para cada grupo de técnica de solución, en la Figura 2-39 se presenta en detalle las principales técnicas empleadas y su clasificación del tipo de problema.

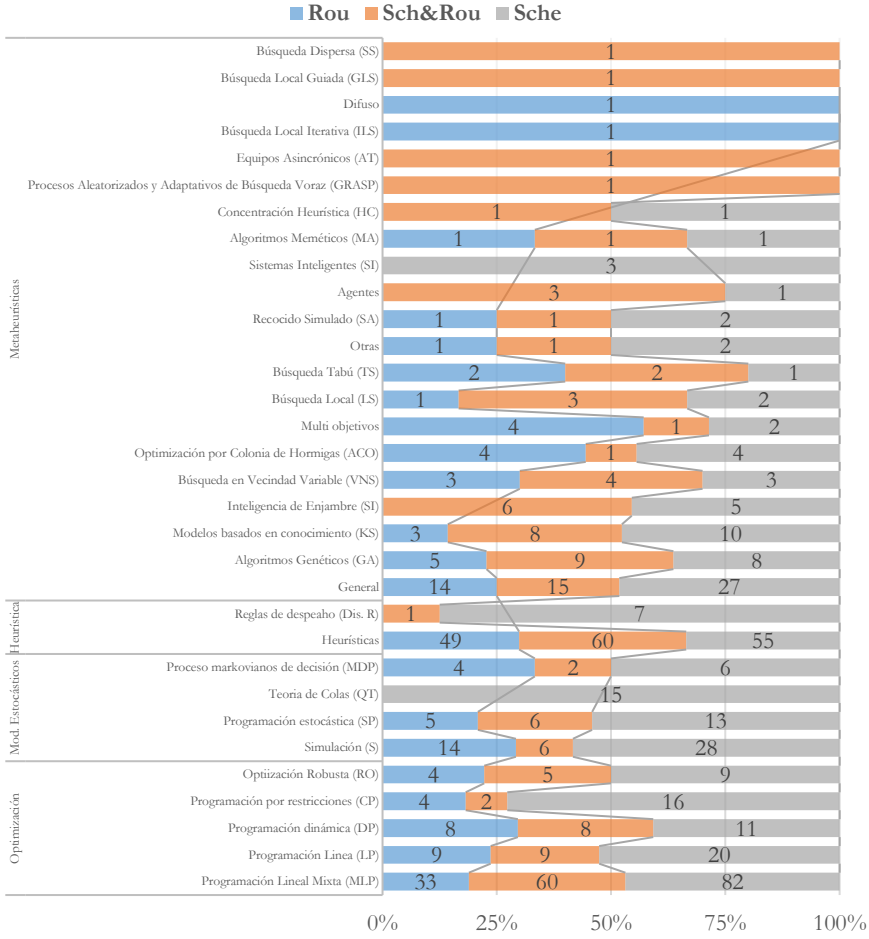


Figura 2-39 Resultados de caracterización de tipo de problema resuelto para cada técnica de solución.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de optimización, la de mayor frecuencia es programación lineal y mixta, la distribución de los tipos de problemas presenta con mayor proporción los de programación, seguida del problema combinado y por último los de ruteo. Para el grupo de Modelos estocásticos, predomina el uso de la simulación y la programación estocástica. La teoría de colas se emplea solo para problemas de programación, y los de ruteo son tratados en mayor frecuencia por simulación. Para el grupo de heurísticas, las reglas de despacho son tradicionales de programación y solo se encontró una aplicación en el problema combinado. La distribución para las heurísticas en general es con mayor proporción el problema combinado, seguido de programación y luego ruteo. En el grupo de las metaheurísticas, se observa mayor frecuencia en los procedimientos generales, seguida de algoritmos genéticos y de modelos basados en conocimiento. Las demás tiene aplicaciones, pero son de menor

frecuencia. En cuanto a la distribución de los problemas, en los casos de mayor frecuencia se observa la tendencia encontrada hasta el momento de presencia de los tres tipos de problemas, y en particular para las metaheurísticas una mayor presencia de problemas combinados.

2.4 Resumen y conclusiones del capítulo

La ciencia de servicios consiste en una integración multidisciplinaria para el estudio, análisis, diseño, gestión y optimización de sistemas de servicios. Es un campo estrechamente relacionado con las ciencias de la decisión y la ingeniería, debido a que abarca una diversidad de enfoques para la gestión de dichos sistemas. En este capítulo se abordó la problemática de la toma de decisiones en los sistemas de servicios, mediante la revisión realizada, la cual se enfocó en el proceso de toma de decisiones, basados en el marco del enfoque jerárquico que establece tres niveles de la toma de decisiones se establecieron unas tendencias en la toma de decisiones en los sistemas de servicios.

El primer nivel corresponde al estratégico, donde las decisiones tienen un alcance de largo plazo. En la revisión se encontró los problemas de decisión en este nivel para los sistemas de servicios están relacionados principalmente con el diseño, la estrategia y la planeación. Siendo el diseño y la estrategia, los de mayor importancia por el número de estudios, y donde se utilizan métodos cualitativos principalmente. En este aspecto, se identifica como posible área de investigación la inclusión de métodos cuantitativos en estas áreas de investigación que permitan dar mayor robustez a la toma de decisiones.

El segundo nivel corresponde al nivel táctico, en el cual las decisiones tienen un alcance del mediano plazo y tienen relación con problemas de gestión de capacidades y dimensionamiento de recursos. Respecto a este se encontró, primero que la cantidad de trabajos es menor en este ámbito debido a que en varios estudios se clasifican como nivel estratégico y operativo; y segundo, que existe la misma proporción en cuanto a las dos áreas definidas. Respecto a las técnicas de toma de decisiones, se encontró que la mayoría fueron clasificadas en una categoría donde se incluían técnicas cualitativas, de simulación, de teoría de colas, de análisis de riesgos y de gestión de calidad, que permiten evidenciar una diferencia significativa con los sistemas de manufactura donde predominan las técnicas cuantitativas de optimización y heurísticas. Adicionalmente, las técnicas de análisis económico también tienen una gran importancia en este nivel de toma de decisiones debido a que en los sistemas de servicios las decisiones de dimensionamiento y capacidad se evalúan con estos criterios principalmente. Como posible área de investigación, se identifica una necesidad de definir específicamente el alcance de este tipo de decisiones y las técnicas utilizadas, ya que radica en una diferencia importante respecto a los sistemas de manufactura.

En el tercer nivel se tiene los aspectos operativos de la toma de decisiones, con un alcance de corto plazo. En este nivel se encontraron varios trabajos de aplicación y de revisión que permiten evidenciar una tendencia importante de investigación en este ámbito de la toma de decisiones. Los problemas se clasificaron como programación, ruteo, personal y control. Se encontró que los principales problemas son los de programación, personal y ruteo, junto con las intersecciones de estos tres. Este aspecto evidencia la complejidad de las decisiones tomadas en este nivel, debido a que cada uno de los problemas de forma independiente se caracteriza por tener una gran cantidad de variables y diferentes restricciones que debe satisfacerse de forma simultánea para garantizar una solución factible al problema, y el esfuerzo incrementa cuando se busca la optimalidad por lo que se recurre principalmente a métodos de aproximación con las heurísticas y las metaheurísticas, lo cual se corroboró con los resultados obtenidos. Entonces, en muchos sistemas de servicios, estos tres problemas se encuentran de forma simultánea o por lo menos dos de ellos como se evidencio en las intersecciones presentadas, lo cual representa una mayor complejidad y también la necesidad de que los métodos de solución cada vez presenten alternativas hibridas entre optimización,

modelos estocásticos, heurísticas y metaheurísticas. Este último aspecto es una de las primeras tendencias de investigación identificadas en este nivel de toma de decisiones. Respecto al control, se encontró una menor proporción de trabajos relacionados, y entre los revisados se observó una mayor utilización de técnicas no tradicionales como el análisis de riesgos, la simulación y los agentes, que permiten agregar la característica de autonomía para responder a la necesidad de reprogramación que es la segunda tendencia identificada en este nivel de decisión.

Como segundo aporte de investigación, se presentó una definición de sistema de servicio recopilando los aspectos distintivos de las definiciones de la literatura y los vacíos encontrados en relación con el problema de programación de tareas. Con esta definición como punto de partida, se propuso una notación para la representación del problema de programación de tareas en sistemas de servicios basada en cuatro campos: cliente, recurso, control de flujo y medida de desempeño. La notación propuesta involucra los principales aspectos relacionados en las notaciones tradicionales y suple los vacíos que se identificaron en cuanto a: trabajos, proceso de llegada, servidores, comportamiento de la fila, procesos de atención, propiedad y movimiento. Esta notación permite establecer un conjunto de características representativas del sistema con el fin de identificar las técnicas de solución que permitan abordar el problema de toma de decisiones de programación de tareas en los servicios.

Como tercer aporte de este capítulo, tomando la notación propuesta y las técnicas de decisión descritas en el marco de referencia de la investigación, se realizó una caracterización sobre un conjunto de trabajos recopilados de literatura científica que plasma el conocimiento de los expertos en problemas de programación de tareas en sistemas de servicios. Se clasificaron los documentos respecto a tres tipos de problemas: programación, ruteo, y combinación de programación-ruteo; para cada componente de cada uno de los campos de la notación. Uno de los principales hallazgos en esta caracterización fue la presencia en una proporción importante de problemas de ruteo y de combinación de programación-ruteo, en aspectos como la intangibilidad, la simultaneidad, la distribución geográfica, el acceso a la propiedad, y las rutas variables en el procesamiento; las cuales son características fundamentales en los sistemas de servicios.

También, se encontró que la medida de desempeño es caracterizada por la presencia de múltiples objetivos y que los diferentes tipos de medida considerados (recursos, clientes, programación, ruteo) están presentes y cambian de distribución en frecuencia si se consideran criterios únicos o múltiples. En especial, se identificó como a nivel agregado los criterios de mayor frecuencia son los de programación y ruteo, pero al analizar por tipos de problemas y de acuerdo con el número de criterios, las proporciones cambian y crecen las de criterios relacionados con cliente, recursos y las intersecciones entre los grupos. Este resultado, permite identificar una tendencia hacia la exploración de métodos que involucren múltiples criterios de decisión y que permitan involucrar información relacionada con el manejo de recursos y la satisfacción de clientes.

Finalmente, se analizó la utilización de técnicas de solución categorizadas en cuatro grupos: optimización, modelos estocásticos, heurísticas y metaheurísticas. Se encontró que la de mayor frecuencia es la optimización, seguida de las metaheurísticas, luego heurísticas y finalmente los modelos estocásticos. También se observa, que para los casos donde se tiene mayor presencia de problemas de ruteo y el problema combinado, hay una mayor proporción de utilización de heurísticas y metaheurísticas, siendo consecuente con los resultados de la revisión a nivel operativo y confirmando la necesidad de métodos híbridos que permitan involucrar más componentes que den representatividad a los sistemas de servicios y poder dar solución a este problema de decisión.

Esto resultados de caracterización sirven como insumos de las bases de conocimiento que se emplearan en el sistema experto propuesto en el siguiente capítulo que permitirá abordar el problema de programación de tareas en sistemas de servicios.

Capítulo 3. SISTEMA EXPERTO PARA PROGRAMACIÓN DE TAREAS EN SISTEMAS DE SERVICIOS

Este capítulo presenta el Sistema Experto (SE) propuesto para el problema de programación de tareas en sistemas de servicios (PTSS) y se divide en cinco secciones. La sección 3.1 establece la estructura general de la propuesta. La sección 3.2 presenta el SE para clasificación de sistemas de servicios. La sección 3.3 describe el SE para determinar el problema de programación de tareas y la técnica de solución. La sección 3.4 muestra la arquitectura del prototipo computacional. Por último, se presentan las conclusiones parciales con los principales aportes del capítulo en la sección 3.5.

3.1 Estructura general del sistema experto propuesto

Esta sección[3] presenta la estructura general del SE, o también llamado SE basado en conocimiento (*knowledge-based expert system*), propuesto para el problema de PTSS. La Figura 3-1 presenta el marco general propuesto. Este marco tiene dos entradas, un componente de clasificación de sistemas de servicios (CCSS) y otro para el problema de programación de tareas (CPT). Las salidas del SE consisten en tres grupos: el primero determina el problema de programación de tareas (PT) y establece los parámetros de la notación propuesta; el segundo corresponde a la medida de desempeño del problema de PT; y el tercero selecciona la técnica (o conjunto de técnicas) para resolver el problema de PT y sugiere los pasos (método) para resolver el mismo.

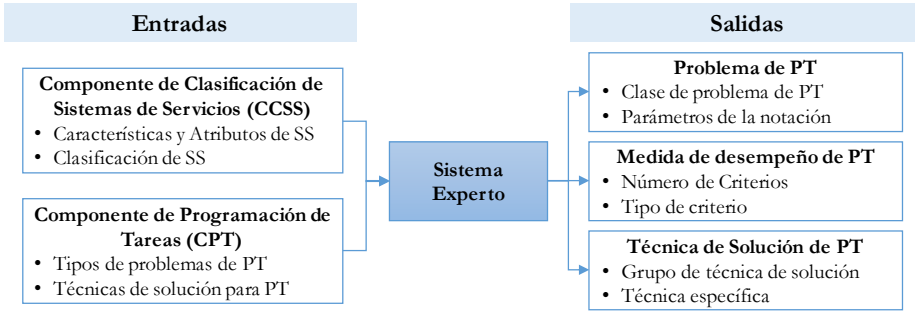


Figura 3-1 Marco general de SE propuesto para PTSS
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3-2 presenta el CCSS. Este componente consiste en un sistema de clasificación de sistemas de servicios para el código de Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU) en el contexto colombiano para los niveles de sección y división, incluyendo el sector de la

[3] El contenido de esta sección se basa en el trabajo publicado en *Applied Computer Sciences in Engineering* (E. R. López-Santana & Méndez-Giraldo, 2016a)

economía: servicios, manufactura y primario. El sistema de reglas fue diseñado sobre el conjunto de 246 casos correspondiente al nivel de grupos del CIIU. La base de conocimiento consiste en un conjunto de 12 atributos: naturaleza, durabilidad, coproducción, dependencia, lugar, agendado, acumulación, tecnología, propiedad, simultaneidad, estandarización, y flexibilidad. Los datos se recogieron mediante entrevista con una fuente de información secundaria y expertos. El motor de inferencia se implementa con algoritmos de clasificación para el sector, luego la sección y la división, ejecutados en forma de cascada. Los atributos fueron modelados utilizando un sistema de adquisición de conocimiento basado en optimización no lineal y un sistema de inferencia neuro-difuso adaptativo (ANFIS) sobre un conjunto de 31 características.

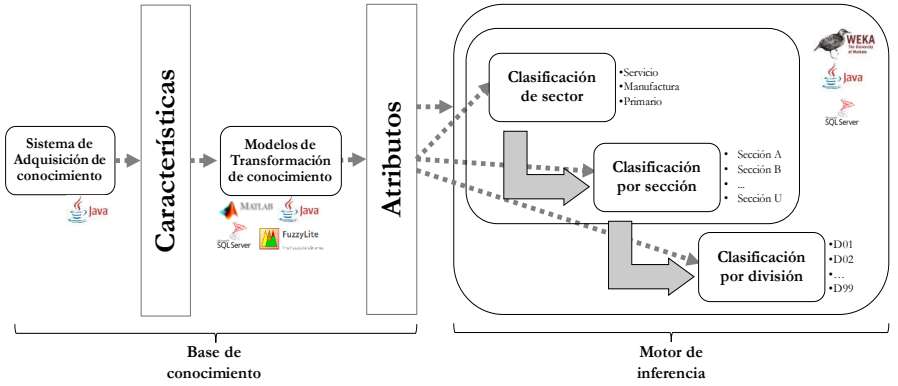


Figura 3-2 Estructura del componente de clasificación de sistemas de servicios (CCSS).
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3-3 muestra el CPT. Este componente consiste en un sistema de clasificación de acuerdo con los problemas de PTSS. Este componente emplea como entradas los atributos y características del CCSS junto con una información adicional mediante preguntas al usuario, y utilizando un sistema de adquisición de conocimiento y reglas transforma estas entradas en los parámetros definidos para la notación en los campos de Cliente, Recurso y Control de Flujo. Sobre la base de conocimiento constituida por la notación, se aplica un motor de inferencia que consiste en tres sistemas basados en reglas que se ejecutan en forma de casada para identificar los problemas de PT, posteriormente la medida de desempeño y finalmente la técnica de solución. Cada sistema de reglas toma como entrada los resultados del sistema precedente, por tanto, se debe ejecutar en ese orden establecido.

En las siguientes dos secciones se presentarán en detalle el CCSS y el CPT, describiendo sus entradas, sus modelos desarrollados y su configuración de operación.

3.2 Sistema experto para el Componente de Clasificación de Sistemas de Servicios

Esta sección[4] presenta los principales componentes del SE para el CCSS según la Figura 3-2. Primero se encuentra la descripción del sistema de clasificación de actividades económicas que se toma para el CCSS. Luego se presenta la base de conocimiento para el CCSS donde se muestran los modelos empleados para el sistema de adquisición de conocimiento y los resultados encontrados. En el tercer apartado se describe el motor de inferencia para el CCSS,

[4] El contenido de esta sección se basa en el trabajo presentado en *CICOM 2015* (E. López-Santana & Méndez-Giraldo, 2015) y el trabajo publicado en *Intelligent Computing Methodologies* (E. R. López-Santana & Méndez-Giraldo, 2016b)

describiendo el sistema de reglas establecidos. Finalmente, se describe el funcionamiento de los componentes presentados en la base de conocimiento y motor de inferencia en el SE para el CCSS.

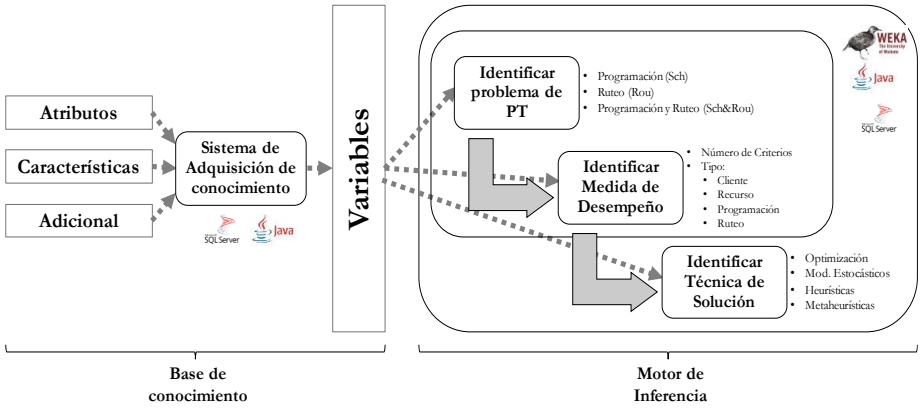


Figura 3-3 Estructura del componente de programación de tareas (CPT).
Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Descripción del sistema de clasificación de actividades económicas

La clasificación CIIU propuesta por (UNESCO, 2009) tiene por finalidad establecer una clasificación uniforme de las actividades económicas productivas. El término actividad se entiende como un proceso o grupo de operaciones que combinan recursos tales como equipo, mano de obra, técnicas de fabricación e insumos, para la producción de bienes y servicios. La estructura jerárquica de esta clasificación se muestra en la Figura 3-4, donde se tienen 21 secciones (categoría a un digito), 88 divisiones (categoría a dos dígitos), 246 grupos (categoría a tres dígitos) y 495 clases (categoría a cuatro dígitos), según la adaptación hecha para Colombia (DANE, 2012).

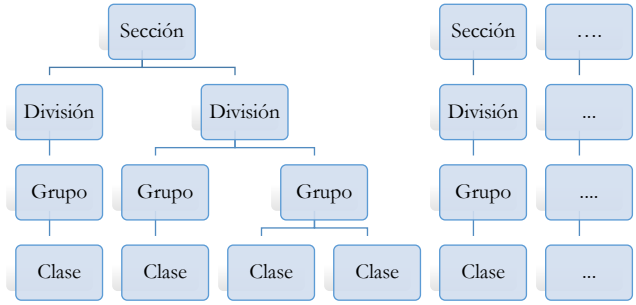


Figura 3-4. Estructura jerárquica de clasificación CIIU.
Fuente: DANE.

Para la recopilación de información se trabajó como instancias de clasificación el nivel de grupo, es decir con 246 instancias, y se crea un base de datos de los 12 atributos y 31 características que se definen en la siguiente sección. Para la clasificación, se define un nuevo nivel como el *Sector* de la economía con salidas preestablecidas como: Servicios, Manufactura o Primario. En la Figura 3-5 se presenta la estructura modificada del CIIU con la cual se creó la clasificación propuesta.

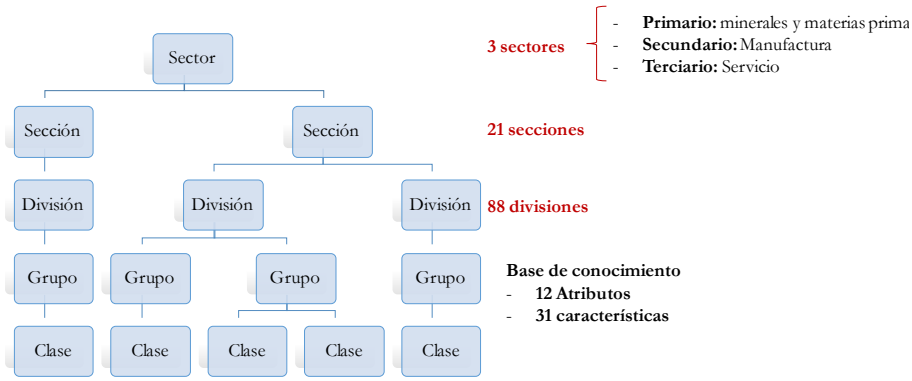


Figura 3-5. Estructura modificada de la jerarquía de clasificación CIIU
Fuente: Elaboración propia.

3.2.2 Base de conocimiento para clasificación de sistemas de servicios

Para la elaboración de la base de conocimiento se procede a un análisis de las características de cada uno de los grupos para su clasificación. Esta etapa se realiza mediante la recolección de conocimiento experto proveniente de fuentes secundarias llegando a la definición de los atributos presentados en la Tabla 3-1, donde se establecen los 12 atributos más relevantes y sus posibles valores de salida. En laTabla 3-2 se presenta la descripción de salida del CCSS por Sector, Sección y División.

Tabla 3-1 Definición de atributos de base de conocimiento para el CCSS

a	Atributo	Definición	Valores(*)
1	Naturaleza	Característica física del resultado de la actividad	Tangible/ Intangible
2	Durabilidad	Tiempo de vida útil de resultado de la actividad	Perecedero/ No Perecedero
3	Coproducción	Presencia simultánea del cliente y proveedor en lugar y tiempo.	S/N/P
4	Dependencia	Necesidad de apoyo por parte del proveedor para el desarrollo de la actividad.	Autónomo/ Asistido/ Mixta
5	Lugar	Propiedad del sitio donde se realiza la actividad	Prestador/ Usuario/ Mixta
6	Agendado	Si la actividad requiere de una reserva de tiempo y recursos del proveedor.	S/N/Mixto
7	Acumulación	Almacenamiento de los resultados de las actividades económicas.	S/N
8	Tecnología	Tipo de tecnología empleada para el desarrollo de la actividad.	Manual/Mecánico/Automatizado/ Mixto
9	Propiedad	Transferencia del dominio legal sobre el resultado de la actividad.	S/N
10	Simultaneidad	Coincidencia en el tiempo de cliente y proveedor	En línea / No en línea
11	Estandarización	Grado de normalización de las actividades y los resultados.	Bajo/Medio/Alto
12	Flexibilidad	La actividad es susceptible de cambios o variaciones según las circunstancias o necesidades del cliente.	S/N

(*) Valores de Atributos (S=Si, N= No,P=Parcial)
Fuente: Elaboración propia.

Para la construcción de esta base de conocimiento se debe determinar los 12 atributos. En este sentido, se define que estos atributos dependen de un conjunto de características las

cuales serán indagadas a los expertos para encontrar el valor del atributo. Se define un conjunto de 31 características en la Tabla 3-3, donde se presenta el componente al que pertenecen y su descripción. En el Anexo D se presenta el cuestionario de preguntas para este conjunto de características el cual se realiza mediante un sistema de adquisición de conocimiento.

Tabla 3-2 Descripcion de la salida del CCSS

Salida	Definición	Valores
Sector	Agrupación de la economía donde se desarrolla la actividad.	Servicio, Manufactura, Primario
Sección	Correspondiente a un sector de la economía con características homogéneas	A,B,.., U
División	Corresponde a una categoría más detallada y agrupa actividades pertenecientes a un mismo sector económico con mayor grado de homogeneidad. Tiene en cuenta la especialidad y el uso de los bienes producidos y los servicios prestados, los insumos, el proceso y la tecnología de producción utilizada.	D01, D02,…, D99

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-3 Lista de Caracteristicas

r	Componente	Característica	Definición
1	Cliente	Presencia	Simultaneidad en tiempo y espacio de cliente y recurso
2	Cliente	Comportamiento	Afectación de parte del cliente al desarrollo de la actividad.
3	Actividad	Continuidad	Se afecta el desarrollo de la actividad.
4	Cliente	Abandono	El cliente deja el sistema de servicio.
5	Cliente	Operación	Desarrollo de la actividad por parte del cliente-
6	Resultado	Autonomía	Selección del resultado por parte del cliente.
7	Actividad	Influencia	Modificación de la actividad por parte del cliente.
8	Resultado	Almacenamiento	Posibilidad de mantener inventario de actividades.
9	Resultado	Tiempo de almacenamiento	Afectación del tiempo de almacenamiento al resultado.
10	Cliente	Anticipación	Se puede pronosticar la necesidad del cliente.
11	Cliente	Tiempo de espera	El cliente puede esperar por el resultado.
12	Cliente	Tiempo de espera Inicial	El cliente puede esperar para iniciar actividad.
13	Recurso	Espacio	El recurso tiene espacio de almacenamiento.
14	Recurso	Costo de almacenamiento	El inventario tiene un costo al proveedor.
15	Actividad	Uso de máquinas/equipos	Capacidad de servicio requiere máquinas.
16	Actividad	Uso de personas	Capacidad de servicio requiere personas.
17	Cliente	Interacción	Comportamientos entre cliente y recurso en el desarrollo de la actividad.
18	Resultado	Beneficiario	Usuario final del resultado.
19	Resultado	Permiso	Utilización del resultado.
20	Resultado	Comercialización	Se puede comercializar el resultado.
21	Cliente	Virtual	No es necesaria la presencia física del cliente.
22	Resultado	Personalización	Afectación de la necesidad del cliente. al resultado
23	Resultado	Apariencia	Tangibilidad del resultado.
24	Resultado	Productos complementarios	Componentes adicionales al resultado.
25	Resultado	Conocimiento	Valor agregado del resultado.
26	Resultado	Consumo	Interacción cliente, recurso, resultado.
27	Proveedor	Lugar	Espacio de desarrollo de la actividad.
28	Actividad	Programación de actividades	Reserva del tiempo y espacio para la actividad.
29	Proveedor	Programación de recursos	Reserva de recursos para la actividad.
30	Actividad	Estandarización	Forma de ejecución de la actividad.
31	Cliente	Desplazamiento	Necesidad de movimiento físico del recurso hacia el cliente.

Fuente: Elaboración propia.

Los atributos y las características poseen valores nominales según los rangos establecidos, sin embargo, es necesario transformarlos a una escala numérica para su tratamiento y establecer la relación entre atributos y características. Formalmente, se define un conjunto de atributos $A = \{a_1, a_2, \dots, a_{|A|}\}$, un conjunto de grupos del CIIU $I = \{1, \dots, n\}$ y un conjunto de características $R = \{r_1, r_2, \dots, r_{|R|}\}$. Dado x_{ia} como el valor de cada atributo $a \in A$ para cada grupo $i \in I$,y dado y_{ir} como el valor de cada característica $r \in R$ para cada grupo $i \in I$. La Tabla 3-4 presenta las salidas nominales para los atributos, junto con su abreviación, su correspondiente valor teórico o ideal representado por x_a y el valor límite de comparación b_{sa} de cada salida s, en el cual se compara el valor de x_a y si es menor a b_{sa} toma el valor nominal correspondiente a s. La Tabla 3-5 presenta las respuestas posibles a las preguntas de cada característica y su valor correspondiente y_r.

Tabla 3-4 Salidas y rango de valores de los atributos

a	Salida $s = \{s_1, s_2, \dots\}$	Abreviación de salida	Valor teórico x_a	Valor límite b_a $(x_a \leq b_{sa})$
1	{Intangible, Tangible}	{I,T}	{1,5}	{2.5,5}
2	{No Perecedero, Perecedero}	{NP,P}	{1,5}	{2.5,5}
3	{No, Parcial, Si}	{N,P,S}	{1,3,5}	{2,4,5}
4	{Asistido, Mixta, Autónomo}	{As,Mix,Au}	{1,3,5}	{2,4,5}
5	{Usuario, Mixta, Prestador}	{Us,Mix,Pr}	{1,3,5}	{2,4,5}
6	{No, Mixto, Si}	{N,Mix,Ag}	{1,3,5}	{2,4,5}
7	{No, Si}	{N,S}	{1,5}	{2.5,5}
8	{Manual, Mixto, Mecánico, Automatizado}	{Ma,Mix,Me,Au}	{1,2.5,3.5,5}	{2,3,4,5}
9	{No, Si}	{N,S}	{1,5}	{2.5,5}
10	{No en línea, En línea }	{NL,EL}	{1,5}	{2.5,5}
11	{Bajo, Medio, Alto}	{Bajo,Media,Alto}	{1,3,5}	{2,4,5}
12	{No, Si}	{N,S}	{1,5}	{2.5,5}

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-5 Salidas y rangos de valores de las características

Respuestas a característica	Valor y_r
Nunca	1
Menos del 30% de las veces	2
Entre el 30% y el 70% de las veces	3
Más del 70% de las veces	4
Siempre	5

Fuente: Elaboración propia.

Entonces, se establece la relación $x_{ia} = f(y_{ir})$, donde f puede ser cualquier función, en este caso proponemos una combinación lineal ponderada de un subconjunto de características y_{ir} dado por las ecuaciones (1) y (2).

$$x_{ia} = \sum_{r \in R_a} w_{ar} y_{ir} \quad \forall a \in A, i \in I \tag{1}$$

$$\sum_{r \in R_a} w_{ar} = 1 \quad \forall a \in A \tag{2}$$

La ecuación (1) define la función f como una combinación lineal ponderada del subconjunto $R_a \subseteq R$ de características y_{ir} para cada atributo $a \in A$ y cada grupo $i \in I$ con un peso w_{ar}. La ecuación (2) asegura que la suma de los pesos w_{ar} es igual a 1 para cada atributo $a \in A$. El subconjunto R_a de las características para cada atributo se presenta en la Tabla 3-6, y

representa las características que inciden en cada atributo y que se tienen en cuenta en la función f.

Tabla 3-6 Subconjunto de las características para cada atributo

a	R_a	a	R_a
1	1,2,3,4	7	7,22
2	5,6,7	8	23,24,25
3	8,9,10,11,12,13,14	9	9,26
4	15,16,17	10	27,28
5	18,19,20	11	29,3
6	1,3,21	12	7,22,31

Fuente: Elaboración propia.

El problema consiste en determinar los pesos w_{ar}. Se proponen dos enfoques de solución para resolver este problema. El primero es un modelo de optimización no lineal con el objetivo de minimizar la media de los errores cuadrados con el supuesto de que x_{ia} y y_{ir} son determinísticos y conocidos. El segundo es un método basado en ANFIS *(Adaptative Neuronal Fuzzy Inference System)* donde el supuesto de x_{ia} y y_{ir} están bajo incertidumbre, se pueden modelar como un conjunto difuso y tiene una función de pertenencia definida sobre un conjunto difuso. A continuación, se presentan los dos modelos desarrollados para el sistema de adquisición de conocimiento y los resultados obtenidos.

3.2.2.1 Modelo de optimización no lineal

Este modelo de optimización no lineal determina los pesos w_{ar}, para esto se emplea la relación definida previamente entre atributos y características. Los parámetros son: y_{ir} definido como el valor de cada característica r para cada grupo i; o_{ia} como la salida deseada de un grupo i de un atributo a; y, β_{ar} representa la contribución mínima de una característica r para un atributo a.

Para las variables de decisión, se tiene w_{ar} como la contribución de una característica r para un atributo a, x_{ia} es el valor de cada atributo a para cada grupo i, y e_{ia} como el error obtenido para un grupo i de un atributo a dado por la diferencia entre o_{ia} y x_{ia}.

Entonces, el modelo de optimización se plantea como:

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{a \in A} \frac{e_{ia}^2}{n} \tag{3}$$

s.a.,

$$e_{ia} = o_{ia} - x_{ia} \qquad \forall i \in I, a \in A \tag{4}$$

$$\sum_{r \in R_a} w_{ar} y_{ir} = x_{ia} \qquad \forall i \in I, a \in A \tag{5}$$

$$\sum_{r \in R_a} w_{ar} = 1 \qquad \forall a \in A \tag{6}$$

$$w_{ar} \geq \beta_{ar} \qquad \forall a \in A, r \in R \tag{7}$$

$$0 \leq w_{ar} \leq 1 \qquad \forall a \in A, r \in R \tag{8}$$

La función objetivo (3) consiste en minimizar la media de los errores cuadrados, la cual es una función no lineal. Las restricciones (4) calculan el error e_{ia} como la diferencia entre la salida deseada o_{ia} y la variable de decisión de cada atributo x_{ia}. Las restricciones (5) calculan

el valor de cada atributo x_{ia} como un promedio ponderado de las características $r \in R_a$. Las restricciones (6) aseguran que la suma de las contribuciones w_{ar} es 1. Las restricciones (7) establecen el mínimo valor de cada contribución w_{ar} y las restricciones (8) establecen las cotas inferior y superior de las variables w_{ar}.

3.2.2.2 Modelo ANFIS

En la literatura existen varias aplicaciones de redes neuronales artificiales y sistemas de inferencia difusos para resolver modelos de optimización no lineal. Deters et al., (2013) presentan un controlador difuso para ensamble de turbinas de viento. En (Secco & Magenes, 2002), una red neuronal se utiliza para emular un dedo humano para alcanzar una posición de la yema del dedo deseada en el espacio. Adicionalmente, ANFIS posee una ventaja en que solo es necesaria la calibración de pocos parámetros (Assaleh, 2007), en cuanto al número de épocas y el mecanismo de aprendizaje, en comparación con el desarrollo de la estructura de una red neuronal que contempla el número de capas, sus mecanismos de cálculo, actualización y aprendizaje, como los métodos que emplean NEFCLASS (Nauck, 2003).

Se propone emplear un método basado en ANFIS para resolver el problema de determinar el valor de cada atributo x_{ia}, como salida del método, en función del valor de la característica y_{ir}, que se asume como las entradas. Para ilustrar el funcionamiento del método ANFIS, se presenta la arquitectura basada en dos entradas x, y, con una salida z de acuerdo con (Geethanjali & Raja Slochanal, 2008; Jang, 1993). Se supone que la base de reglas es:

$$\text{Regla 1: If } x \text{ is } A_1 \text{ and } y \text{ is } B_1, \text{ then } z_1 = p_1 x + q_1 y + r_1. \tag{9}$$

$$\text{Regla 2: If } x \text{ is } A_2 \text{ and } y \text{ is } B_2, \text{ then } z_2 = p_2 x + q_2 y + r_2. \tag{10}$$

Las funciones de pertenencia y el razonamiento difuso son presentados en la Figura 3-6 y su equivalente ANFIS en Figura 3-7 .En este caso se consideran cinco capas para determinar la salida z.

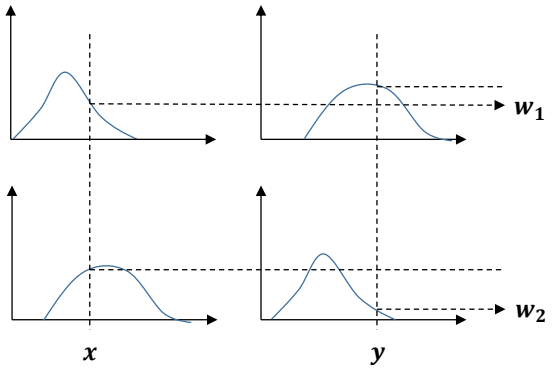


Figura 3-6. Funciones de pertenencia para el ejemplo.
Fuente: basada en (Geethanjali & Raja Slochanal, 2008)

Las funciones de cada nodo en la misma capa se establecen a continuación:

Capa 1. Cada nodo i es una capa con la siguiente función:

$$O_i^1 = \mu A_i(x), \tag{11}$$

donde x es la entrada del nodo i y A_i la variable lingüística (e.g., pequeño, grande, etc.), y $\mu A_i\ (x)$ es la función de pertenencia (MF, de *membership function*) con un rango entre 0 y 1. Esta MF debe ser una función diferenciable y continua, como uso común se usan MF trapezoidales o triangulares. Estos se conocen como parámetros de antecedentes (*premise parameters*).

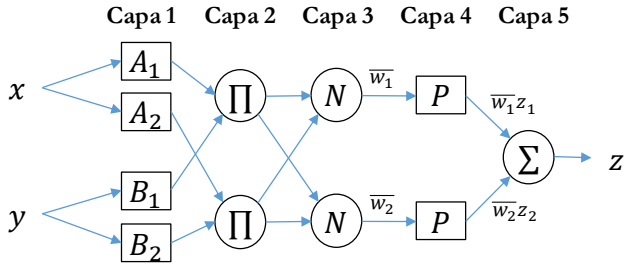


Figura 3-7. Arquitectura del ANFIS para el ejemplo.
Fuente: basada en (Geethanjali & Raja Slochanal, 2008).

Capa 2. Cada nodo en esta capa es marcado con el símbolo Π, que multiplica las señales entrantes y envía el producto como salida. Esta función es:

$$w_i = \mu A_i(x)\mu B_i(y) \quad , i = 1,2 \ldots. \tag{12}$$

Capa 3. Cada nodo en esta capa es etiquetado con N. El nodo i calcula el cociente el valor normalizado de w_i:

$$\overline{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \tag{13}$$

Capa 4. Cada nodo en esta capa es denotado por P con una función dada por:

$$O_i^4 = \overline{w}_i z_i = \overline{w}_i(p_i x + q_i y + r_i), \tag{14}$$

Donde w_i es la salida de la capa 3, y $\{p_i, q_i, r_i\}$ es el conjunto de parámetros. Estos parámetros se denominan parámetros consecuentes (*consequent parameters*).

Capa 5. El único nodo en esta capa se etiqueta con $\sum$. Este nodo calcula el total como la suma de todas las señales entrantes, es decir,

$$O_i^5 = \sum_i \overline{w}_i z_i = \frac{\sum_i w_i z_i}{\sum_i w_i}. \tag{15}$$

La red presentada es una red adaptativa que funciona equivalente a un modelo de inferencia difuso tipo Sugeno (Jang, 1993). Se emplea un algoritmo híbrido de aprendizaje (Geethanjali & Raja Slochanal, 2008) con propagación hacia adelante (*forward*), es decir, las señales de las funciones avanzan desde la capa 1 hasta la capa 4, y entonces los parámetros $\{p_i, q_i, r_i\}$ se calculan mediante la estimación de mínimos cuadrados ordinarios. Los parámetros de los antecedentes permanecen constantes después de aplicar el algoritmo del gradiente descendente para optimizarlos.

El método ANFIS integra redes neuronales y principios de lógica difusa basada en un sistema de inferencia difuso tipo Sugeno con aprendizaje neuro-adaptativo. La Figura 3-8 presenta la arquitectura propuesta utilizando el ANFIS descrito.

Las entradas corresponden a y_{ir} como el valor de cada característica $r \in R$ para un grupo $i \in I$, m_r como el número de funciones de pertenencia de una característica $r \in R$, μ_r como el tipo de funciones de pertenencia de una característica $r \in R$, y N como el número de épocas. La salida de ANFIS es x_{ia} como el valor de cada atributo $a \in A$ para un grupo $i \in I$. La Figura 3-9 muestra la representación de los conjuntos difusos para las características (a) y para el atributo coproducción (b). Se puede observar que cada salida se asume como una etiqueta lingüística y a se le asocia una función de pertenencia μ con un rango entre 0 y 1.

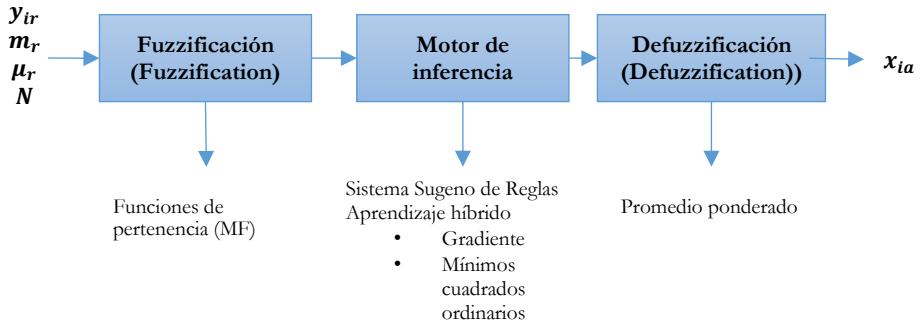


Figura 3-8. Arquitectura del ANFIS utilizado para la estimación de atributos.
Fuente: Elaboración propia.

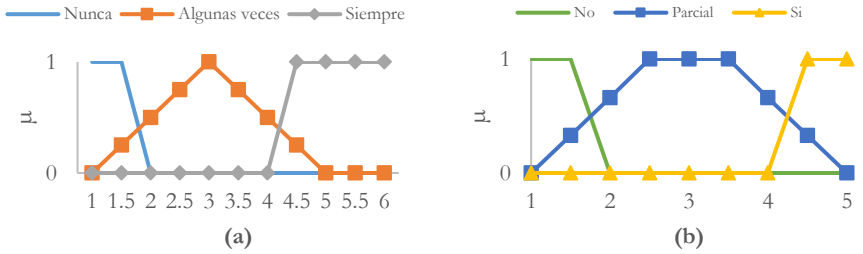


Figura 3-9. Ejemplo de representación de las funciones de pertenencia para (a) Características, (b) Atributo coproducción.
Fuente: Elaboración propia.

El método ANFIS se aplica sobre cada atributo dada por la ecuación (16), y calcula en cada iteración (época) el $RMSE_a$ que denota la raíz cuadrada media de error de cada atributo según la ecuación (17), donde e_{ia} es el error de un grupo i de un atributo a respecto a la salida deseada (o_{ia}) calculada con la ecuación (4).

$$x_{ia} = ANFIS_{r \in R_a}(y_{ir}, m_r, \mu_r, N), \qquad \forall a \in A. \tag{16}$$

$$RMSE_a = \sqrt{\sum_{i \in I} \sum_{a \in A} \frac{e_{ia}^2}{n}}, \qquad \forall a \in A. \tag{17}$$

3.2.2.3 Resultados del sistema de adquisición de conocimiento para el CCSS

En el Anexo E se presenta la base de conocimiento de los 12 atributos y en el Anexo F se muestra la base de conocimiento sobre las 31 características. Estas dos bases de conocimiento fueron definidas para los 246 grupos del CIIU a través de un estudio de expertos de cada una de las actividades económicas presentadas en cada grupo, en la cual cada experto respondió a

la adquisición de conocimiento mediante la lista de preguntas del Anexo D y se transformaron según lo explicado en la sección anterior.

Adicionalmente, la Tabla 3-7 presenta el número de MF (m_r) y el tipo de MFs (μ_r) como triangular (trimf), general bell (gbelmf) o trapezoidal (trapmf). El número de épocas fue de 40 para el método ANFIS. Ambos modelos se desarrollaron en Matlab 2018 ® y las bases de datos se manejaron en Microsoft Excel y Microsoft SQL 2017.

Tabla 3-7 Entradas del método ANFIS para el CCSS.

r	m_r	μ_r	r	m_r	μ_r	r	m_r	μ_r	r	m_r	μ_r
1	3	trimf	8	2	trapmf	16	3	gbellmf	24	3	trapmf
2	3	trapmf	9	3	gbellmf	17	3	gbellmf	26	3	trimf
3	3	gbellmf	10	3	gbellmf	18	3	gbellmf	27	3	trapmf
4	3	trapmf	11	2	trapmf	19	2	trapmf	28	3	trimf
5	3	trimf	13	2	trapmf	20	2	trapmf	29	3	trapmf
6	3	gbellmf	14	3	gbellmf	22	3	trimf	30	3	trimf
7	3	gbellmf	15	3	gbellmf	23	2	trapmf	31	3	trimf

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 3-8 presenta los resultados del $RMSE_a$ para el modelo de optimización no lineal y el método de ANFIS. Para todos los atributos, el método ANFIS obtiene mejores resultados respecto al $RMSE$, en promedio 36% menor en comparación con el modelo de optimización no lineal. La Figura 3-10 muestra los resultados de los datos de entrenamiento, el método ANFIS y el de optimización no lineal para el atributo coproducción. Por ejemplo, en los resultados de este atributo, el ANFIS es más cercano de los datos de entrenamiento que el resultado del modelo de optimización. Además, la Tabla 3-8 muestra los resultados para atributo coproducción (a=3) con un error de 1.456 y 0.525 para optimización y ANFIS, respectivamente. La mejora es cerca de 64% con el método ANFIS. Para los demás atributos, la curva ANFIS está más cerca de los datos de entrenamiento, que la curva de optimización como se puede observar en el Anexo G. Adicionalmente, el método ANFIS es más flexible para cambiar los valores en las entradas que el enfoque de optimización no lineal.

Tabla 3-8 Resultados del error promedio para el modelo optimización no lineal y ANFIS aplicación a sistema CIIU

a	Optimización no lineal	ANFIS	Mejora (%)
1	1.223	0.718	41%
2	1.865	1.197	36%
3	1.456	0.525	64%
4	1.244	1.003	19%
5	1.375	0.987	28%
6	1.405	1.185	16%
7	1.608	0.955	41%
8	0.944	0.657	30%
9	2.571	1.038	60%
10	1.490	1.349	9%
11	1.709	0.922	46%
12	1.497	0.846	44%
Promedio	1.532	0.948	36%

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, al analizar el enfoque ANFIS se puede obtener la superficie de respuesta para cada atributo respecto a sus características. La Figura 3-11 muestra la superficie de respuesta del atributo coproducción con sus características de acuerdo con la Tabla 3-6. Por ejemplo, las características: presencia y comportamiento, influyen negativamente a la coproducción, como la disminución de la presencia y el comportamiento hacen que la coproducción crezca, es decir, si el cliente no debe estar en el lugar de proveedor (presencia es baja) y si es posible que comportamiento del cliente afecta actividad del proveedor, entonces el sistema tiene un

atributo de coproducción alta. Además, es posible explorar las diferentes combinaciones de estas características y otras con el fin de obtener el valor de coproducción. El resto de los atributos puede analizarse de manera similar con sus características. En el Anexo G se presenta los resultados detallados para cada uno de los atributos en sus superficies de respuesta.

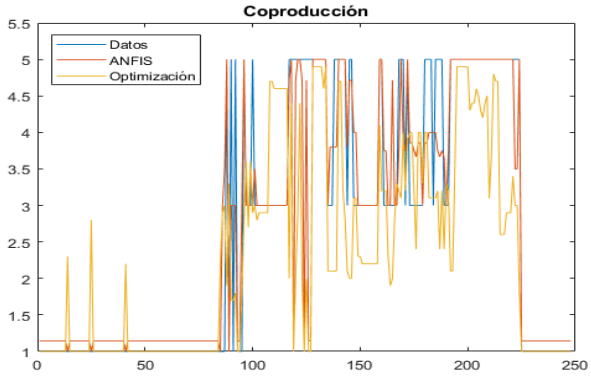


Figura 3-10. Resultados del atributo coproducción para los datos de entrenamiento, ANFIS y optimización.
Fuente: Elaboración propia.

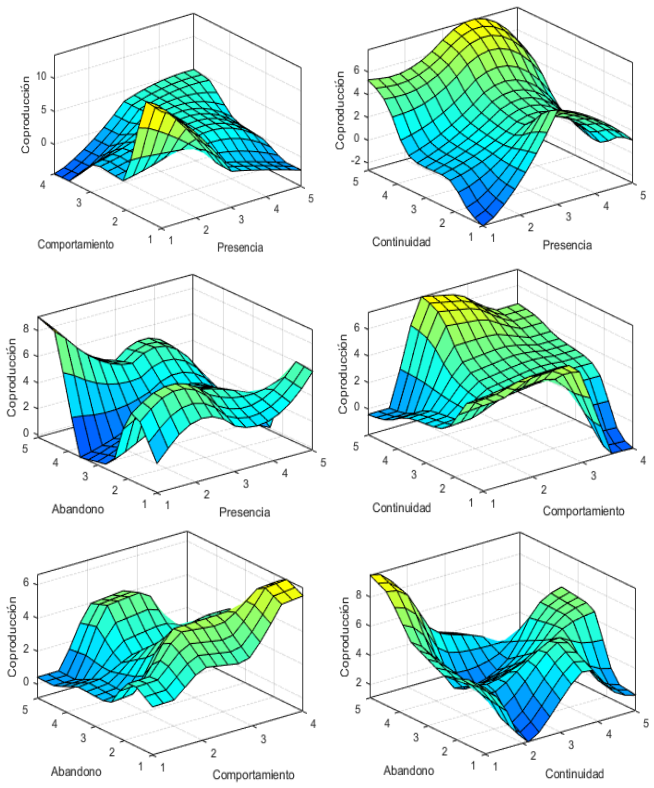


Figura 3-11. Superficie de respuesta para atributo de coproducción.
Fuente: Elaboración propia.

Dado estos resultados se decide emplear el método basado en ANFIS para el sistema de adquisición de conocimiento ya que el error encontrado fue menor frente al modelo de optimización no lineal y que permite una flexibilidad mayor en cuanto a la utilización de incertidumbre en la información recolectada por los expertos.

3.2.3 Motor de inferencia para clasificación de sistemas de servicios

Para el diseño de las reglas de decisión en el motor de inferencia se emplea un sistema de generación de reglas basado en algoritmos de clasificación sobre la base de conocimiento para el conjunto de atributos dada en el Anexo E. A continuación, se describen primero la estructura del sistema basado en reglas (SBR) y luego los resultados obtenidos.

3.2.3.1 Sistema basado en reglas (SBR) para el CCSS

El SBR se construye empleando WEKA 3.8 debido a su versatilidad para el tratamiento de información y la posibilidad de incluir información de tipo cualitativa (Hall et al., 2009). Por otro lado, para la representación del conocimiento se emplean reglas las cuales se construyen mediante los métodos de clasificación presentados en la Tabla 3-9 para ser comparados y obtener el mejor sistema de clasificación.

Tabla 3-9 Algoritmos de clasificación considerados para el motor de inferencia del CCSS

Método	Descripción
Cero Reglas  ZeroR	Este método consiste en predecir de acuerdo con la moda de la clase de salida.
Una Regla  OneR	Utiliza el atributo que genera el mínimo error en la clasificación, propuesto en (Holte, 1993).
Bayesiano Ingenuo  Naive Bayes	Este método emplea la probabilidad condicional para seleccionar en cada atributo la mejor clasificación de acuerdo a las frecuencias relativas y luego selecciona el mejor atributo (John & Langley, 1995).
Arboles J48  J483	Este es basado en Algoritmo para la generación de árboles C4.5 que emplea la entropía de la información (Quinlan, 1993).
Decision Stump  Decision Stump	Realiza una regresión (basado en error cuadrático medio) o la clasificación (basado en la entropía).

Fuente: Elaboración propia.

El siguiente paso consiste en la evaluación de las reglas, empleando el método de validación cruzada y se elige aquel método que tenga el mejor desempeño respecto al porcentaje de instancias clasificadas correctamente. El flujograma de conocimiento representado en WEKA para el algoritmo J48 se presenta en la Figura 3-12. Para los demás algoritmos el esquema es similar cambiando el icono J48 por el algoritmo específico de la Tabla 3-9.

3.2.3.2 Resultados del motor de inferencia para el CCSS

La base de conocimiento para este proceso corresponde a los 12 atributos para cada grupo considerando estos como instancias a ser clasificadas en una clase. La clase en este caso corresponde al Sector, Sección y División definidos en la Tabla 3-2. Entonces para realizar la clasificación, se define siete experimentos descritos en la Tabla 3-10 con el fin de identificar la mejor manera de clasificar los grupos en cada división como resultado final. Para esto en

cada experimento se debe aplicar el SBR descrito con los 5 métodos de clasificación presentados en la Tabla 3-9 sobre los 12 atributos.

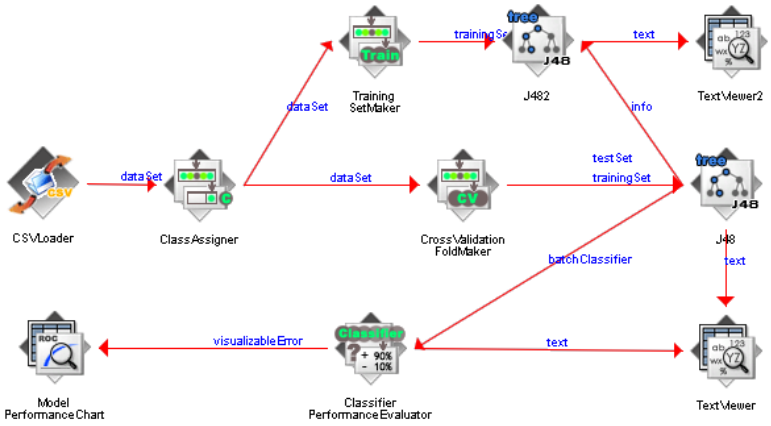


Figura 3-12. Flujograma de conocimiento en WEKA para algoritmo J48 en el CCSS.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3-10 Listado de experimentos para el CCSS

Experimento	Descripción
1	Realizar la clasificación de acuerdo al *Sector*.
2	Realizar la clasificación de acuerdo a la *Sección*.
3	Realizar la clasificación de acuerdo a la *División*.
4	Con los resultados del Experimento 1. Realizar la clasificación de acuerdo a la *Sección*.
5	Con los resultados del Experimento 1. Realizar la clasificación de acuerdo a la *División*.
6	Con los resultados del Experimento 2. Realizar la clasificación de acuerdo a la *División*
7	Con los resultados del Experimento 4. Realizar la clasificación de acuerdo a la *División*

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de estos experimentos se muestran en la Tabla 3-11 con el porcentaje de instancias clasificadas correctamente.

Tabla 3-11 Resultados de los experimentos para el motor de inferencia del CCSS

Experimento	% de instancias clasificadas correctamente (desviación estándar)				
	Cero Reglas	Una Regla	Bayesiano Ingenuo	J 48	Decision Stump
Test1Sector	55.42	89.56	98.79	99.19	89.56
Test2Seccion	30.92	41.36	76.73	81.44	38.55
Test3Division	3.21	9.19	28.68	29.71	6.58
Test4Seccion-Sector	30.92	41.52	76.81	80.84	38.55
Test5-Division-Sector	3.21	8.63	27.24	28.47	6.66
Test6-Division-Seccion	3.21	25.14	28.45	38.6	6.58
Test7-Division-all	3.21	25.14	26.48	38.88	6.66

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la clasificación por *Sector* el mejor resultado se obtuvo con el algoritmo de árboles J48 con un 99.20% de instancias clasificadas correctamente. En este caso la clase de salida tiene 3 posibles valores que se intentan clasificar, el árbol se puede observar en la Figura 3-13, donde la Propiedad es el único atributo que explica la clasificación.

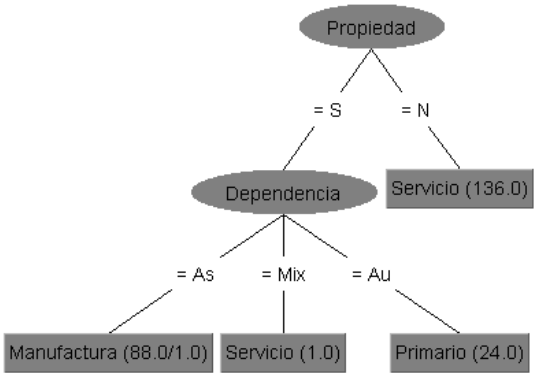


Figura 3-13. Árbol de clasificación J48 para el *Sector.*
Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la clasificación por *Sección* donde se intentan clasificar 21 categorías, se comparan los experimentos 2 y 4, donde el mejor es el número 2 con 81.44% de instancias clasificadas correctamente mediante el método de Árbol J48. En este caso la clasificación por sección no debe tener en cuenta la clasificación por sector, ya que su resultado es menor. La estructura del árbol se puede observar en la Figura 3-14, en este caso la Propiedad es el nodo inicial de donde empiezan a desprenderse las ramificaciones para clasificación coincidiendo con el resultado de la Figura 3-13.

Respecto a la clasificación por *División* (con 88 valores posibles) se deben comparar los experimentos 3, 5, 6 y 7. El mejor resultado lo presenta el experimento 7 con un 38.88% de instancias clasificadas correctamente. Este experimento tiene en cuenta los resultados del experimento 4, donde la clasificación por sección fue realizada con los resultados del experimento 1 donde se clasifico el sector. Es decir, esta clasificación utiliza la información obtenida de manera secuencial para el sector y la sección con la aplicación de los algoritmos J48. El segundo mejor resultado fue el experimento 6, con 38.6% en cuyo caso se emplea la clasificación por sección sin tener en cuenta la clasificación por sector (experimento 2). En el experimento 5 utilizando la clasificación por sector se obtiene un 28.47% siendo el peor resultado, mientras que en el experimento 3 al clasificar la división sin tener en cuenta el sector y la sección se obtiene un 29.71 % de instancias clasificadas correctamente.

Estos resultados sugieren que para clasificar las actividades respecto a la División se debe tener en cuenta las clasificaciones por Sector y por Sección, mejorando en 10.41%. El árbol para esta clasificación se puede observar en la Figura 3-15, en este caso el árbol tiene como nodo inicial la sección para empezar a ramificar las posibles clasificaciones.

Finalmente, el esquema de clasificación consiste en ejecutar los experimentos empezando con el número 1 para identificar el sector, continua con el 4 para la sección y finaliza con el 7 para la división. Con este esquema y los modelos presentados para el sistema de adquisición de conocimiento se completa el CCSS, que permite clasificar una empresa de acuerdo con la información que se perciba de los atributos definidos y estos a su vez de las características. Este resultado puede ser empleado por empresas que no puedan identificar su actividad económica y por las entidades encargadas de la consolidación de la información con fines estadísticos como el DANE.

```
Propiedad = S
|  Dependencia = As
|  |  Estandarización = Alto: SECCIÓN C (78.0/4.0)
|  |  Estandarización = Media
|  |  |  Lugar = Pr: SECCIÓN F (0.0)
|  |  |  Lugar = Mix: SECCIÓN J (2.0)
|  |  |  Lugar = Us: SECCIÓN F (7.0)
|  |  Estandarización = Bajo: SECCIÓN C (1.0)
|  Dependencia = Mix: SECCIÓN C (1.0)
|  Dependencia = Au
|  |  Tecnología = Mix: SECCIÓN A (3.0)
|  |  Tecnología = Me: SECCIÓN B (11.0)
|  |  Tecnología = Au: SECCIÓN A (0.0)
|  |  Tecnología = Ma: SECCIÓN A (10.0)
Propiedad = N
|  Acumulación = N
|  |  Tecnología = Mix
|  |  |  Coproducción = N: SECCIÓN K (0.0)
|  |  |  Coproducción = S
|  |  |  |  Agendado = Ag: SECCIÓN M (3.0/1.0)
|  |  |  |  Agendado = Mix: SECCIÓN S (4.0/1.0)
|  |  |  |  Agendado = N: SECCIÓN I (3.0/1.0)
|  |  |  Coproducción = P
|  |  |  |  Lugar = Pr: SECCIÓN K (8.0)
|  |  |  |  Lugar = Mix
|  |  |  |  |  Agendado = Ag: SECCIÓN M (0.0)
|  |  |  |  |  Agendado = Mix: SECCIÓN M (4.0)
|  |  |  |  |  Agendado = N: SECCIÓN K (2.0)
|  |  |  |  Lugar = Us: SECCIÓN N (1.0)
|  |  Tecnología = Me
|  |  |  Coproducción = N: SECCIÓN D (2.0/1.0)
|  |  |  Coproducción = S: SECCIÓN H (11.0/1.0)
|  |  |  Coproducción = P: SECCIÓN H (0.0)
|  |  Tecnología = Au: SECCIÓN J (12.0/1.0)
|  |  Tecnología = Ma
|  |  |  Durabilidad = P: SECCIÓN Q (9.0)
|  |  |  Durabilidad = NP
|  |  |  |  Estandarización = Alto: SECCIÓN P (2.0)
|  |  |  |  Estandarización = Media
|  |  |  |  |  Lugar = Pr: SECCIÓN P (2.0)
|  |  |  |  |  Lugar = Mix: SECCIÓN P (3.0/1.0)
|  |  |  |  |  Lugar = Us: SECCIÓN N (3.0/1.0)
|  |  |  |  Estandarización = Bajo
|  |  |  |  |  Simultaneidad = NL
|  |  |  |  |  |  Coproducción = N: SECCIÓN N (0.0)
|  |  |  |  |  |  Coproducción = S
|  |  |  |  |  |  |  Lugar = Pr: SECCIÓN O (1.0)
|  |  |  |  |  |  |  Lugar = Mix: SECCIÓN M (2.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  Lugar = Us: SECCIÓN T  (6.0/3.0)
|  |  |  |  |  |  Coproducción = P: SECCIÓN N (9.0/2.0)
|  |  |  |  |  Simultaneidad = EL
|  |  |  |  |  |  Agendado = Ag: SECCIÓN N (2.0)
|  |  |  |  |  |  Agendado = Mix
|  |  |  |  |  |  |  Lugar = Pr: SECCIÓN R  (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  Lugar = Mix: SECCIÓN R  (8.0/5.0)
|  |  |  |  |  |  |  Lugar = Us: SECCIÓN N (6.0/2.0)
|  |  |  |  |  |  Agendado = N: SECCIÓN I (4.0)
|  Acumulación = S
|  |  Tecnología = Mix: SECCIÓN M (3.0)
|  |  Tecnología = Me: SECCIÓN E (3.0)
|  |  Tecnología = Au: SECCIÓN J (1.0)
|  |  Tecnología = Ma: SECCIÓN G (20.0)

Size of the tree :          63
```

Figura 3-14. Árbol de Clasificación J48 para la S*ección.*
Fuente: Elaboración propia.

```
Seccion = SECCIÓN C
|   Flexibilidad = N
|   |   Tecnología = Mix
|   |   |   Durabilidad = P: D10 (4.0)
|   |   |   Durabilidad = NP: D30 (9.0/4.0)
|   |   Tecnología = Me
|   |   |   Durabilidad = P: D10 (3.0)
|   |   |   Durabilidad = NP: D24 (17.0/14.0)
|   |   Tecnología = Au: D26 (32.0/24.0)
|   |   Tecnología = Ma: D16 (5.0/1.0)
|   Flexibilidad = S
|   |   Estandarización = Alto: D14 (4.0/1.0)
|   |   Estandarización = Media: D18 (1.0)
|   |   Estandarización = Bajo: D33 (2.0)
Seccion = SECCIÓN D: D35 (4.0)
Seccion = SECCIÓN E
|   Tipo = Manufactura: D36 (2.0/1.0)
|   Tipo = Servicio: D38 (4.0/1.0)
|   Tipo = Primario: D38 (0.0)
Seccion = SECCIÓN F: D43 (8.0/4.0)
Seccion = SECCIÓN J
|   Estandarización = Alto: D60 (2.0)
|   Estandarización = Media
|   |   Tipo = Manufactura: D59 (2.0)
|   |   Tipo = Servicio
|   |   |   Naturaleza = T: D58 (2.0)
|   |   |   Naturaleza = I: D59 (2.0/1.0)
|   |   Tipo = Primario: D59 (0.0)
|   Estandarización = Bajo
|   |   Dependencia = As: D61 (4.0)
|   |   Dependencia = Mix: D63 (2.0)
|   |   Dependencia = Au: D61 (0.0)
Seccion = SECCIÓN G
|   Agendado = Ag: D47 (0.0)
|   Agendado = Mix: D45 (2.0)
|   Agendado = N
|   |   Durabilidad = P: D46 (4.0/1.0)
|   |   Durabilidad = NP: D47 (14.0/6.0)
Seccion = SECCIÓN H
|   Flexibilidad = N
|   |   Estandarización = Alto: D49 (2.0)
|   |   Estandarización = Media: D50 (3.0/1.0)
|   |   Estandarización = Bajo: D49 (0.0)
|   Flexibilidad = S
|   |   Estandarización = Alto: D51 (2.0)
|   |   Estandarización = Media: D53 (2.0)
|   |   Estandarización = Bajo: D52 (2.0)
Seccion = SECCIÓN I
|   Naturaleza = T: D56 (2.0)
|   Naturaleza = I: D55 (5.0/1.0)
Seccion = SECCIÓN K
|   Agendado = Ag: D64 (0.0)
|   Agendado = Mix: D65 (4.0/1.0)
|   Agendado = N: D64 (6.0/2.0)
Seccion = SECCIÓN L: D68 (2.0)
Seccion = SECCIÓN M
|   Tecnología = Mix
|   |   Acumulación = N
|   |   |   Coproducción = N: D74 (0.0)
|   |   |   Coproducción = S: D74 (3.0/1.0)
|   |   |   Coproducción = P: D70 (4.0/2.0)
|   |   Acumulación = S: D72 (3.0/1.0)
|   Tecnología = Me: D75 (1.0)
|   Tecnología = Au: D74 (0.0)
|   Tecnología = Ma: D69 (3.0/1.0)
Seccion = SECCIÓN N
|   Lugar = Pr: D78 (2.0)
|   Lugar = Mix
|   |   Coproducción = N: D77 (0.0)
|   |   Coproducción = S: D79 (2.0)
|   |   Coproducción = P: D77 (5.0/1.0)
|   Lugar = Us
|   |   Agendado = Ag: D80 (4.0/1.0)
|   |   Agendado = Mix
|   |   |   Coproducción = N: D82 (0.0)
|   |   |   Coproducción = S: D81 (3.0/1.0)
|   |   |   Coproducción = P: D82 (2.0)
|   |   Agendado = N: D82 (1.0)
Seccion = SECCIÓN O: D84 (3.0)
Seccion = SECCIÓN P: D85 (6.0)
Seccion = SECCIÓN Q
|   Lugar = Pr: D87 (3.0/1.0)
|   Lugar = Mix: D86 (3.0/1.0)
|   Lugar = Us: D87 (3.0/1.0)
Seccion = SECCIÓN R
|   Dependencia = As: D90 (3.0/2.0)
|   Dependencia = Mix: D93 (2.0)
|   Dependencia = Au: D93 (0.0)
Seccion = SECCIÓN S
|   Tecnología = Mix: D95 (3.0/1.0)
|   Tecnología = Me: D94 (0.0)
|   Tecnología = Au: D94 (0.0)
|   Tecnología = Ma: D94 (3.0)
Seccion = SECCIÓN T : D98 (3.0/1.0)
Seccion = SECCIÓN U: D99 (1.0)
Seccion = SECCIÓN A
|   Tecnología = Mix: D02 (3.0)
|   Tecnología = Me: D01 (0.0)
|   Tecnología = Au: D01 (0.0)
|   Tecnología = Ma: D01 (10.0/3.0)
Seccion = SECCIÓN B
|   Lugar = Pr: D08 (0.0)
|   Lugar = Mix: D09 (2.0)
|   Lugar = Us: D08 (9.0/6.0)

Size of the tree :      106
```

Figura 3-15. Árbol de Clasificación J48 para la *División.*
Fuente: Elaboración propia.

3.2.4 Operación del sistema experto para clasificación de sistemas de servicios

Los componentes de base de conocimiento y motor de inferencia descritos en las secciones previas son los elementos principales del SE para el CCSS, entonces el modo de operación de este SE es presentado en la Figura 3-16 indicado el software empleado en cada proceso.

De esta forma el SE para el CCSS tiene dos maneras de ejecución: 1). clasificación completa (adquisición de conocimiento y clasificación de actividades); y, 2) clasificación de actividades económicas directa. La opción 1 (Op.1) es la que emplea el proceso de adquisición de conocimiento del usuario y el modelo de transformación de conocimiento basado en ANFIS para transformar las características a atributos, y luego proceder a la clasificación de actividad económica. La manera de la opción 2 (Op.2) empieza por la definición directa de los valores nominales de los atributos y procede a la clasificación de actividades económicas.

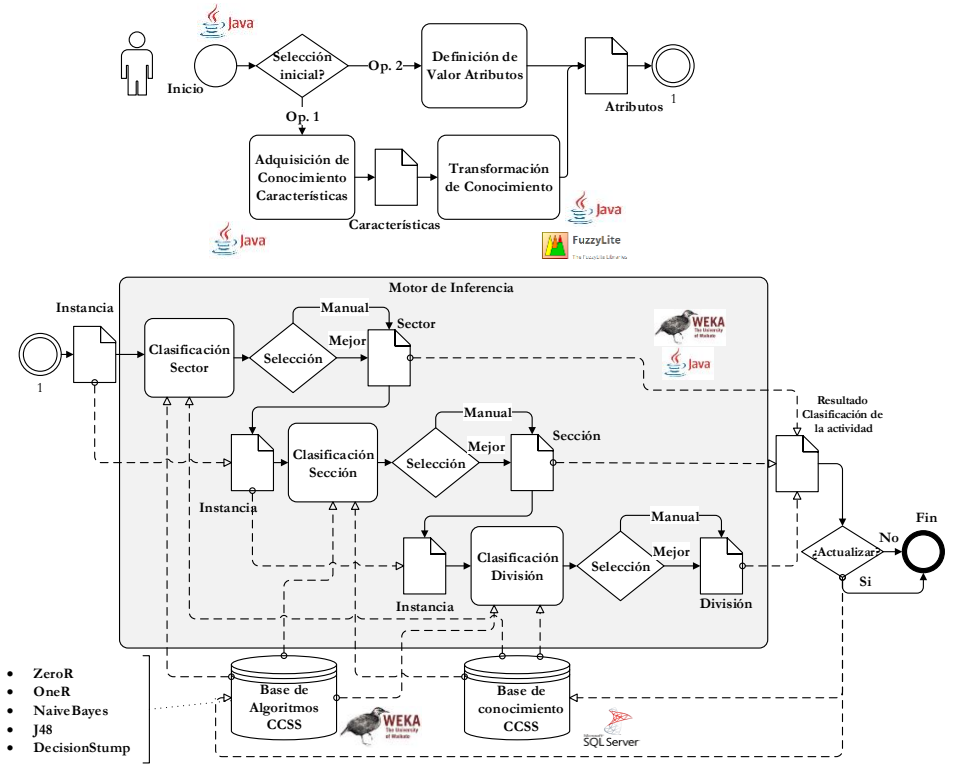


Figura 3-16. Diagrama de flujo de operaciones de SE para el CCSS
Fuente: Elaboración propia.

La operación del SE empieza con el usuario a quien se le indaga sobre las características de su actividad económica con el objetivo de identificar el valor de las características o de los atributos, es decir el usuario puede empezar a determinar las características o ingresar el valor de los atributos directamente. En caso de iniciar el proceso con las características, el usuario debe responder las preguntas listadas en el Anexo D. Seguido a este se procede a transformar estos valores en valores numéricos según la escala presentada en la sección 3.2.2, y aplicar el método ANFIS descrito. Luego se procede a transformar el valor numérico de los atributos a su correspondiente valor nominal para construir una instancia compuesta por 12 valores de los atributos. El siguiente paso consiste en realizar la clasificación por sector aplicando el SBR presentado en la Figura 3-13, aunque se puede ejecutar los cuatro algoritmos presentados en la Tabla 3-9 o seleccionar el de mejor resultado, o seleccionar el sector directamente. Esto permite dar flexibilidad a la propuesta de SE, según convenga en cada caso.

Dada la clasificación del sector, este resultado se adiciona a la instancia para ejecutar el SBR correspondiente a la sección, el cual fue presentado en la Figura 3-14, o de la misma manera que en el sector, se pueden ejecutar los cuatro algoritmos presentados en la Tabla 3-9 o seleccionar el de mejor resultado, o seleccionar la sección directamente.

Una vez ya se tenga el resultado de la sección, este es agregado a la instancia para proceder con la ejecución del SBR correspondiente a la división según la Figura 3-15, de forma recursiva se pueden ejecutar los cuatro algoritmos presentados en la Tabla 3-9, o seleccionar el de mejor resultado, o seleccionar la sección directamente. De esta manera se completa la clasificación de actividad económica del CCSS.

Un mecanismo de actualización que se propone consiste en que la nueva instancia y su clasificación obtenida por el usuario se pueda adicionar a la base de conocimiento de los atributos o crear una nueva base de conocimiento que permita ejecutar un contraste de evaluación. De la misma manera, se propone que los resultados de las características alimenten la base de conocimiento de las características o una nueva base de conocimiento para evaluación.

Finalmente, en esta sección se presentó los componentes principales del SE para el CCSS el cual permite identificar el tipo de sector, sección, y división de una actividad económica. Los resultados obtenidos hasta este punto son utilizados como información de entrada para el SE en el CPT (ver Figura 3-1) que se describirá en la siguiente sección, el cual permitirá identificar el tipo de problema, la medida de desempeño y la técnica de solución.

3.3 Sistema experto para el Componente de Programación de Tareas

Esta sección[5] presenta los componentes del SE para el CPT según se presentó en la Figura 3-3. Primero se describe la base de conocimiento empleada para el CPT. En el segundo apartado se muestra el diseño del motor de inferencia para el CPT. Por último, en el tercer apartado se describe el funcionamiento operativo del SE del CPT.

3.3.1 Base de conocimiento para el componente de programación de tareas

Para determinar los tipos de problemas de programación de tareas y las técnicas de solución se emplea la notación propuesta en la sección 2.3.2 denotada por $C|R|F|\gamma$, donde C es el Cliente, R es el Recurso, F es el Control de Flujo, y por último γ es la Medida de desempeño.

Para la base de conocimiento se emplea la información recolectada en la caracterización de la notación presentada en la sección 2.3.3, entonces se tiene una muestra de 498 registros y 70 variables. Esta información (Anexo I) se obtuvo a través de revisión bibliográfica y corresponde al conocimiento de expertos en problemas de programación de tareas que lo han plasmado en publicaciones científicas.

Las 70 variables corresponden según el campo a 22 del cliente, 21 del recurso, 19 del control de flujo, 5 de la medida de desempeño y 3 que corresponden al tipo de problema, al tipo de medida de desempeño y al grupo de técnicas de solución. El tipo de problema hace referencia a las categorías definidas como: programación (*Sch*), Ruteo (*Rou*) y la combinación de Programación-Ruteo (*Sch*&*Rou*). El tipo de medida de desempeño se refiere a los cuatro parámetros del componente criterio del campo medida de desempeño γ de la notación propuesta: Cliente, Recursos, Programación y Ruteo, sin embargo, se adicionan dos de las intersecciones dadas como Cliente-Recursos y Programación-Ruteo, de esta forma esta salida tiene 6 valores posibles. Finalmente, el grupo de técnicas corresponde a las categorías definidas como: Optimización, Modelos Estocásticos, Heurísticas, y Metaheurísticas; de acuerdo con la sección 2.1.2.3. Estas tres últimas variables corresponden a las salidas definidas del SE general según la Figura 3-1 y a los tres componentes del motor de inferencia para el

[5] El contenido de esta sección se basa en el trabajo publicado en *Data Mining and Big Data* (E. López-Santana, Méndez-Giraldo, et al., 2018b). El trabajo se desarrolló en colaboración con el profesor PhD. José Ignacio Rodríguez-Molano de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, quien colaboro con el desarrollo del prototipo computacional para el establecimiento de los SBR.

CPT de la Figura 3-3. Estos componentes se ejecutan en cascada para el diseño del sistema basado en reglas en el motor de inferencia.

3.3.2 Motor de inferencia para el componente de programación de tareas

Para el motor de inferencia se construyen tres sistemas basados en reglas (SBR) para determinar el tipo de problema, el tipo de medida de desempeño y el grupo de técnica de solución. Para el diseño de las reglas de decisión para el motor de inferencia se emplea un sistema de generación de reglas basado en algoritmos de clasificación sobre la base de conocimiento presentada en el Anexo I. A continuación, se describen primero la estructura del SBR y luego los resultados obtenidos.

3.3.2.1 Sistema basado en reglas (SBR) para el CPT

Cada SBR se construye empleando WEKA 3.8. y empleando los métodos de clasificación presentados en la Tabla 3-12 para ser comparados.

Tabla 3-12 Algoritmos de clasificación considerados para el SBR del CPT

Método	Descripción
Tabla de Decisión  DecisionTable	Consiste en determinar la clase construyendo una tabla de decisión principal
PART  PART	PART es un método basado en separar y conquistar como estrategia de búsqueda. Este construye arboles C4.5 en cada iteración y escoge el mejor y lo convierte en una regla.
Arboles J48  J483	Este es basado en Algoritmo para la generación de árboles C4.5 que emplea la entropía de la información (Quinlan, 1993).
Decision Stump  Decision Stump	Realiza una regresión (basado en error cuadrático medio) o la clasificación (basado en la entropía).
REPTree  REPTree	Es un algoritmo de rápido aprendiz sobre árbol de decisión. Construye un árbol de decisión o regresión usando ganancia / varianza de información y lo poda usando errores reducidos (con ajuste posterior).

Fuente: Elaboración propia.

El siguiente paso consiste en la evaluación de las reglas, empleando el método de validación cruzada y se elige aquel método que tenga el mejor desempeño respecto al porcentaje de instancias clasificadas correctamente. El flujograma de conocimiento representado en WEKA para el algoritmo PART se presenta en la Figura 3-17 sobre la base de conocimiento específica. Para los demás algoritmos se procede de manera similar al CCSS, cambiando el icono del algoritmo según la Tabla 3-12.

Se deben diseñar los SBR para cada una de las tres salidas definidas: tipo de problema, tipo de medida de desempeño, y grupo de técnica. En las siguientes tres secciones se presentan estos resultados.

3.3.2.2 Resultados del SBR para el tipo de problema

Para realizar la clasificación del tipo de problema, se define cuatro experimentos descritos en la Tabla 3-13 con los 5 métodos de clasificación presentados en la Tabla 3-12.

Tabla 3-13 Listado de experimentos de clasificación para el CPT

Experimento	Descripción
1	Con la base de conocimiento respecto a Cliente.
2	Con la base de conocimiento respecto a Recurso.
3	Con la base de conocimiento respecto a Control de Flujo.
4	Con la base de conocimiento completa.

Fuente: Elaboración propia.

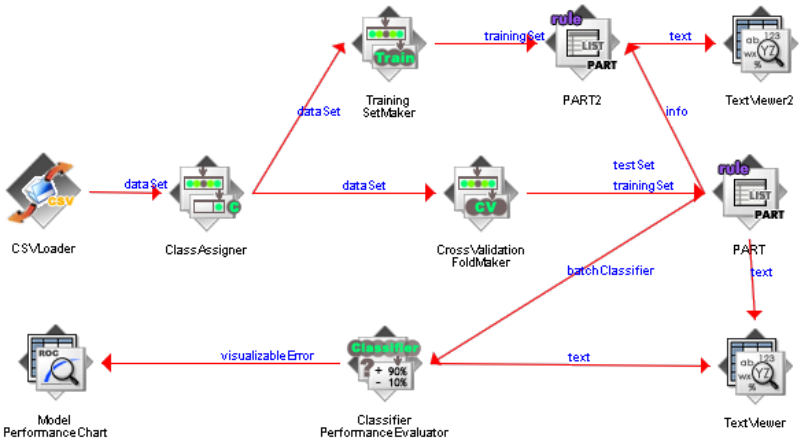


Figura 3-17. Flujograma de conocimiento en WEKA para algoritmo PART para el CPT.
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de estos experimentos se muestran en la Tabla 3-14 con el porcentaje de instancias clasificadas correctamente y la desviación estándar.

Tabla 3-14 Resultados de los experimentos para el SBR de tipo de problema

Experimento	% de instancias clasificadas correctamente (desviación estándar)				
	J48	DecisionTable	PART	Decision Stump	REPTree
1	72.06(5.77)	67.26(6.71)	68.44(5.95)	67.00(3.50)	71.54(6.00)
2	64.04(6.02)	62.08(5.04)	60.80(5.96)	59.40(3.63)	64.70(5.90)
3	61.76(5.57)	59.16(6.67)	57.96(6.72)	55.60(4.49)	60.72(6.01)
4	71.06(5.05)	74.44(6.14)	65.38(5.89)	67.00(3.50)	74.08(5.52)
Promedio	67.23	65.74	63.14	62.25	67.76

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la clasificación por *tipo de problema,* en el experimento para el campo Cliente el mejor resultado se obtuvo con el algoritmo J48 72.06% de instancias clasificadas correctamente y una desviación del 5.77%, aunque la menor desviación la tiene el de Decision Stump. En el experimento 2 para el campo Recurso el mejor resultado fue para el algoritmo REPTree con un 64.70% de instancias clasificadas correctamente, aunque la menor desviación fue para Decision Stump con 2.02%. Para el tercer experimento, del campo control de flujo el mejor resultado fue para J48 con 61.76% de instancias clasificadas correctamente y una desviación de 5.57%. Por otro lado, cuando se consideran todos los campos en la base de conocimiento, el mejor resultado es para DecisionTable con 74.44% de instancias clasificadas correctamente, y desviación de 6-14%. En promedio el mejor resultado lo obtuvo REPTree con 67.76%, seguida de J48 con 67.23%. En cuanto a la menor desviación, para todos los experimentos el mejor resultado fue para el algoritmo de DecisionStump.

Estos resultados no reflejan un favorecimiento en considerar los campos de la notación de forma separada o en conjunto, debido a que los resultados son muy similares, sin embargo, dado que los algoritmos J48 y REPTree permiten obtener reglas en formato de árbol y sus resultados fueron buenos para varios de los experimentos, se decide utilizarlos para obtener

las reglas. Entonces, en el Anexo K se presentan las reglas obtenidas para el tipo de problema para el campo de cliente (algoritmo J48), el campo de recurso (algoritmo REPTree), el campo de control de flujo (algoritmo J48) y considerando toda la notación completa , donde CLI representa el campo cliente, REC representa recurso, y CON control de flujo.

Entonces para determinar el tipo de problema se aplican los SBR para cada campo de la notación y de acuerdo a los resultados el usuario podrá seleccionar si trabaja el problema de forma conjunta con un solo resultado o trabaja el problema de forma separada con un tipo de problema para cada campo de la notación.

3.3.2.3 Resultados del SBR para el tipo de medida de desempeño

El tipo de medida de desempeño consiste en dos componentes: el número de criterios y el tipo de criterio.

Para el número de criterios, se definen cuatro experimentos según la Tabla 3-13 con los 5 métodos de clasificación presentados en la Tabla 3-12. Los resultados de estos experimentos se muestran en la Tabla 3-15 con el porcentaje de instancias clasificadas correctamente y la desviación estándar.

Tabla 3-15 Resultados de los experimentos para el SBR del número de criterios.

Experimento	% de instancias clasificadas correctamente (desviación estándar)				
	J48	DecisionTable	PART	Decision Stump	REPTree
1	60.46(5.81)	60.62(4.68)	59.46(6.35)	62.80(1.58)	60.16(4.34)
2	60.42(5.77)	58.42(5.57)	57.86(6.82)	61.72(0.70)	60.32(5.22)
3	59.22(6.16)	58.46(5.66)	57.36(6.35)	61.80(0.60)	60.04(5.15)
4	61.00(5.86)	59.60(5.36)	59.24(7.34)	62.24(1.31)	60.42(5.49)
Promedio	60.27	59.27	58.48	62.14	60.24

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados encontrados muestran que para este criterio el mejor método es DecisionStump en cuanto a las instancias clasificadas correctamente y la desviación, seguida del método J48. Aunque el método de DecisionStump obtuvo los mejores resultados, su representación consiste en una distribución de la salida respecto a solo un criterio, por tanto, se muestran los arboles de decisión obtenidos con el algoritmo J48. En el Anexo L se presentan los resultados para el número de criterios empelando el algoritmo J48 para presentar las reglas obtenidas para cada uno de los campos de la notación por separado y para la notación completa.

Entonces para determinar el número de criterios se aplican los SBR para cada campo de la notación y de acuerdo con los resultados el usuario podrá seleccionar si trabaja el problema de forma conjunta con un solo resultado o trabaja el problema de forma separada con un tipo de problema para cada campo de la notación.

Para realizar la clasificación del tipo de criterio, cuatro experimentos son definidos en la Tabla 3-13 con los 5 métodos de clasificación presentados en la Tabla 3-12. Los resultados de estos experimentos se muestran en la Tabla 3-16 con el porcentaje de instancias clasificadas correctamente y la desviación estándar.

Tabla 3-16 Resultados de los experimentos para el SBR del tipo de criterio.

Experimento	% de instancias clasificadas correctamente (desviación estándar)				
	J48	DecisionTable	PART	Decision Stump	REPTree
1	42.02(5.91)	42.78(5.87)	41.34(5.97)	34.88(2.02)	44.18(6.93)
2	42.50(6.24)	40.66(6.62)	40.94(6.17)	33.90(2.73)	39.44(6.54)
3	39.40(5.93)	42.60(5.37)	37.38(6.41)	33.90(2.73)	41.78(5.97)
4	42.36(6.61)	43.32(5.79)	41.10(6.75)	34.88(2.02)	43.84(7.21)
Promedio	41.57	42.34	40.19	34.39	42.31

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la clasificación por *tipo de criterio,* en el experimento para el campo Cliente el mejor resultado se obtuvo con el algoritmo REPTree 44.18% de instancias clasificadas correctamente y una desviación del 6.93%. En el experimento 2 para el campo Recurso el mejor resultado fue para el algoritmo J48 con un 42.5% de instancias clasificadas correctamente y una desviación de 6.24%. Para el tercer experimento, del campo control de flujo el mejor resultado fue para DecisionTable con 42.60% de instancias clasificadas correctamente y una desviación de 5.37%. Por otro lado, cuando se consideran todos los campos en la base de conocimiento, el mejor resultado es para DecisionTable con 43.84% de instancias clasificadas correctamente, y desviación de 7.21%. De manera similar que el tipo de problema, en promedio el mejor resultado lo obtuvo DecisionTable con 42.34%, seguida de REPTree con 42.31%, y en cuanto a la desviación, para todos los experimentos el mejor resultado fue para el algoritmo de DecisionStump.

Entonces, al igual que para el tipo de problema, se seleccionan los algoritmos J48 y REPTree para obtener las reglas para la salida de tipo de criterio. En el Anexo M se presentan las reglas obtenidas para el campo cliente (algoritmo REPTree), para el campo recurso (algoritmo J48) para el campo control de flujo (algoritmo REPTree) y para la notación completa (REPTree).

Entonces para determinar el tipo de medida de desempeño se aplican los SBR para cada campo de la notación y de acuerdo con los resultados el usuario podrá seleccionar si trabaja el problema de forma conjunta con un solo resultado o trabaja el problema de forma separada con un tipo de problema para cada campo de la notación.

3.3.2.4 Resultados del SBR para el grupo de técnica de solución

Para realizar la clasificación del grupo de técnica de solución, cuatro experimentos son definidos en la Tabla 3-13 con los 5 métodos de clasificación presentados en la Tabla 3-12. Los resultados de estos experimentos se muestran en la Tabla 3-17 con el porcentaje de instancias clasificadas correctamente y la desviación estándar.

Tabla 3-17 Resultados de los experimentos para el SBR del grupo de técnica de solución.

Experimento	% de instancias clasificadas correctamente (desviación estándar)				
	J48	**DecisionTable**	**PART**	**Decision Stump**	**REPTree**
1	48.64(6.09)	52.66(3.39)	42.66(6.38)	54.20(0.60)	52.84(3.29)
2	52.22(3.20)	52.40(3.18)	42.06(6.41)	54.20(0.60)	52.52(3.75)
3	52.86(3.07)	52.60(2.47)	43.90(5.80)	54.20(0.60)	52.90(2.78)
4	45.94(6.02)	52.22(3.30)	41.60(6.23)	54.20(0.60)	52.24(3.19)
Promedio	49.91	52.47	42.56	54.2	52.63

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la clasificación del *grupo de técnica,* en todos los experimentos el mejor resultado obtenido fue de 54.20% de instancias clasificadas correctamente para el método de DecisionStump con una desviación del 0.6%. Sin embargo, en este caso el método ofrece una distribución de las técnicas de solución y selecciona la de mayor frecuencia de acuerdo con un atributo, entonces para todos se obtiene optimización dada que es la de mayor frecuencia. Por otro lado, se seleccionan el algoritmo REPTree para obtener las reglas para el grupo de técnicas de solución dado que fue la que obtuvo los mejores resultados en promedio después de DecisionStump. En el Anexo N se presentan los resultados de las reglas obtenidas usando el algoritmo REPTree para todos los campos de la notación por separado y la notación en conjunto.

Entonces para determinar el grupo de técnicas de solución se aplican los SBR para cada campo de la notación y de acuerdo con los resultados el usuario podrá seleccionar si trabaja el problema de forma conjunta con un solo resultado o trabaja el problema de forma separada con un tipo de problema para cada campo de la notación.

3.3.3 Operación del sistema experto para programación de tareas

En las secciones previas se definió la base de conocimiento y el motor de inferencia para el CPT, los cuales son el componente principal del SE propuesto. El modo de operación de este SE trabaja en dos fases, la primera de ejecución del SE presentado en la Figura 3-18, y la segunda, de parametrización de la salida presentado en la Figura 3-19. Para ambas figuras, se indica el software empleado en cada proceso.

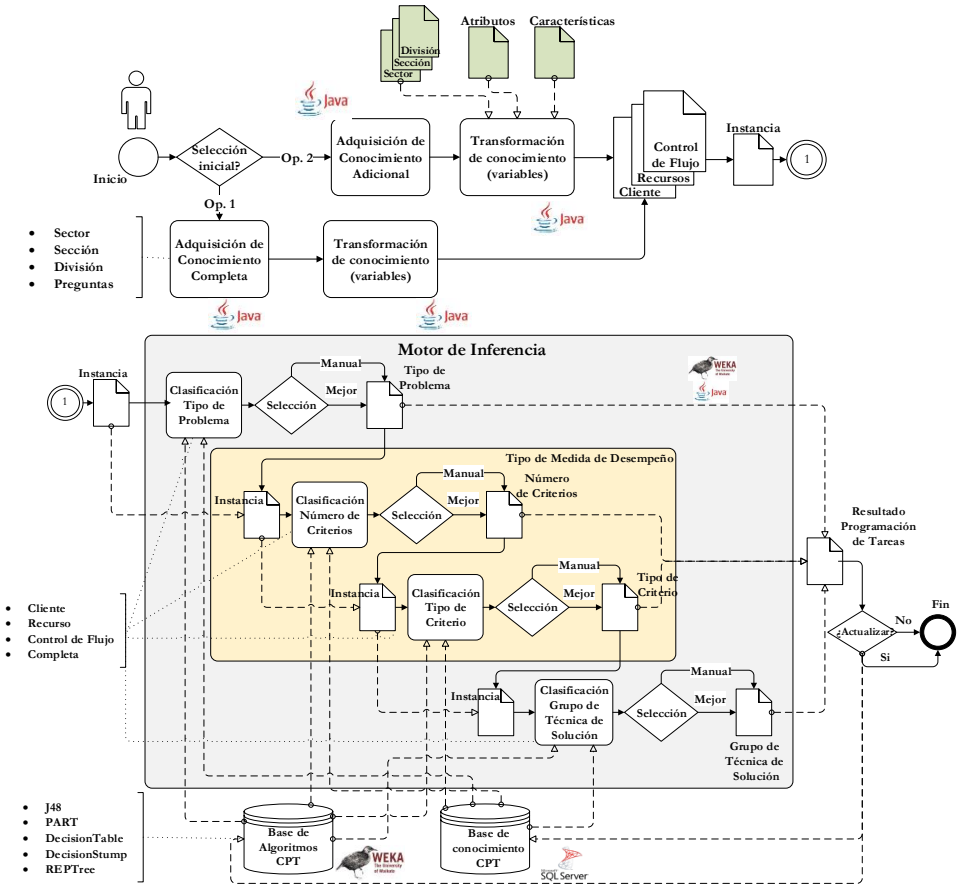


Figura 3-18. Diagrama de flujo de operaciones de SE para el CPT Fase 1.
Fuente: Elaboración propia.

La primera fase consiste en la ejecución del SE empezando con el usuario, quien tiene dos opciones de operación: 1) ingresar información sobre Atributos y características de cada componente de la notación $C|R|F$; y, 2) tener esta información de atributos y características como salida del CCSS y responder unas preguntas de información adicional. En la opción 1(Op.1), el SE indaga al usuario empleando todas las preguntas del Anexo H, en total son 62 variables que corresponden al mismo número de preguntas, que pertenecen 22 para cliente, 21 para recursos y 19 para control de flujo. Adicionalmente, el usuario debe indicar a que sector, sección y división del CIIU pertenece su actividad económica. Para la opción 2 (Op.2), solo se responderán aquellas identificadas como preguntas en el Anexo H: en este caso para el campo cliente se realizan 16 preguntas, 4 variables corresponden a atributos y 2 a características; en cuanto al campo recursos son 18 preguntas y 3 características; mientras que para el campo control de flujo, 10 se obtienen a través de preguntas, 5 por atributos y 4 por

características. Sin embargo, esta opción solo se activa como resultado de haber ejecutado el SE para el CCSS.

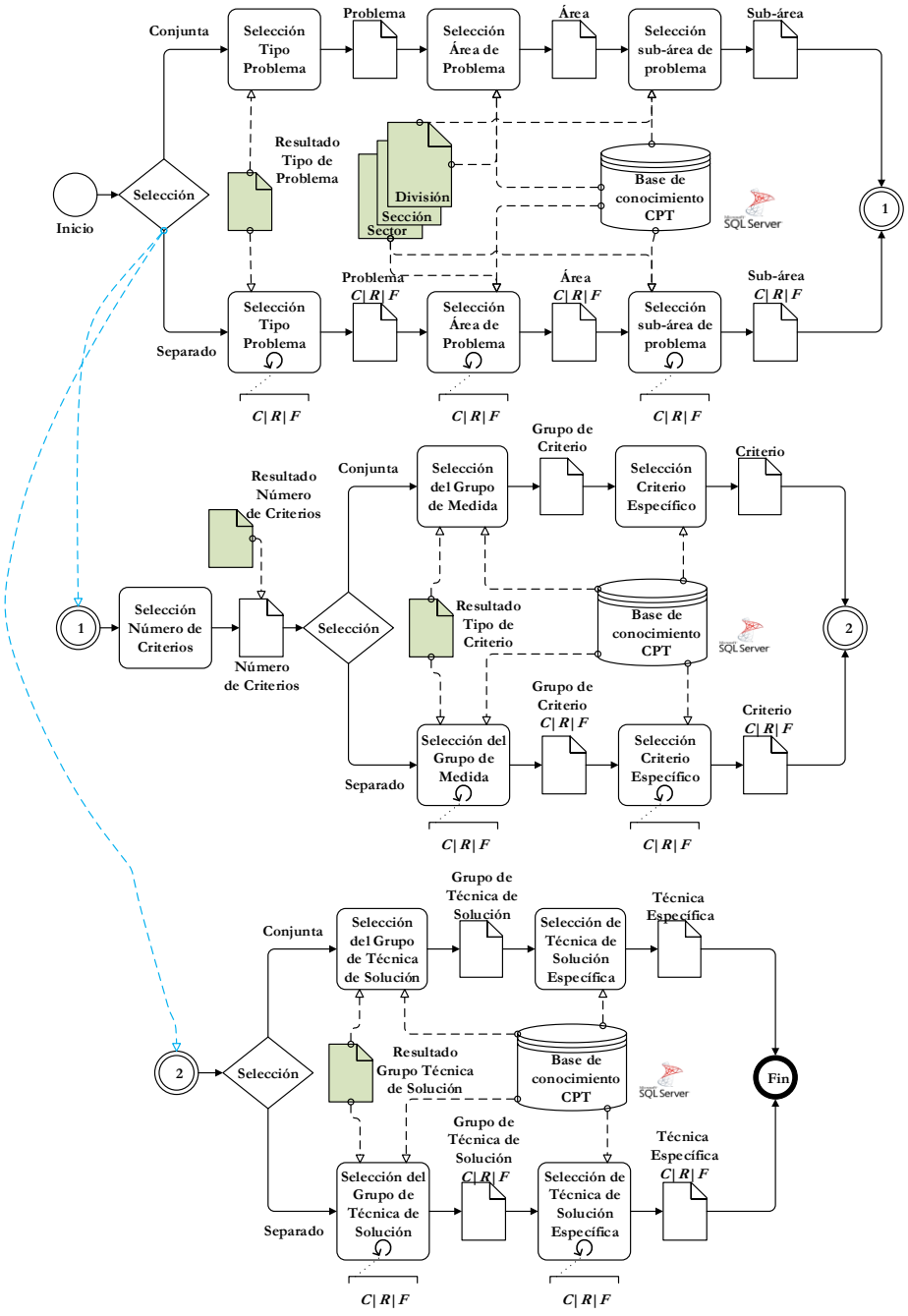


Figura 3-19. Diagrama de flujo de operaciones de SE para el CPT Fase 2.
Fuente: Elaboración propia.

Entonces, ya se cuenta con la información que se convierte en una instancia para aplicar los SBR para las tres salidas definidas. El primero consiste en determinar el tipo de problema,

aplicando el SBR para cada campo de la notación $C|R|F$ o para la base de conocimiento completa de acuerdo a lo expuesto en la sección 0, aunque se puede ejecutar los algoritmos presentados en la Tabla 3-12 y seleccionar de ellos mejor resultado, o seleccionar el tipo de problema directamente.

Una vez se tiene el resultado del tipo de problema, este alimenta la instancia con nueva información y se procede a ejecutar el SBR para el tipo de medida de desempeño. En este caso el tipo de medida tiene dos componentes: el número de criterios y el tipo de criterio, los cuales se ejecutan en cascada para determinar el tipo de medida aplicando el SBR para cada campo de la notación $C|R|F$ o para la base de conocimiento completa de acuerdo a como se presentó en la sección 0, aunque se puede ejecutar los algoritmos presentados en la Tabla 3-12 y seleccionar de ellos mejor resultado, o seleccionar el tipo de problema directamente.

Para finalizar la primera fase, con los resultados de tipo de problema y del tipo de medida de desempeño, se procede a aplicar el último clasificador del grupo de técnicas de solución. Este se aplica sobre los campos de la notación $C|R|F$ o para la base de conocimiento completa, de manera similar que los dos anteriores, y se puede escoger el mejor de los algoritmos aplicados o seleccionar directamente el grupo de técnicas de solución.

Para esta primera fase, se propone in mecanismo de actualización que consiste en que la nueva instancia y su clasificación obtenida por el usuario se pueda adicionar a la base de conocimiento del CPT o crear una nueva base de conocimiento que permita ejecutar un contraste de evaluación.

Ahora se procede a una segunda fase descrita por la Figura 3-19 para el diseño de la técnica específica. Esta fase se ejecuta en tres etapas, la primera consiste en seleccionar un problema de programación de tareas de forma específica. Entonces, el usuario debe escoger entre trabajar el problema de forma separada para los tres componentes de la notación $C|R|F$ o de forma conjunta, esta decisión afectara la decisión de las siguientes tres etapas. Si se escoge trabajar el problema de forma conjunta, se tendrá en cuenta el resultado del tipo de problema obtenido por el SE propuesto, sin embargo, el usuario deberá confirmar la selección si todos eran iguales o seleccionar con cual trabajar dentro de las opciones ya descritas de: Sche, Rou, y Sch&Rou. Seguido a este paso, se debe seleccionar, el área del problema; para esto se empleará la clasificación dada por las dos áreas de problemas para programación de tareas en sistemas de servicios según la Figura 2-31 donde muestra una clasificación de los problemas para dos categorías: servicios y general. La categoría de servicios presenta en detalle las áreas más representativas encontradas en la literatura, donde se resalta por su frecuencia: transporte, salud, recogida y entrega, educación, personal y asignación. La categoría de problemas general se definió para clasificar aquellos que no representaban una aplicación específica de problemas de servicios, pero si relacionados, se destacan por su frecuencia: programación de fuerza de trabajo, asignación y programación de proyectos. De aquí, según el sector, sección, y división de la actividad económica, el SE sugiere un área y sub-área de acuerdo con el Anexo J donde se presenta una relación de la secciones y divisiones del CIIU con el área y sub-área del problema. Adicionalmente, el SE sugiere un área y subárea de acuerdo con la mayor frecuencia presentada en la base de conocimiento y los filtros aplicados en el Anexo O.

Por otro lado, si se elige la opción de forma separada se debe realizar el mismo proceso teniendo en cuenta que se debe ejecutar para los tres componentes $C|R|F$ de la notación. Los resultados de esta primera etapa alimentan a la segunda como entradas y filtros de información de la base de conocimiento.

La segunda etapa consiste en definir los aspectos del tipo de medida de desempeño. Para esta, el primer paso es seleccionar el número de criterios teniendo en cuenta los resultados del SBR de la fase 1, estos pueden ser un único criterio o múltiples. Definida esta opción, se procede a seleccionar la manera de abordar el tipo de criterio, teniendo en cuenta la opción de trabajar

en forma separada o conjunta de la primera etapa. Se debe confirmar el grupo de los criterios y luego de acuerdo con este grupo seleccionar las medidas de desempeño específicas de acuerdo con los parámetros de la notación definidos para el campo γ (ver Figura 2-21). Este SE sugiere un grupo de criterios y criterio específicos según la mayor frecuencia presentada en la base de conocimiento y a los filtros aplicados según el Anexo O. Los resultados de esta etapa, junto con los de la primera alimentan a la tercera como entradas y filtros de información de la base de conocimiento.

La tercera etapa permite la selección de la técnica de solución específica. Se conserva la decisión de trabajar de forma conjunta o separada según las decisiones obtenidas en las anteriores etapas. Entonces, tomando los resultados de las dos primeras etapas, y del SBR en cuanto al grupo de técnicas de solución, el primer paso es confirmar el grupo de técnica según corresponda y de acuerdo a la base de conocimiento del Anexo I y aplicando los filtros respectivos del SQL presentados en el Anexo O, se debe seleccionar la técnica de solución específica. Este SE sugiere una técnica específica con la mayor frecuencia presentada en la base de conocimiento y los filtros aplicados.

Finalmente, en esta sección se describió el SE propuesto para el CPT. Este SE permite identificar el tipo de problema de PTSS, la medida de desempeño y la técnica de solución sugerida para el problema de PTSS, las cuales constituyen las salidas de la propuesta general descrita en la Figura 3-1. De esta manera, el SE esta descrito en su totalidad y fue implementado en un prototipo computacional que se describirá en la siguiente sección.

3.4 Prototipo computacional *SchES*: *Sch*eduling with *E*xpert *S*ystems

En esta sección se presenta la información más relevante del prototipo computacional del SE propuesto que constituye otro de los aportes científicos de esta tesis doctoral. Primero, se presenta unas generalidades del lenguaje utilizado, luego, se describen brevemente los compontes del prototipo y sus principales opciones.

3.4.1 Lenguajes y paquetes de software empleados

El lenguaje de programación empleado para implementar el SE descrito en las secciones previas fue Java. Este es un lenguaje de propósito general, concurrente y orientado a objetos, que tiene como ventaja permitir la ejecución de las implementaciones desarrolladas sin la dependencia de la plataforma. Es un lenguaje derivado de C, por tanto, sus estructuras se parecen y permiten establecer módulos y conexiones entre ellos a través de métodos.

Dentro de los factores importantes al momento de decidir el tipo de lenguaje de desarrollo, uno de los fundamentales es el potencial de expansión y conexión con otras aplicaciones y librerías desarrolladas por terceros, las cuales ofrecen una ventaja en utilizar paquetes sin necesidad de desarrollo propio. Adicionalmente, se seleccionó como entorno de desarrollo integrado (IDE) Eclipse ®, el cual es de código abierto para el desarrollo Java, con las tareas básicas como compilación de código y depuración, además cuenta con el entorno *Windows Builder* para el desarrollo de interfaz de usuario de un manera rápida y eficiente.

Por otro lado, se empleó software adicional para el desarrollo de los modelos de adquisición de conocimiento como Matlab 2018 ® (https://la.mathworks.com), para el motor de inferencia como WEKA ® (https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/), Microsoft SQL (https://docs.microsoft.com/en-us/sql/?view=sql-server-2017) para el manejo de bases de datos, y librerías específicas para la manipulación de datos y conexión entre las interfaces.

Matlab es una herramienta de software matemático con un IDE basado en un lenguaje de programación propio (lenguaje M), disponible para Windows y otras plataformas como IOS y Linux. Matlab permite la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario y la comunicación con

programas en otros lenguajes (como Java). Adicionalmente, tiene unas cajas de herramientas (toolboxes) que permiten el desarrollo de aplicaciones específicas, como el de optimización, el de redes neuronales y lógica difusa y el de sistema de inferencia difusos. Este software se empleó principalmente para el desarrollo de los modelos de adquisición de conocimiento presentados en las secciones 3.2.2.1 y 3.2.2.2.

WEKA (Waikato Environment for Knowledge Analysis, en español "entorno para análisis del conocimiento de la Universidad de Waikato") es un software para el aprendizaje de máquina y minería de datos desarrollado en Java por la Universidad de Waikato. Weka es software libre distribuido bajo la licencia GNU-GPL. Weka tiene una serie de tareas de minería de datos enfocadas principalmente en el preprocesamiento de datos, clustering, clasificación, regresión, visualización, y selección. Su principal ventaja es la portabilidad y la interfaz de usuario que permite realizar experimentaciones de una forma rápida y sencilla. Adicionalmente, su conexión con Java es directa y permite el traspaso de información de una manera rápida y sencilla. Este software se utilizó para el desarrollo de los motores de inferencia presentados en las secciones 3.2.3 y 3.3.2.

Microsoft SQL es un sistema de manejo de bases de datos del modelo relacional, desarrollado por Microsoft. SQL emplea un lenguaje de desarrollo mediante líneas de comandos o mediante la interfaz gráfica de Management Studio conocido como Transact-SQL (TSQL), una implementación del estándar ANSI del lenguaje SQL, utilizado para manipular y recuperar datos (DML), crear tablas y definir relaciones entre ellas (DDL). Este permite crear un servidor y manipulas bases de datos, además su conexión con el IDE de java es sencilla de implementar. Este software se empleó para el manejo de las bases de conocimiento que por su tamaño fueron difíciles de manejar en Excel y objetos directos de Java.

Las librerías empleadas fueron las proporcionadas dentro del IDE de Eclipse para el manejo de datos, importar y exportar información. Adicionalmente, se empleó un paquete externo llamado jfuzzylite 6.0 desarrollado por (Rada-Vilela, 2017), el cual consiste en una librería de java que permite la manipulación de conjuntos difusos y sistemas de inferencia difusos. Este paquete se utilizó para el manejo en Java de los modelos basados en ANFIS para el sistema de adquisición de conocimiento del CCSS.

Finalmente, todos los paquetes empleados se utilizaron bajo el licenciamiento académico para el desarrollo del prototipo computacional SchES.

3.4.2 Generalidades de *SchES*

En cuanto a la aplicación SchES (que proviene de **Sch**eduling with **E**xpert **S**ystems) fue desarrollada en tres módulos: Principal, Clasificador Servicios y Clasificador Scheduling. A continuación, se describen las funcionalidades de cada uno de ellos.

3.4.2.1 Modulo Principal

En el módulo de configuración inicial llamado Principal se presenta la ventana de inicio de SchES como se muestra en la Figura 3-20. En este módulo primero se da una descripción general del mismo y el usuario encuentra una sección donde debe ingresar unos datos básicos como: el nombre de la organización, el responsable, el teléfono de contacto, el correo, y fecha. Estos datos sirven de repositorio de información y serán tratados de acuerdo con las leyes correspondientes de protección de datos. Posteriormente, aparece una ventana denominada Parametrización del módulo, en esta se encuentran unos archivos que SchES necesita para le ejecución de lo SE propuestos. Aquí el usuario, encuentra la dirección de cada uno de los archivos y en los botones la opción de seleccionar el archivo si lo considera pertinente indicando ubicación de este. Por otro lado, esta otra ventana llamada Aplicaciones, en esta el usuario encuentra tres botones los cuales representan el modo de operación de SchES. El

botón Clasificador de Actividades ejecuta el SE propuesto para el CCSS de acuerdo con la sección 3.2.4, y se le preguntara al usuario la opción de operación indicando si desea ingresar las características y atributos (Op. 1) o los atributos directamente (Op. 2). El botón Clasificador Scheduling activa la ejecución del SE propuesto para el CPT de acuerdo con la sección 3.3.3, y se lo indicara al usuario que debe ingresar toda la información correspondiente a los campos de la notación de PTSS. Por último, el botón Clasificación Completa ejecutara el SE propuesto para PTSS completo según la Figura 3-1 ejecutando primero el CCSS y luego el CPT.

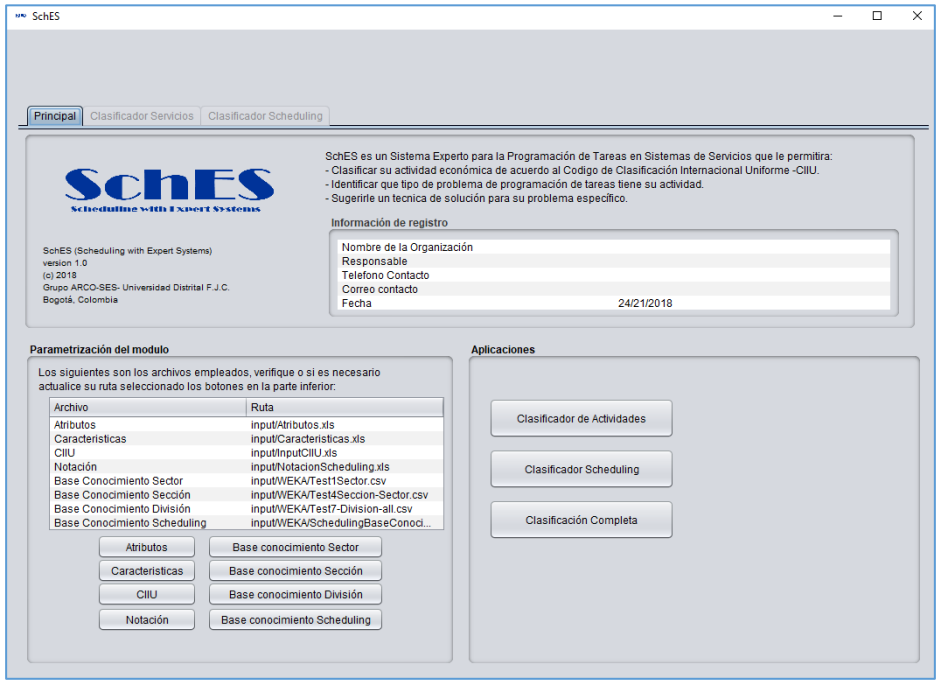


Figura 3-20. Ventana del módulo Principal de SchES.
Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.2 Modulo Clasificador Servicios

El módulo Clasificador Servicios se presenta en la Figura 3-21. Este se compone de dos ventanas de ejecución. La primera es de Adquisición de Conocimiento en la cual se ejecutan las tareas necesarias para la determinación de los 12 atributos. En esta ventana se presenta un botón Preguntas donde se activa una ventana para ingresar las respuestas a las 31 características y se puede mostrar los resultados (Visualizar respuestas). Luego, el botón Determinar atributos el cual mediante el sistema de inferencia difuso obtenido por el método ANFIS para cada atributo es ejecutado y las respuestas se pueden observar en el botón Visualizar atributos en la ventana que así lo indica. Aquí el usuario puede guardar el registro si así lo desea y ejecutar el botón Siguiente para continuar con la ventana Clasificado Actividades que se presenta en la Figura 3-22. En esta ventana se presentan lo botones para ejecutar los clasificadores de sector, sección, y división en forma de cascada. Se presentan resultados obtenidos en cada uno por los cuatro métodos propuestos con su porcentaje de instancias clasificadas correctamente y también la opción "otra" en la cual se puede seleccionar directamente la respuesta a cada salida. El usuario puede guardar el registro y continuar con el segundo módulo de CPT. En cada ventana se encuentra un botón "Más información" donde el usuario puede consultar un manual de ayuda sobre la ventana que está ejecutando y también un botón "Limpiar" para borrar los resultados y volver a ejecutar.

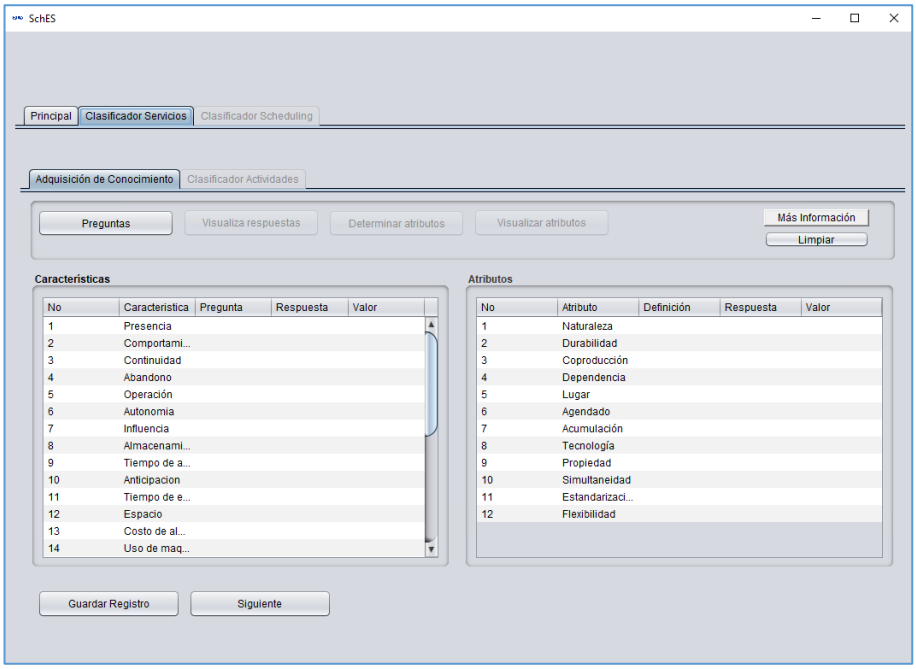


Figura 3-21 Ventana de adquisición de conocimiento del módulo Clasificador Servicios de SchES.

Fuente: Elaboración propia.

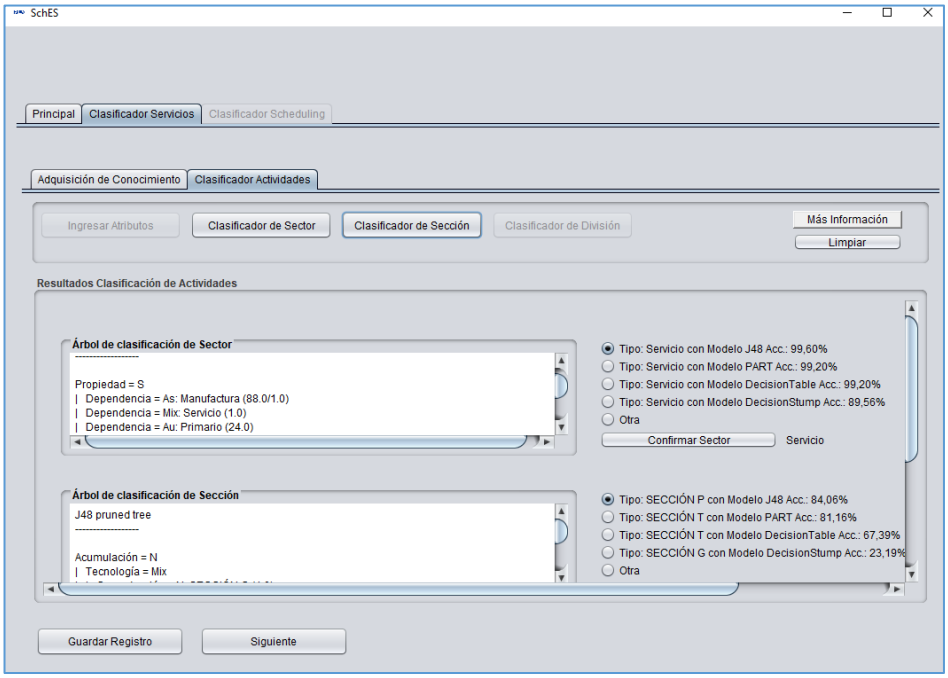


Figura 3-22 Ventana de clasificador de actividades del módulo Clasificador Servicios de SchES.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.3 *Modulo Clasificador Scheduling*

En este módulo se ejecuta el CPT, y es presentado en la Figura 3-23. De acuerdo con la estructura descrita en la Figura 3-3, el CPT tiene una primera etapa de adquisición de conocimiento en la cual toma información de los atributos, las características y otra información adicional para transformarlo en las variables asociadas a cada parámetro de la notación $C|R|F$. Para esto se emplea el listado de preguntas en el Anexo H, en el cual para cada variable se indica la pregunta o la fuente de información que puede ser atributos o característica. En total son 62 variables que corresponden al mismo número de interrogantes.

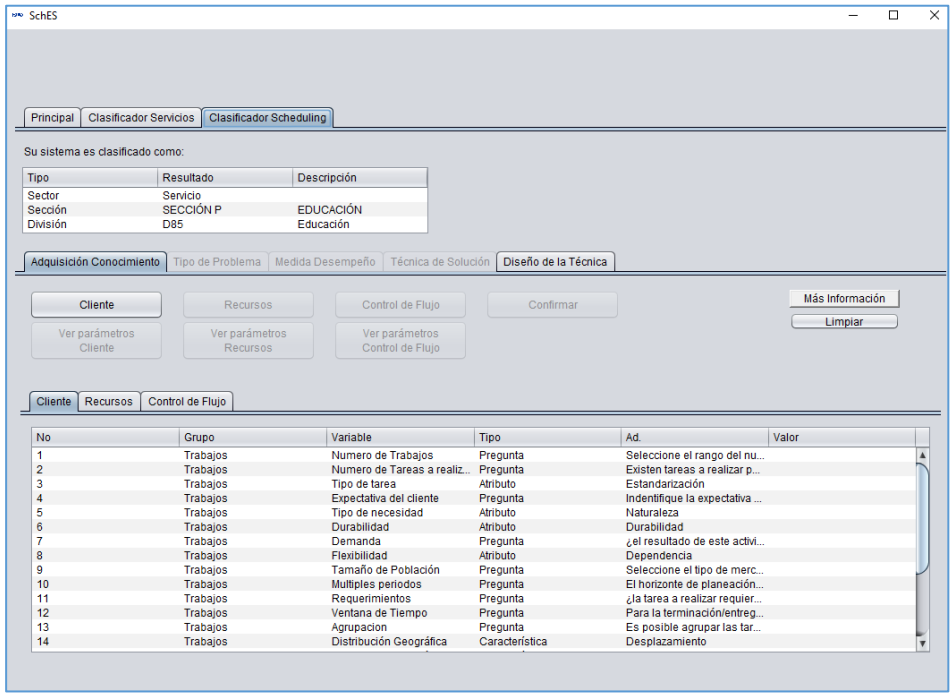


Figura 3-23 Ventana de Clasificador Scheduling de SchES.
Fuente: Elaboración propia.

Luego se presenta las tres pestañas que indican las ventanas para tipo de problema, medida de desempeño y técnica de solución, las cuales son el resultado de la ejecución de SE para CPT de acuerdo con la sección 3.3.3 y específicamente el flujo de la Figura 3-18 en la cual se ejecutan los SBR en forma de cascada. En la Figura 3-24 se presenta como ejemplo la ventana correspondiente al tipo de problema, aquí el usuario ejecuta el clasificador de tipo de problema para los tres campos de la notación y se presentan los resultados en la tabla de acuerdo al mejor porcentaje de clasificación, sin embargo se puede seleccionar otra respuesta por cada componente y el usuario debe confirmar con un botón su selección para continuar con la medida de desempeño y el grupo de técnicas de solución. Cada pestaña funciona con los botones presentados de manera similar.

Por último, está la pestaña del diseño de la técnica que corresponde a la ejecución del diagrama de actividades de la Figura 3-19. Un ejemplo de esta pestaña se presenta en la Figura 3-25, en la cual se muestra los resultados para problema específico, medida desempeño y técnica de solución específica. En cada una de estas ventanas se encuentran diferentes opciones que el usuario debe parametrizar. El flujo empieza cuando el usuario selecciona el componente como Conjunto o específicamente el campo de la notación de PTSS, luego está el área y la sub-área del problema. En las tablas aparece la información consultada (queries) de la base de

conocimiento del CPT correspondientes indicando la frecuencia en la base de conocimiento y ordenando de la mayor a menor frecuencia.

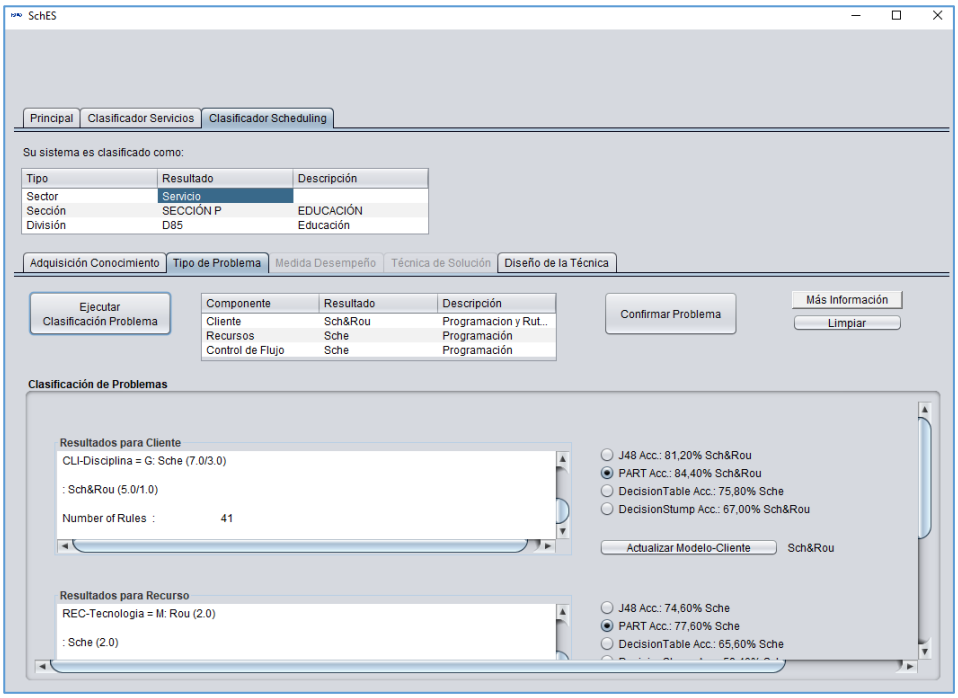


Figura 3-24 Ventana de tipo de problema del Clasificador de Scheduling de *SchES*.
Fuente: Elaboración propia.

De manera similar trabaja la medida de desempeño: seleccionado grupo de medida y medida de específica con el botón correspondiente; y para la técnica de solución: seleccionando grupo de técnica y técnica específica. Una opción adicional es que el usuario puede consultar los documentos que corresponden a su selección, mediante un botón que le indicada al final del proceso de técnica específica y una nueva ventana se mostrara con los títulos, el año y la opción de abrir cada documento.

Por otro lado, se tiene la opción de grabar el resultado obtenido para alimentar con nueva información la base de conocimiento correspondiente al CPT.

Finalmente, en esta sección se describieron las generalidades del prototipo *SchES*, sin embargo, en el Anexo P se presenta un manual de usuario de este prototipo con el fin de ayudar al usuario con el modo de operación de *SchES*. Adicionalmente, en el anexo se presenta el registro de soporte lógico del software.

3.5 Resumen y conclusiones del capítulo

En este capítulo se presentó el esquema general del SE propuesto para el problema de PTSS. La propuesta se basa en la definición de SS y la notación propuesta para PTSS, presentadas en el segundo capítulo de esta tesis doctoral. De forma general, es un SE híbrido de dos sub-SE, uno para clasificación de sistemas de servicios llamado CCSS, y uno de clasificación de programación de tareas llamado CPT.

EL CCSS es un SE para la clasificación de sistemas de servicios para el CIIU mediante un SBR. El esquema planteado tiene en cuenta las variables asociadas a los clientes, el recurso y el control de flujo, que son las características de los productos/servicios con el fin de

determinar de acuerdo con esta información el sector, la sección y la división a la cual pertenece.

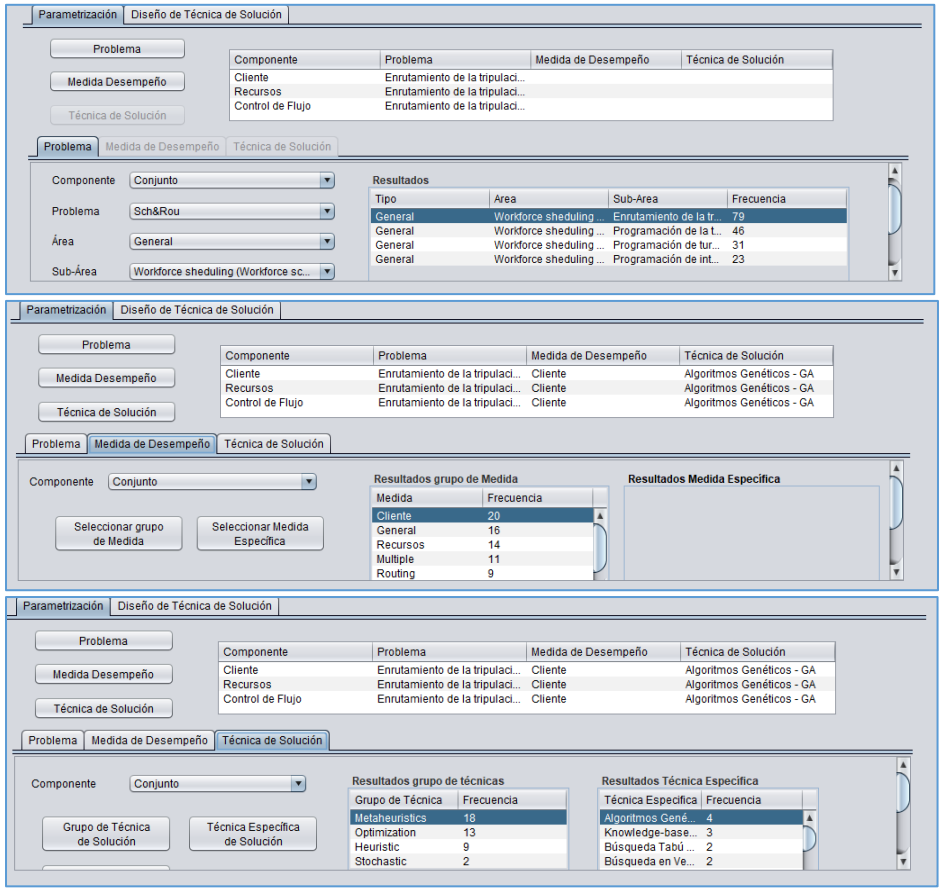


Figura 3-25 Ventana de diseño de la técnica para problema específico del Clasificador de Scheduling de *SchES*.
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos muestran que el sistema presenta un buen ajuste en la categorización en cuanto al número de instancias clasificadas correctamente y una desviación inferior al 10%. Este resultado es útil para las empresas al determinar su tipificación y para las entidades que consolidan información con fines estadísticos.

El CPT es un SE para la identificar los problemas de PT, la medida de desempeño y la técnica de solución para un SS. El SE toma como información el resultado del CCSS o permite al usuario mediante un sistema de adquisición de conocimiento recopilar la información necesaria para completar la información referente a la notación de PTSS. Para la ejecución del SE, fueron empleados varios SBR derivados de la aplicación de algoritmos de aprendizaje de máquina y minería de datos, que permiten obtener reglas para ser aplicadas a la hora de clasificar una instancia en particular. Los resultados obtenidos muestran un buen ajuste en la clasificación en cuanto al número de instancias clasificadas correctamente y una desviación inferior al 10%, al igual que en el CCSS. Además de la flexibilidad, de poder seleccionar los algoritmos a emplear y dar variantes a la respuesta obtenida, lo cual permite adquirir nuevo conocimiento a la base del CPT.

La novedad científica de los SE propuestos para el CCSS y el CPT radica en la incorporación de modelos de optimización no lineal y basados en ANFIS que permiten transformar el conocimiento adquirido para las características a los atributos, para luego emplear algoritmos de aprendizaje de máquina y minería de datos para obtener reglas que permitan establecer la clasificación. De esta manera el SE propuesto obtiene diferentes aristas: una de SE híbrido, debido a las diferentes herramientas de modelación que se emplean y se sincronizan para obtener los resultados; una de SE flexible, debido a que se puede incorporar nuevos elementos a la base de conocimiento; una de SE dinámico, debido a que se adapta a las diferentes configuraciones que el usuario desee realizar; y una de SE jerárquico, por su naturaleza de ejecución en forma de cascada que permite emplear los resultados de los SBR precedentes para adquirir información en el flujo del proceso.

SchES, como prototipo computacional, plasma los SE desarrollados y permite tener una interfaz de usuario amigable para el ingreso de información y la obtención de resultados. Esta herramienta informática cumple con requerimientos de económica, robustez, manejo de bases de datos relacionales, y rapidez en la ejecución de los algoritmos y filtros de búsqueda. Además, es una que permite el usuario diseñar algunas configuraciones para el desarrollo del SE lo cual representa una característica de flexibilidad y de ayuda como soporte al proceso de toma de decisiones.

Capítulo 4. **APLICACIONES**

En este capítulo se exponen tres casos de estudio representativos que permiten validar la aplicación del SE propuesto en el capítulo anterior. Se destacan las bondades, desventajas y posibles potencialidades de la propuesta en los diferentes campos de aplicación. El caso 1 corresponde a servicios de mensajería, el caso 2 corresponde a servicios de cuidado de la salud domiciliaria, y el caso 3 respecto a una aplicación de servicios de mantenimiento. En las siguientes tres secciones se describe cada caso. Para cada uno de estos, primero se describe el sistema a tratar, el sector en cual se desarrolla y la información que permite caracterizar el caso de estudio. Luego se presenta cada una de las fases del SE propuesto para PTSS, según corresponda a cada instancia de estudio. Por último, se presentan unos resultados y recomendaciones para cada una de las aplicaciones, y el resumen de los indicadores obtenidos que evidencian la mejora de la función de programación de tareas.

Por último, la sección 4.4 presenta unas conclusiones parciales derivadas de los resultados del capítulo.

4.1 Caso 1: Servicio de mensajería

Este caso[6] de estudio describe la aplicación del SE propuesto en los servicios de mensajería que consisten en distribuir paquetes que son recibidos diariamente para un conjunto de clientes distribuidos geográficamente a través de un conjunto de vehículos, enmarcados en un horizonte de planeación. Dado esto, los servicios de mensajería pueden plantearse como un problema de ruteo de vehículos (VRP), sin embargo, para representar de forma adecuada los servicios de mensajería se deben tener en cuenta diferentes restricciones adicionales al VRP clásico. Según lo presentado por (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, & Méndez-Giraldo, 2018), las restricciones más comunes en el VRP que son aplicables a los servicios de mensajería son:

- Las ventanas de tiempo en los clientes, ya que las citas programadas previamente que tienen una fecha y un intervalo de tiempo para ser visitado, las cuales teóricamente se definen con el concepto de ventana de tiempo, estas pueden ser suaves o duras (Toth & Vigo, 2002a), en el caso de los servicios de mensajería son duras ya que no se deben incumplir porque disminuyen el nivel de servicio.

[6] El trabajo de esta sección es basado en las publicaciones presentadas en *Applied Computer Science in Engineering* (Rodríguez-Vásquez, López-Santana, & Méndez-Giraldo, 2016) y en *International Journal of Industrial Engineering Computations* (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018). Estos fueron desarrollados en colaboración con el MSc. William Rodríguez quien se encargó de la recolección de información y el desarrollo de la aplicación en el marco de su tesis de Maestría en Ingeniería Industrial titulada "Sistema experto híbrido para optimizar los procesos de programación, zonificación y diseño de rutas de un servicio de mensajería considerando restricciones de ventanas de tiempo, múltiples periodos de tiempo, fechas de vencimiento, distancia y horario en la capacidad", en el año 2016 bajo la tutoría del profesor PhD.(c) Eduyn López-Santana en la Universidad Distrital. Este proyecto es vinculado directamente a la tesis de doctorado en el grupo de investigación ARCOSES.

- La capacidad en los vehículos, que casi siempre se toma en cuenta, es la capacidad máxima de carga.
- Restricciones de distancia o tiempo, además a la restricción de capacidad, cada vehículo tiene asociada una máxima longitud de ruta que puede estar dada en distancia o tiempo (Farahani, Rezapour, & Kardar, 2011).
- Múltiples periodos cuando se considera un horizonte de planeación compuesto por un número determinado de días, en el cual los clientes deben ser visitados una vez. Una ampliación de esta restricción incluye que los clientes tiene una determinada fecha de vencimiento (Archetti, Jabali, & Speranza, 2015).

Por otro lado, en los servicios de mensajería existen unas etapas de proceso que se realizan comúnmente para cumplir con las restricciones descritas anteriormente, en la Figura 4-1 se presenta el proceso para el caso de estudio presentado en este apartado. La primera etapa de programación de documentos se realiza de forma manual, basado en experiencia y criterio de los operadores a cargo de esta labor y teniendo en cuenta restricciones como la capacidad total disponible para entregar los paquetes y los atributos de los paquetes tales como citas programadas, fechas de vencimiento y muchos otros atributos que contemplan en los acuerdos de servicio pactados con los clientes. Esto representa una desventaja ya que errores humanos pueden generar incumplimientos de los acuerdos de servicio, estos errores se deben a la rotación de personal, la cual genera constante pérdida del conocimiento sobre cómo realizar el proceso.

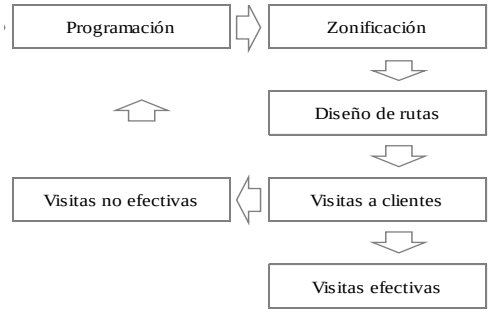


Figura 4-1 Ejemplo de etapas del proceso en servicios de mensajería.
Fuente: Tomado de (Rodríguez-Vásquez, 2016).

La siguiente etapa de zonificación corresponde a un proceso de agrupamiento (*clustering*), el cual consiste en agrupar los paquetes que fueron programados para cada día, teniendo en cuenta información geográfica, tal como, localidades y barrios, y las ventanas de tiempo de los paquetes a distribuir, para después ser asignados a los vehículos disponibles, los cuales tienen asociado un horario que cumplir y una capacidad de carga. Esta etapa también se realiza de forma manual en varias de las empresas de mensajería.

Por último, está la etapa del diseño de rutas que consiste en establecer para cada vehículo el orden de visita de sus paquetes asignados. El orden se selecciona de acuerdo con criterios subjetivos del operador que conduce el vehículo, basados principalmente en el conocimiento previo de la zona, las citas programadas y su horario disponible. Un inconveniente en esta etapa radica en que esta metodología genera rutas inadecuadas respecto a la distancia total recorrida y el cumplimiento de restricciones de horario de visita preestablecidas telefónicamente generando incumplimiento de las citas con los clientes que esperan los paquetes.

Después de esta etapa de programación del servicio, viene la ejecución con las visitas a clientes las cuales pueden ser efectivas o no, y estas últimas reingresan al sistema para ser reprogramadas para su entrega. En el proceso de programación del servicio de mensajería

uno de los principales problemas surge a medida que la cantidad de puntos aumenta y que ocasiona que las posibilidades del orden en el cual se pueden visitar todos los puntos aumenten exponencialmente. Por ello diversos métodos de solución se han propuesto, desde, métodos exactos como el Branch-and-Bound hasta metaheurísticas que buscan una posible solución y luego la optimizan, dando así una muy buena solución (Crainic & Toulouse, 2003).

A continuación, se presenta los resultados de la aplicación del SE para el CCSS con el fin de determinar el sector, sección y división de la actividad descrita, y posteriormente se aplica el SE para el CPT con el fin de identificar el problema a resolver y la técnica de solución posible.

4.1.1 Descripción del Caso 1

Como caso de estudio se toma el servicio prestado por una empresa de mensajería en la ciudad de Bogotá, Colombia presentado en (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018). Esta empresa cuenta con una flota de más de doscientos operadores movilizados en motocicletas, cuya función es la de prestar el servicio de mensajería. Para el año 2016 en la ciudad de Bogotá la empresa contaba con tres centros de operación, desde los cuales se distribuyen aproximadamente 3500 paquetes o documentos por día, es decir, 700 documentos en promedio por cada centro, además de una cuadrilla de 20 a 32 operadores motorizados, estos pueden llevar desde 10 hasta 60 paquetes por día, dependiendo de su horario. Como restricciones principales al problema, se tiene citas programadas por cumplir de algunos de los paquetes distribuidos y una capacidad de visitas, delimitada por horarios de los motorizados. Estos horarios disponibles se actualizan semanalmente, sin embargo, si hay novedades de reducción de capacidad, tales como incapacidades durante de la semana el parámetro de capacidad total disponible se debe ajustar.

Los paquetes que deben ser entregados a los clientes tienen las siguientes características para ser tenida en cuenta al momento de la asignación: Identificación del documento, Tipo de entrega, Fecha de cita, Hora inicio cita, Hora final cita, Estado real, Stock gestionable, Motivo real, Calificación gestión telefónica, Cantidad de llamadas, Cantidad de visitas, Vencimiento, CX (Longitud), y CY (Latitud). Estas son las características básicas que utiliza un analista para decidir la asignación de los paquetes al día de envió.

Para la muestra se solicitaron a la empresa de mensajería una base datos con los paquetes que estuvieran en su sistema el día 20 de septiembre de 2016. En la muestra recibida había 17492 paquetes en su inventario. En la Figura 4-2 se muestra la dispersión de los paquetes en el mapa de Bogotá.

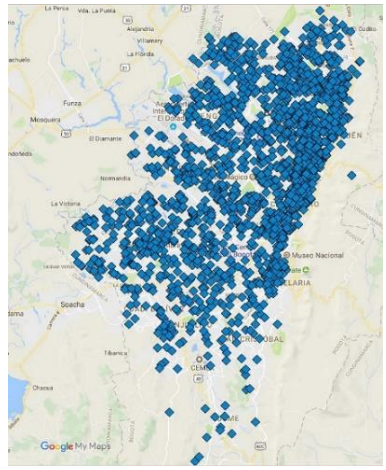


Figura 4-2 Distribución geográfica de los clientes para caso 1
Fuente: Tomado de (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018).

A continuación, se presenta los resultados de la aplicación del SE para el CCSS con el fin de determinar el sector, sección y división de esta actividad, y posteriormente se aplica el SE para el CPT con el fin de identificar el problema a resolver y la técnica de solución posible.

4.1.2 Resultados de clasificación de sistemas de servicios para el Caso 1

Se inicia con el proceso de adquisición de conocimiento para las características asociadas al servicio de mensajería. En este caso se tomó una muestra de la empresa utilizada como caso de estudio y se elaboraron 6 encuestas sobre las 31 características. Los datos de las respuestas obtenidas se presentan en detalle en Anexo Q primer apartado (Q.1).

Para el modelo de optimización no lineal, se presentan los resultados obtenidos en la Tabla 4-1 para los valores de los atributos obtenidos para cada una de las muestras (M1 a M6), el promedio de ellas, el valor de referencia, la desviación estándar de las muestras, el error y el error absoluto en cada columna. De manera similar, en la Tabla 4-2 se presentan los resultados del método ANFIS. Se puede observar como el error absoluto medio para todos los atributos es de 26.8% para el método ANFIS en comparación con 51.4% del método de optimización no lineal, lo cual refleja una mejor precisión para el método ANFIS. En cuanto a la desviación estándar, el método ANFIS obtuvo un valor de 0.39, menor al del método de optimización no lineal de 0.42. Esto indica una menor dispersión en los resultados de los atributos.

Tabla 4-1 Resultados de atributos para el modelo de optimización no lineal para el Caso 1

a	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Promedio	Referencia	Desviación	Error	Error absoluto
1	1.00	1.00	1.10	1.00	1.00	1.00	1.02	1.00	0.04	0.02	1.7%
2	3.10	3.00	3.10	3.00	3.10	3.10	3.07	1.00	0.05	2.07	206.7%
3	3.80	2.90	3.60	3.00	1.00	1.00	2.55	5.00	1.25	-2.45	49.0%
4	1.40	1.20	1.40	1.20	1.00	1.00	1.20	1.00	0.18	0.20	20.0%
5	2.20	2.20	2.20	2.30	1.30	1.30	1.92	1.00	0.48	0.92	91.7%
6	3.90	3.90	3.90	3.90	3.90	3.90	3.90	5.00	0.00	-1.10	22.0%
7	2.70	2.70	2.80	2.70	2.70	2.70	2.72	3.00	0.04	-0.28	9.4%
8	2.70	3.00	3.60	3.00	3.00	3.00	3.05	2.50	0.29	0.55	22.0%
9	1.50	2.30	1.50	1.40	1.50	1.50	1.62	1.00	0.34	0.62	61.7%
10	4.00	3.00	3.90	3.00	1.00	1.00	2.65	5.00	1.35	-2.35	47.0%
11	2.10	1.90	2.10	2.10	1.90	1.90	2.00	3.00	0.11	-1.00	33.3%
12	3.10	2.30	3.10	3.10	1.30	1.30	2.37	5.00	0.88	-2.63	52.7%
Promedio									0.42	-0.45	51.4%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-2 Resultados de atributos para el modelo ANFIS para el Caso 1

a	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Promedio	Referencia	Desviación	Error	Error absoluto
1	1.11	1.11	1.09	1.11	1.09	1.11	1.10	1.00	0.01	0.10	10.4%
2	1.00	2.20	1.00	2.20	1.00	2.20	1.60	1.00	0.66	0.60	60.0%
3	4.76	5.00	4.28	5.76	4.28	5.76	4.97	5.00	0.67	-0.03	0.5%
4	1.00	1.00	1.00	0.55	1.00	0.55	0.85	1.00	0.23	-0.15	15.1%
5	1.50	1.50	1.50	1.86	1.50	1.86	1.62	1.00	0.19	0.62	62.2%
6	3.86	3.86	3.86	3.86	3.86	3.86	3.86	5.00	0.00	-1.14	22.9%
7	2.33	2.95	5.00	2.33	5.00	2.33	3.32	3.00	1.32	0.32	10.8%
8	3.09	3.50	2.99	3.50	2.99	3.50	3.26	2.50	0.26	0.76	30.5%
9	1.00	0.45	1.00	1.00	1.00	1.00	0.91	1.00	0.22	-0.09	9.2%
10	2.81	3.91	2.53	3.91	2.53	3.91	3.27	5.00	0.72	-1.73	34.7%
11	1.00	1.54	1.00	1.00	1.00	1.00	1.09	3.00	0.22	-1.91	63.7%
12	5.00	5.56	5.00	5.00	5.00	5.00	5.09	5.00	0.23	0.09	1.9%
Promedio									0.39	-0.21	26.8%

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4-3 se observa el grafico de los atributos para todas las muestras, el valor promedio y el de referencia. Se observa un mejor ajuste del valor promedio para el método ANFIS (grafico b) en comparación con el método de optimización no lineal (grafico a). Los mayores valores distantes para ambos métodos se observan en los atributos de durabilidad,

simultaneidad, y estandarización, sin embargo, en el ANFIS se observa una mejor convergencia hacia el valor de referencia.

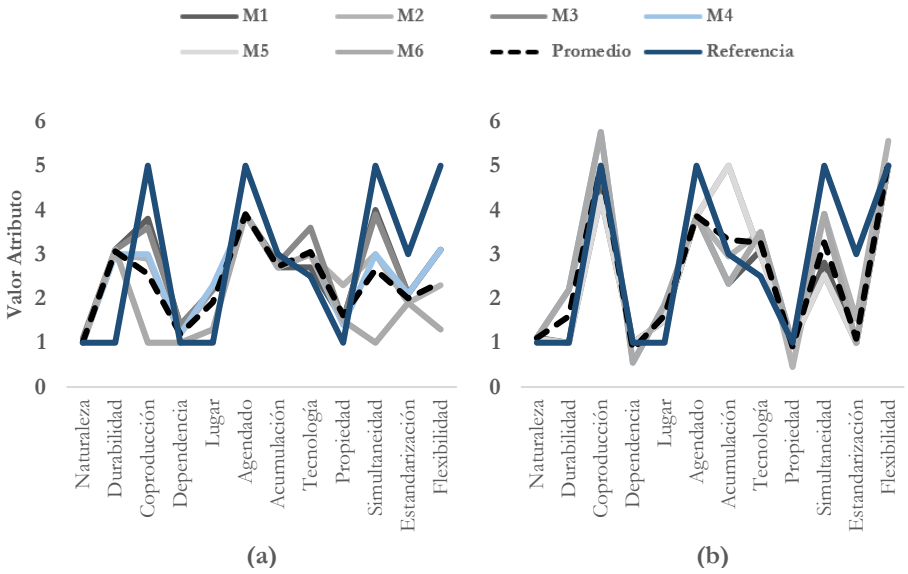


Figura 4-3 Resultados del modelo de optimización para los atributos del Caso 1: (a) modelo de optimización y (b) modelo basado en ANFIS.

Fuente: Elaboración propia.

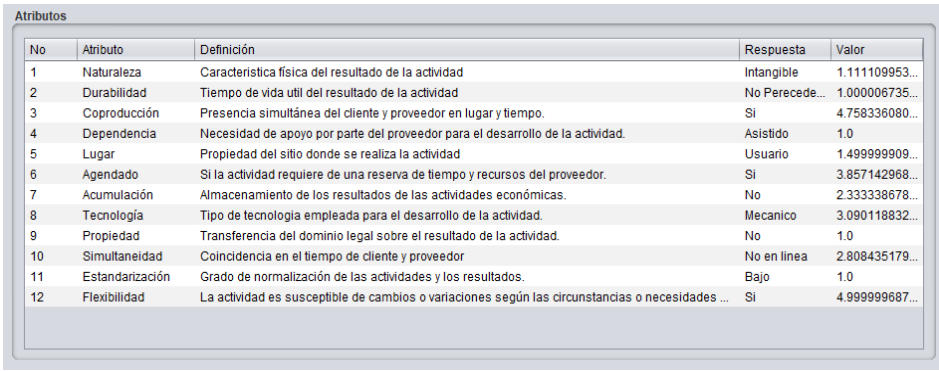
Par el caso de estudio, se emplea el modelo ANFIS para aplicar el motor de inferencia del CCSS. Se utilizó las respuestas para las características presentadas en la Figura 4-4 con las cuales se obtuvieron los resultados de los atributos presentados en la Figura 4-5. Estos resultados fueron muy cercanos a los obtenidos en el valor promedio del método ANFIS.

Caracteristicas

No	Caracteristica	Pregunta	Respuesta	Valor
1	Presencia	¿Cada vez que usted realiza su actividad es necesaria la presencia del ...	Mas del 70% de las veces	4.0
2	Comportamiento	¿el comportamiento del cliente afecta su actividad?	Mas del 70% de las veces	4.0
3	Continuidad	¿el cliente puede alterar la continuidad en la prestación de su actividad?	Mas del 70% de las veces	4.0
4	Abandono	¿el cliente puede abandonar las instalaciones en cualquier instante, in...	Menos del 30% de las veces	2.0
5	Operación	¿el cliente puede por si mismo desarrollar la actividad?	Nunca	1.0
6	Autonomia	¿el cliente decide el resultado de la actividad?	Entre el 30% y el 70% de las ve...	3.0
7	Influencia	¿el cliente puede modificar el desarrollo de la actividad?	Entre el 30% y el 70% de las ve...	3.0
8	Almacenamiento	¿los resultados de la actividad se pueden almacenar?	Entre el 30% y el 70% de las ve...	3.0
9	Tiempo de almacenamiento	¿el tiempo de almacenamiento afecta la calidad del resultado de la acti...	Entre el 30% y el 70% de las ve...	3.0
10	Anticipacion	¿es posible anticiparse a la satisfaccion de los requerimientos del clie...	Menos del 30% de las veces	2.0
11	Tiempo de espera	¿es posible que el cliente pueda esperar para satisfacer su necesidad ...	Menos del 30% de las veces	2.0
12	Espacio	¿cuenta con espacio para almacenar los resultados de la actividad?	Entre el 30% y el 70% de las ve...	3.0
13	Costo de almacenamiento	¿el almacenar resultados de su actividad le genera un costo significativ...	Mas del 70% de las veces	4.0
14	Uso de maquinas/equipos	¿requiere de maquinas y/o equipos para el desarrollo de su actividad?	Mas del 70% de las veces	4.0
15	Uso de personas	¿requiere de personas para el desarrollo de la actividad?	Siempre	5.0
16	Interaccion	¿el cliente interactua con alguna otra persona?	Entre el 30% y el 70% de las ve...	3.0
17	Beneficiario	¿su cliente es el usuario final del resultado?	Siempre	5.0
18	Permiso	¿el cliente necesitaria de una autorización especial para recomercializa...	Siempre	5.0
19	Comercialización	¿el cliente puede re-comercializar el resultado de la actividad?	Menos del 30% de las veces	2.0
20	Personalizacion	¿el cliente puede modificar las caracteristicas del resultado de la activi...	Entre el 30% y el 70% de las ve...	3.0
21	Apariencia	¿el resultado de la actividad es fisico?	Nunca	1.0
22	Productos complementarios	¿el cliente recibe algo adicional al resultado fisico de la actividad?	Siempre	5.0
23	Consumo	¿la utilizacion del resultado de la actividad es simultanea al desarrollo ...	Mas del 70% de las veces	4.0
24	Lugar	¿la actividad se desarrolla en sus instalacionaes?	Menos del 30% de las veces	2.0
25	Desplazamiento	¿Sus recursos se deben desplazar para el desarrollo de la actividad?	Mas del 70% de las veces	4.0
26	Programación de actividades	¿sus clientes deben reservar con anticipación para el desarrollo de la ...	Menos del 30% de las veces	2.0
27	Programación de recursos	¿sus recursos deben ser programados previamente?	Mas del 70% de las veces	4.0
28	Estandarización	¿tiene un estandar para el desarrolla de la actividad?	Menos del 30% de las veces	2.0

Figura 4-4 Preguntas ingresadas en *SchES* para el CCSS del Caso 1.

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.



No	Atributo	Definición	Respuesta	Valor
1	Naturaleza	Caracteristica física del resultado de la actividad	Intangible	1.111109953...
2	Durabilidad	Tiempo de vida util del resultado de la actividad	No Perecede...	1.000006735...
3	Coproducción	Presencia simultánea del cliente y proveedor en lugar y tiempo.	Si	4.758336080...
4	Dependencia	Necesidad de apoyo por parte del proveedor para el desarrollo de la actividad.	Asistido	1.0
5	Lugar	Propiedad del sitio donde se realiza la actividad	Usuario	1.499999909...
6	Agendado	Si la actividad requiere de una reserva de tiempo y recursos del proveedor.	Si	3.857142968...
7	Acumulación	Almacenamiento de los resultados de las actividades económicas.	No	2.333338678...
8	Tecnología	Tipo de tecnologia empleada para el desarrollo de la actividad.	Mecanico	3.090118832...
9	Propiedad	Transferencia del dominio legal sobre el resultado de la actividad.	No	1.0
10	Simultaneidad	Coincidencia en el tiempo de cliente y proveedor	No en linea	2.808435179...
11	Estandarización	Grado de normalización de las actividades y los resultados.	Bajo	1.0
12	Flexibilidad	La actividad es susceptible de cambios o variaciones según las circunstancias o necesidades ...	Si	4.999999687...

Figura 4-5 Resultados de los atributos en *SchES* del CCSS para el Caso 1.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

En la Figura 4-6 se presentan los resultados obtenidos al aplicar los tres SBR presentados en la sección 3.2.3. Se obtuvo como sector Servicio aplicando un algoritmo J48 con 99.6% de asertividad. Es de resaltar que para los demás modelos también se obtiene una clasificación de sector como Servicio, lo cual afirma la clasificación obtenida. Para la sección se obtuvo diferentes resultados con los modelos. Con el J48 se obtuvo Sección H correspondiente a *transporte y almacenamiento* con un asertividad de 84.06%, con el método PART se encontró Sección E correspondiente a *distribución de agua; evacuación y tratamiento de aguas residuales, gestión de desechos y actividades de saneamiento ambiental* con un asertividad de 81.16%, con el método DecisionTable se obtuvo Sección G de *comercio al por mayor y al por menor; reparación de vehículos automotores y motocicletas* con asertividad de 67.39% y para DecisionStump se obtuvo Sección J de *información y comunicaciones* con asertividad de 23.19%. En este caso, la sugerencia por mejor asertividad corresponde a la actividad descrita sección H de Transporte y almacenamiento.

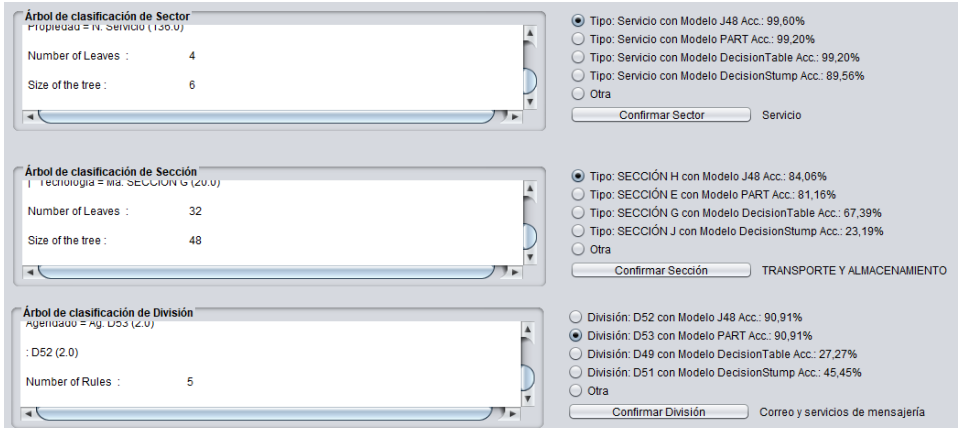


Figura 4-6 Resultados de clasificación de actividad económica del CCSS para el Caso 1.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

Para la división también se encontraron diferentes resultados. Con el J48 se encontró D52 de *Almacenamiento y actividades complementarias al transporte* con asertividad de 90.91%, con el PART D53 correspondiente a *Correo y servicios de mensajería* y asertividad de 90.91%, con DecisionTable D49 referente a *Transporte terrestre; transporte por tuberías* y asertividad de 27.27%, y con DecisionStump D51 de *Transporte aéreo* y asertividad de 45.45%. En este caso las dos sugerencias con mayor asertividad con divisiones relacionadas con los servicios de mensajería,

para este caso se ajusta mejor la segunda correspondiente a Correo y servicios de mensajería, por tanto, se selecciona esta opción con la división D53.

4.1.3 Resultados componente de programación de tareas para el Caso 1

Con la información y resultados del CCSS presentados en la sección previa, es necesario completar la información respecto a los campos cliente, recurso y control de flujo de la notación. En el Anexo Q segundo apartado (Q.2) se presenta la información suministrada para la notación en el caso de estudio. El siguiente paso, es aplicar los SBR presentado en la sección 3.3.2 en forma de cascada para el tipo de problema, la medida de desempeño y el grupo de técnica de solución. En la Figura 4-7 se presentan los resultados obtenidos en SchES para el tipo de problema en cada uno de los campos de la notación de PTSS. Para el cliente, el resultado obtenido fue Sche&Rou que representa un problema de combinado de programación de tareas y ruteo el cual representa que para solo los parámetros del cliente el problema presenta características de ambos problemas. El de mejor resultado fue del algoritmo PART con un 84.40% de asertividad, el siguiente fue el algoritmo J48 con 81.2% de asertividad y resultado fue el mismo. Los demás algoritmos obtuvieron Rou como respuesta, a excepción de DecisionStump que también obtuvo Sch&Rou. Aquí se decidió emplear la sugerencia de SchES para Sch&Rou debido a que para el campo cliente si presenta componentes de ambos problemas y este campo corresponde a la etapa de programación presentada en la descripción del caso de estudio donde los clientes son asignados a un periodo de programación. Para el campo del recurso, el mejor resultado fue con el algoritmo PART con un 77.6% para un problema de ruteo (Rou), y este mismo resultado se obtuvo para todos los algoritmos a excepción de DecisionStump en el cual se obtuvo un problema combinado de programación y ruteo (Sch&Rou). Aquí se decide utilizar la sugerencia de SchES para Rou debido a que para el campo recurso en el problema de mensajería corresponde a la etapa de diseño de rutas donde para cada día y cada vehículo (recurso)se determinara la secuencia en la cual visitara los clientes. En cuanto al campo de control de flujo, se obtuvo el resultado de Sch&Rou para cuatro de los algoritmos, y el de mejor asertividad fue de PART con 75.8%, sin embargo, para el algoritmo REPTree se encontró el resultado Rou con asertividad de 65.6%. Entonces se decide emplear el resultado sugerido por SchES que corresponde a la etapa de zonificación donde para cada día se asignan clientes a cada vehículo, y este el vínculo entro los clientes y recurso del problema de mensajería.



Figura 4-7 Resultados tipo de problema del CPT para el Caso 1.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

En la Figura 4-8 se presentan los resultados del tipo de criterio obtenido para el caso de estudio. Para el campo cliente se obtiene como mejor resultado el tipo Cliente-Recurso con el algoritmo PART con asertividad de 72%. Este es el seleccionado para la etapa de programación correspondiente. Para el campo recurso se obtuvo el resultado de Múltiple como tipo de criterio con el algoritmo PART y asertividad del 66.2%, se decide seleccionar el tipo de criterio Múltiple para la etapa de diseño de rutas. Para el campo de control de flujo, el mejor resultado en cuanto asertividad fue de Recursos con 64.0% para el algoritmo PART. En este campo se decide emplear esta sugerencia para la etapa de zonificación.

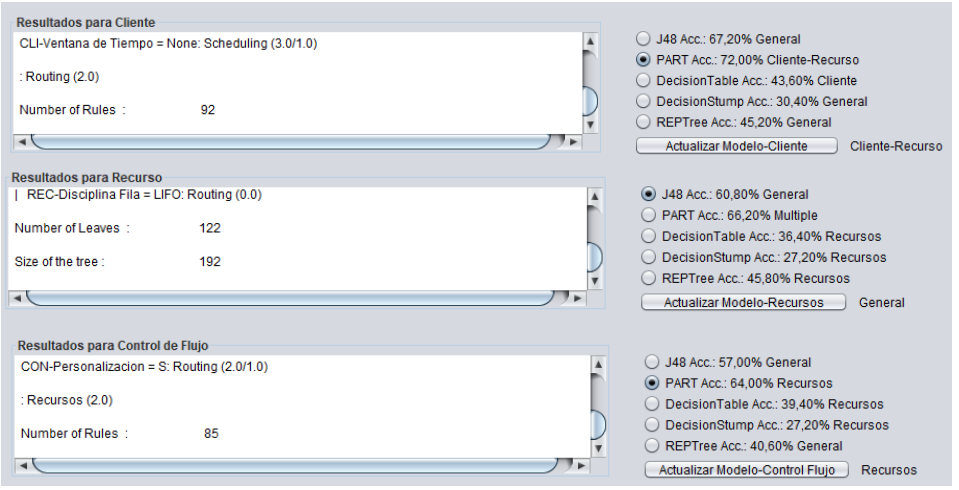


Figura 4-8 Resultados tipo de criterio del CPT para el Caso 1.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

Para el grupo de técnica de solución se presentan los resultados en la Figura 4-9. Los resultados sugeridos por *SchES* fueron Modelos estocásticos para todos los campos debido a que se consideran características como tiempos de llegada y procesos estocásticos, fuente ilimitada de las llegadas y la posibilidad de arribo de nuevos trabajos. Sin embargo, dado que no se cuenta con la información histórica para poder llevar a cabo los análisis pertinentes se decide seleccionar otras metodologías sugeridas por *SchES*. Para el campo cliente se seleccionó Metaheurísticas sugerida por el algoritmo DecisionTable con 48.6% de asertividad. Aunque este valor es muy bajo Para el campo recurso se seleccionó también Metaheurísticas sugerida por PART con 69% de asertividad. Para el campo control de flujo se optó por Heurística sugerida por el algoritmo REPTree con 48.4% de asertividad.

Dado esto resultado se procede a la selección específica de problema, medida, y técnica de solución. La primera decisión consiste en seleccionar si se abordara el problema de forma conjunta o separada por cada componente. De acuerdo con las etapas del proceso descritas en la Figura 4-1 se puede observar que el campo cliente se ajusta a la etapa de programación, el campo control de flujo a la etapa de zonificación, y el campo recurso se ajusta a la etapa de diseño de rutas. Por tanto, se decide ejecutar la selección específica de forma separada.

En la Figura 4-10 se presentan los resultados de *SchES* para cada campo. En el caso de cliente se observa un problema de recogida y entrega de forma general con una frecuencia de 17 en la base de documentos. Aquí la frecuencia es ajustada por los filtros realizados para considerar únicamente las clasificaciones de acuerdo con el tipo de sector, sección y división correspondiente. Para el campo de recursos, el tipo de problema corresponde a recogida y entrega para bienes con frecuencia de 7. Para el campo control de flujo, se obtuvo un resultado similar el campo cliente. En estos resultados se observa las diferentes posibilidades que puede

explorar el usuario en *SchES* para seleccionar el problema específico, como cambiar el tipo de tipo de problema, área, y subárea, sin embargo, la primera sugerencia será de acuerdo a los resultados obtenidos previamente y se mostrará el de mayor frecuencia.

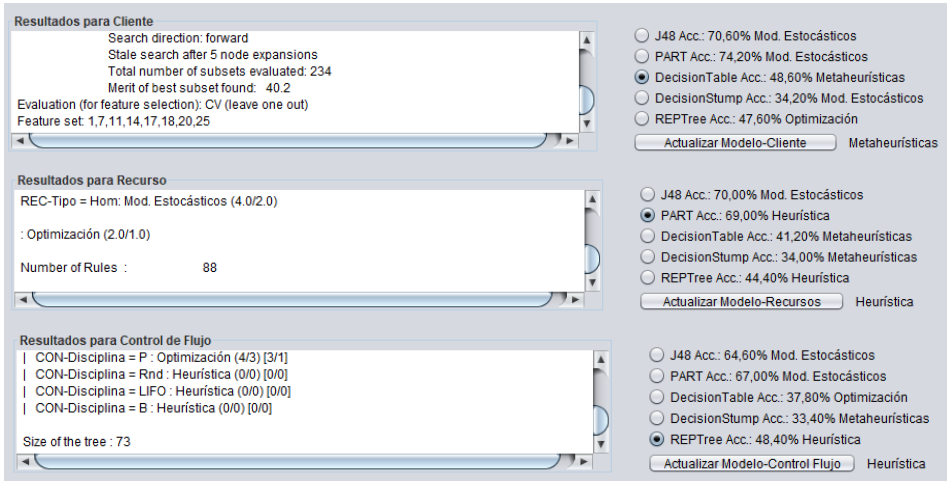


Figura 4-9 Resultados grupo de técnica de solución del CPT para el Caso 1.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

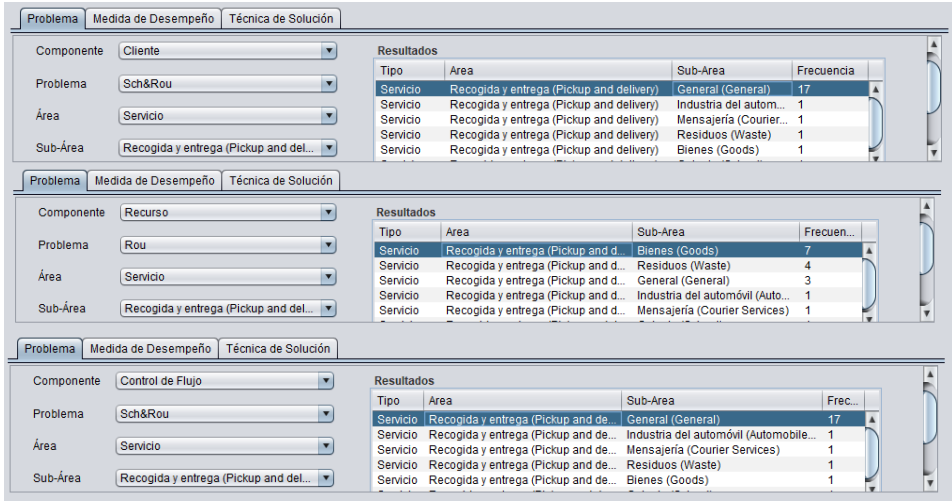


Figura 4-10 Resultados selección de problema específico del CPT por cada campo de la notación para el Caso 1.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

Una vez seleccionado el problema específico, se procede la selección de la medida de desempeño. Los resultados son presentados en la Figura 4-11 para cada campo de la notación de PTSS. Para el campo cliente la sugerencia es medida de cliente o ruteo con frecuencia de 4 ajustada a los resultados anteriores. Aquí se selecciona el tipo Cliente, y para la medida específica en este caso no se presentan sugerencias por lo que debe quedar a diseño del usuario. Para el campo recurso, la sugerencia es de medida relacionada con ruteo con frecuencia de 4 documentos. Esta es la medida seleccionada y es estrechamente relacionada con el problema de ruteo. Por último, para el campo control de flujo se encuentra sugerencias

de medida de cliente, ruteo o la combinación programación–ruteo (scheduling-routing), la cual es seleccionada por ser un tipo múltiple y acorde con la etapa de zonificación.



Figura 4-11 Resultados selección de medida de desempeño específica del CPT por cada campo de la notación para el Caso 1.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

La siguiente etapa corresponde a la selección de la técnica específica. En la Figura 4-12 se presentan los resultados para cada campo de la notación de PTSS. Para el campo cliente se observa que la sugerencia es el grupo de metaheurísticas con frecuencia de 18 documentos y la técnica específica es en primer lugar algoritmos genéticos con 4, seguida de modelos basados en conocimiento con 3, y después varias técnicas con 2. Aquí, de acuerdo con lo presentado en la descripción para la etapa de programación la cual se realiza generalmente de forma manual y de acuerdo con la experiencia del programador, se decide optar por los modelos basados en conocimiento con el fin de obtener un conjunto de reglas que permita de forma rápida obtener la programación de paquetes a ser entregados por cada día del horizonte de planeación. Adicionalmente se presenta el listado de referencias sugerida por *SchES* para consulta de problemas relacionados. Para el campo de recursos, se obtuvo como grupo el de metaheurísticas con frecuencia de 18 y de forma específica se presentan general con 5 documentos, y el resto de metaheurísticas con frecuencia de 2. Dado que los resultados muestran para todas la metaheurísticas una frecuencia de dos documentos en esta clasificación, se selecciona la metaheurística de colonia de hormigas (AC)O) debido a su común aplicación en los problemas de ruteo. Para el campo control de flujo, se observa que la primera sugerencia del grupo de técnica de solución es optimización con 7, seguida de heurística con 5, sin embargo, el resultado previo de la Figura 4-9 sugiere el grupo de heurísticas, con esta selección la técnica específica presenta 5 referencias para ser consultadas y determinar que procedimiento a emplear.

En la Figura 4-13 se presenta el resumen de los resultados obtenidos con la aplicación *SchES* para el caso de estudio, con los cuales el usuario podrá modelar el problema según el resultado seleccionado para cada campo de la notación y desarrollar los procedimientos seleccionados para dar solución al problema.

4.1.4 Resultados e indicadores para el Caso 1

Para resolver el problema descrito anteriormente con los resultados encontrados en la sección previa, se propuso descomponerlo en tres etapas, para luego solucionarlas de forma sucesiva.

En el Anexo Q tercer apartado (Q.3) se presenta la notación y modelos desarrollados para este caso de estudio. Las etapas de solución corresponden a:

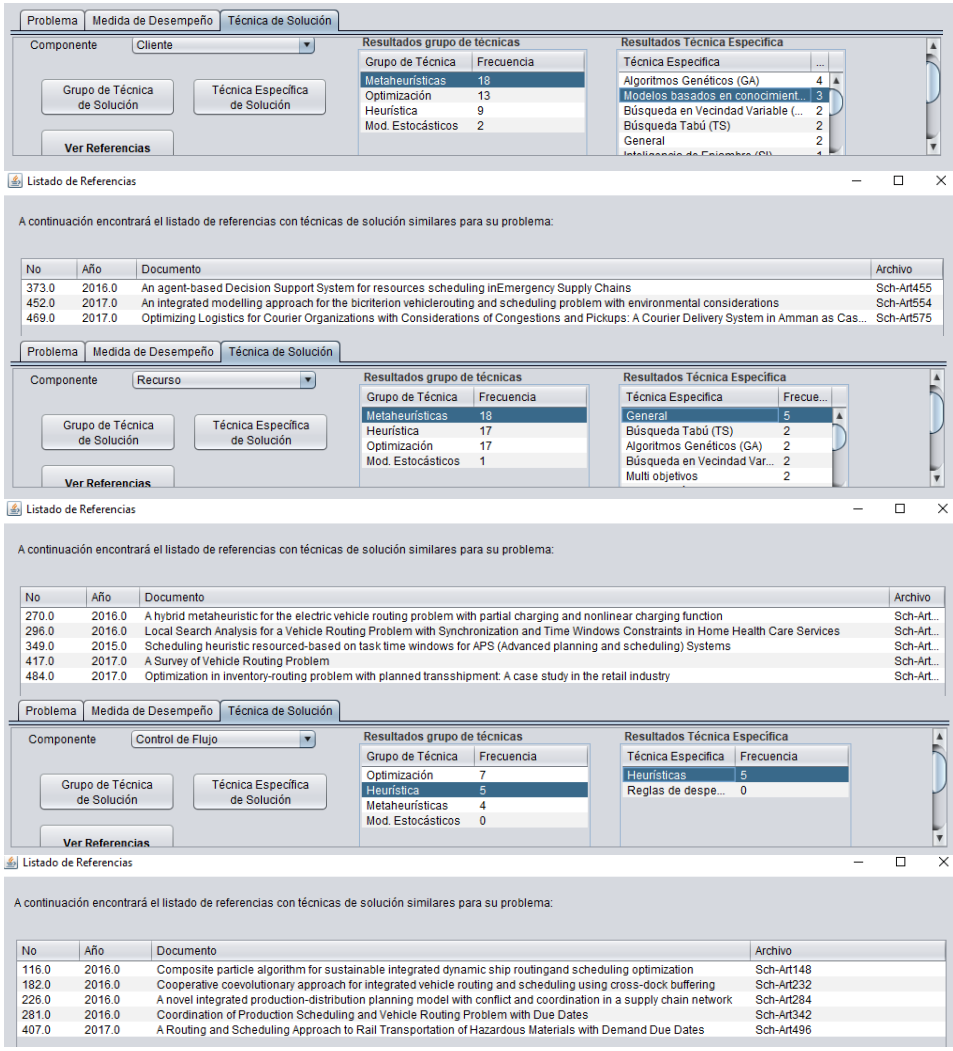


Figura 4-12 Resultados selección de técnica de solución específica del CPT por cada campo de la notación para el Caso 1.

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

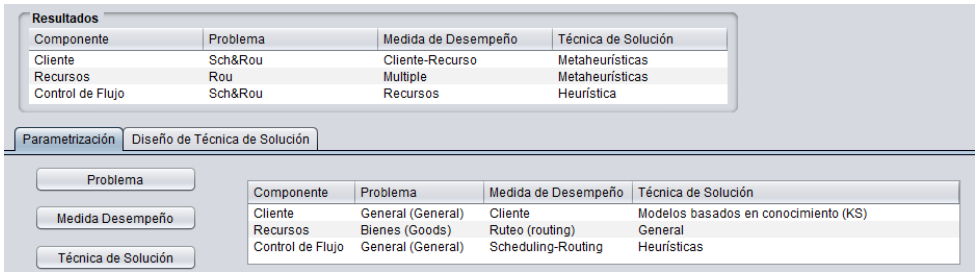


Figura 4-13 Resultados de la selección específica del CPT para el Caso 1.

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

1. Etapa de Programación: corresponde al campo de cliente donde se determina como método de solución un modelo basado en conocimiento para lo cual se selecciona un sistema experto que determina la fecha de visita de cada cliente en el periodo de planeación de p días, teniendo en cuenta, las fechas de las citas, las fechas límites de visita y las distancias. Para ello se utiliza un sistema experto, cuya estructura se compone principalmente de una base de conocimiento y un motor de inferencia que funciona como interpretador de reglas
2. Etapa de Zonificación (*Clustering*): corresponde al campo de control de flujo y se determinó como método de solución heurística. Para ese se encontró que dos heurísticas presentadas en (Patiño Chirva, Daza Cruz, & López-Santana, 2016)permiten agrupar los clientes de cada periodo de planeación de acuerdo a las distancias y los asigna a un vehículo k teniendo en cuenta el máximo de puntos que puede visitar en su horario de capacidad, su máxima capacidad de carga y las ventanas de tiempo de los clientes.
3. Etapa de Diseño de rutas: esta corresponde al campo de recurso donde el método seleccionado fue el de metaheurística. En esta etapa este es el problema consiste en determinar el orden en que cada vehículo visitara los clientes que le fueron asignados en el proceso de zonificación, teniendo también en cuenta las ventanas de tiempo de los clientes y su horario de capacidad disponible. Para la solución de este problema se propone utilizar la metaheurística de colonia de hormigas porque el problema se puede formular como un TSP con ventanas de tiempo según aplicaciones encontradas en (Kara & Derya, 2015), (López-Ibáñez & Blum, 2010), (C.-B. Cheng & Mao, 2007) y (Favaretto, Moretti, & Pellegrini, 2004), donde se ha aplicado colonia de hormigas con buenos resultados para este tipo de problemas. Además, si se toma en cuenta que la colonia de hormiga también se ha utilizado para el VRPTW más propuestas se pueden encontrar tales como (Ding, Hu, Sun, & Wang, 2012), (Pureza, Morabito, & Reimann, 2012) y (Yu, Yang, & Yao, 2011).

Los modelos y algoritmos descritos en estas etapas son presentados en detalle en el Anexo Q.3 Por otro lado, información adicional para el caso de estudio y resultados detallados se presentan en el Anexo Q y cuarto apartado (Q.4).

Para la muestra de 17492 clientes y tomando en cuenta la capacidad de 2700 visitas a través del sistema experto se programaron las rutas de tres días, la distancia promedio entre todos los clientes obtenida para cada día programado se resumen en la Tabla 4-3. Adicionalmente en la Figura 4-14 se muestran los clientes agrupados por colores por cada día de programación.

Tabla 4-3 Resultados etapa de programación para el Caso 1

	Cantidad de Clientes	Distancia Promedio (km)
Muestra Inicial	17492	
Día 1	2700	10.02
Día 2	2700	9.71
Día 3	2700	9.74

Fuente: Tomado de (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018).

Para la etapa de zonificación, se probaron ambas heurísticas para los tres días programados, el resumen de resultados se encuentra en la Tabla 4-4, con los cuales se puede concluir que la heurística basada en centros geométricos obtuvo mejores resultados que la de barrido, ya que la distancia promedio de las distancia promedio en cada clúster fue un 62% menor. Para observar gráficamente las diferencias entre las dos heurísticas, 10 clúster generados par el día 1 por cada una se muestran en la Figura 4-15 para la heurística de centro de gravedad (a) y de barrido (b) Adicionalmente, en el Anexo Q.4 se muestra el detalle de la distancia promedio en cada clúster de la heurística de centro geométrico para el día 1.

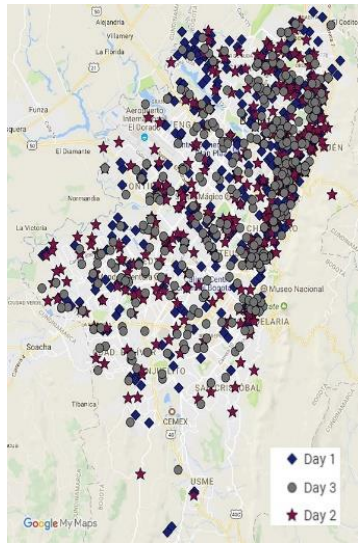
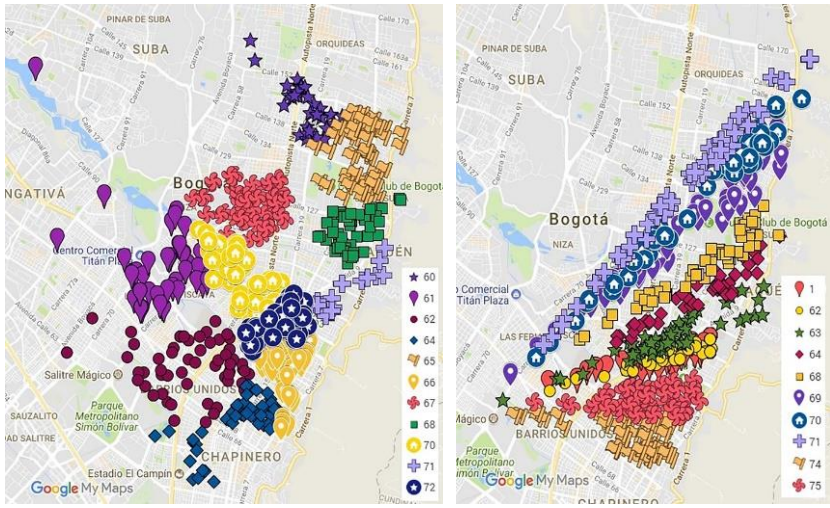


Figura 4-14 Resultados de programación para los tres días del Caso 1.
Fuente: Tomado de (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018).

Tabla 4-4 Comparación resultados etapa de zonificación para el caso 1

Día	Cantidad de clientes	Promedio Km entre todos los clientes		Diferencia	% Diferencia
		Barrido	Centro Geométrico		
Día 1	2700	3.16	1.20	-1.96	-62%
Día 2	2700	3.02	1.14	-1.87	-62%
Día 3	2700	2.96	1.15	-1.81	-61%
Promedio Diario	2700	3.04	1.16	-1.88	-62%

Fuente: Tomado de (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018).



(a) (b)

Figura 4-15 Resultados Zonificación para el caso 1(a) Heurística basada en centros geométricos y (b) Resultados heurística de barrido
Fuente: Tomado de (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018).

Para la etapa de diseño de rutas, luego de aplicar la metaheurística desarrollada a los resultados generados en la etapa anterior de zonificación, la distancia promedio recorrida entre clientes visitados en las rutas de todos los vehículos para los tres días de ruta se resumen en la Tabla 4-5. No se visitaron los 2700 clientes de capacidad ya que el 5% de las rutas fueron infactibles, en el Anexo Q.4 se presentan como ejemplo los resultados de las primeras 73 rutas del día 1. Un ejemplo de ruta se encuentra en la Figura 4-16, el orden de visita esta agrupado por colores.

Tabla 4-5 Resultados ACS-TSPTW para el diseño de rutas para el caso 1

	Distancia total recorrida (km)	Clientes visitados	Distancia promedio entre clientes (km)
Día 1	2512	2613	0.96
Día 2	2237	2273	0.98
Día 3	2567	2553	1.01
Promedio	2438	2480	0.98

Fuente: Tomado de (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018).

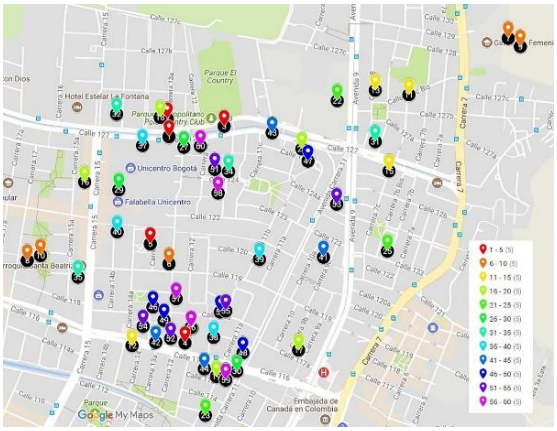


Figura 4-16 Ejemplo ruta 68 del día 1 para el caso 1

Fuente: Tomado de (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018).

Para medir el impacto se evalúan dos indicadores, el primero se refiere a la eficiencia en la utilización de los recursos y consiste en evaluar la distancia promedio entre los clientes. Primero se encuentra alta concentración, lo cual se puede evidenciar en los resultados sucesivos de las etapas, el resumen de estos resultados se encuentra en la Tabla 4-6, en los cuales este indicador disminuye en cada etapa con el modelo propuesto. Adicionalmente, se compara con un caso Base que considera los resultados reales de cada día comparados con los resultados derivados de la Propuesta. Se observa que en promedio en la etapa de programación se mejora este indicador en 6.9% (disminuye la distancia promedio), para la etapa de zonificación en 4.94% y la de diseño de rutas en 2.8%. Este resultado evidencia una mejora en la utilización de los operadores debido a que deben recorrer menos distancia si emplearan los resultados de la propuesta.

Tabla 4-6 Resumen indicador distancia promedio por etapas para el caso 1

	Programación			Zonificación			Diseño de rutas		
	Base	Propuesta	%Mejora Propuesta vs Base	Base	Propuesta	%Mejora Propuesta vs Base	Base	Propuesta	%Mejora Propuesta vs Base
Día 1	10.48	10.02	-4.42%	1.27	1.20	-5.88%	1.00	0.96	-4.32%
Día 2	10.85	9.71	-10.50%	1.20	1.14	-4.77%	1.02	0.98	-3.57%
Día 3	10.34	9.74	-5.77%	1.20	1.15	-4.18%	1.02	1.01	-0.53%
Promedio	10.56	9.82	-6.90%	1.22	1.16	-4.94%	1.01	0.98	-2.80%

Fuente: Tomado de (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018).

El segundo indicador evalúa la eficacia en la atención a los clientes. Para este indicador se mide un nivel de servicio definido como el cumplimiento de las citas programadas. Estas citas corresponden a una muestra de los clientes visitados en las fechas del caso Base para los cuales se asignó un fecha y hora específica en una ventana de tiempo, y se mide su cumplimiento. En la empresa de mensajería del caso de estudio el nivel de servicio oscila entre el 80% y el 85%. En la Tabla 4-7 se presenta el resumen de los resultados obtenidos para este indicador por cada día comparando con los datos reales y de la propuesta Se observa que con la propuesta el nivel del servicio esperado es del 93% en promedio, es decir, una mejora de 11% la eficacia en este aspecto.

Tabla 4-7 Indicador de nivel de servicio para el caso 1

	Clientes Programados a ruta	Clientes programados con cita	Clientes con cita visitados	% Cumplimiento del modelo	% Cumplimiento Real	Variación Modelo vs Real
Día 1	2700	546	524	96%	81%	15%
Día 2	2700	433	367	85%	82%	3%
Día 3	2700	333	324	97%	82%	15%
Promedio	2700	437	405	93%	82%	11%

Fuente: Tomado de (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018).

Para resumir, en este caso de estudio se evidencio la utilización de todas las funcionalidades propuestas del SE desarrollado e implementado en *SchES*. Además, se evidencio la mejora en la función de programación de tareas con el desarrollo especifico de una técnica de solución en tres fases, la cual permitiría una mejora en la eficiente utilización de los recursos y un incremento en la eficacia para la atención de los clientes.

4.2 Caso 2: Servicio de cuidado a la salud domiciliaria

Este caso[7] de estudio describe la aplicación del SE propuesto en el cuidado a la salud domiciliaria (*Home Health Care),* el cual es una tipo de servicio médico en el cual personal capacitado atiende las necesidades en materia de salud de los pacientes en sus hogares (Genet, Boerma, Kroneman, Hutchinson, & Saltman, 2012; Yalcindag, Matta, & Sahin, 2012). El problema de forma general considera una serie de pacientes que necesitan del servicio de salud que se atiende en su domicilio por un operador de salud. Cada servicio o visita está caracterizada por un nivel de habilidad o experticia determinado y una duración específica. Se considera también la prioridad en la atención con el fin de visitar lo más pronto posible a los pacientes con condiciones médicas más críticas.

Este problema es caracterizado generalmente por dos problemas clásicos de optimización, los problemas de asignación y de ruteo de operadores de salud. Begur, Miller & Weaver (1997) fueron de los primeros autores en tratar este problema desde la investigación de operaciones,

[7] El trabajo de esta sección es basado en las publicaciones presentadas en *CIIO2016* (E. López-Santana, Espejo-Díaz, et al., 2016) y en *Applied Computer Science in Engineering* (E. R. López-Santana et al., 2016). Estos fueron desarrollados en colaboración con el Ing. Julián Espejo Diaz quien se encargó de la recolección de información y el desarrollo de los modelos de optimización en el marco de su trabajo de grado de Ingeniería Industrial titulado "Modelo de simulación basado en agentes para resolver el problema de ruteo en el cuidado de la salud domiciliaria", en el año 2016 bajo la tutoría del profesor PhD. Germán Méndez-Giraldo y el PhD.(c) Eduyn López-Santana en la Universidad Distrital. Este proyecto es vinculado directamente a la tesis de doctorado en el grupo de investigación ARCOSES.

Adicionalmente, parte del contenido de esta sección se basa en el trabajo publicado en *Computational Science and Its Applications* (E. López-Santana, Méndez-Giraldo, & Rodriguez-Molano, 2018a). El trabajo se desarrolló en conjunto con el PhD. José I. Rodriguez-Molano quien colaboro con el soporte para el desarrollo computacional de la herramienta SchES para la aplicación en el caso de estudio.

utilizando heurísticas para asignar y ejecutar el ruteo de los operadores de salud. Cheng & Richs (1998) propusieron un modelo de programación matemática para resolver el problema de asignación y ruteo de enfermeros, y desde ése entonces el interés en investigación ha crecido rápidamente como se observa en revisiones de literatura en (Fikar & Hirsch, 2017) donde se caracteriza por problemas como el de asignación de personal conocido como *Staff Rostering Problem* y el problema de ruteo de vehículos (Z. Yuan & Fügenschuh, 2015). En la literatura correspondiente a la toma de decisiones operativa del cuidado a la salud domiciliaria existen trabajos que pueden abordar uno o ambos componentes del problema. Es decir, existe literatura que sólo tiene en cuenta a la asignación sin tener en cuenta el componente de ruteo, así como existe literatura que aborda ambos componentes. En trabajos como (Bachouch, Guinet, & Hajri-Gabouj, 2010; Borsani, Matta, Beschi, & Sommaruga, 2006) sólo se tiene en cuenta la asignación de tareas a los profesionales de la salud sin tener en cuenta su ruteo. Estos trabajos se centran solo en determinar la secuencia de tareas, trabajos o los pacientes que deben visitar los operadores de salud sin considerar los costos ni los tiempos de viaje para realizar las visitas.

Respecto a los trabajos que han abordado ambos componentes del cuidado a la salud domiciliaria, se puede optar primero por realizar la asignación de tareas para luego encontrar las mejores rutas a seguir. Issaoui, Zidi, Marcon & Ghedira (2015) abordan el problema en tres fases. La primera fase resuelve el problema de asignación, la segunda construye las rutas para cada cuidador y la tercera fase trata de mejorar la solución encontrada en la segunda fase. Otro trabajo en el cual se descompone el problema de asignación y ruteo en fases se encuentra en (Yalçındağ, Cappanera, Grazia Scutellà, Şahin, & Matta, 2016). La manera más común de abordar ambos componentes es hacerlo simultáneamente. Técnicas como generación de patrones encontrada en (Cappanera & Scutellà, 2013) logran tratar el problema sin descomponerlo en fases. También se encuentran modelos de programación matemática logran tratar el problema como una sola unidad, ejemplo de ello es el modelo de programación matemática encontrado en (Braekers, Hartl, Parragh, & Tricoire, 2016) que es resuelto mediante la utilización de heurísticas.

Esta sección presenta un caso de aplicación del SE propuesto para un problema de cuidado a la salud domiciliaria, el cual consiste en la prestación de un servicio médico en el cual personal capacitado atiende las necesidades en materia de salud de los pacientes en sus hogares.

4.2.1 Descripción del caso 2

El problema de cuidado a la salud domiciliaria es una actividad compleja debido a la cantidad de criterios y restricciones que debe considerarse de forma simultánea y es realizada en su mayoría de forma manual por personal experimentado en el sector. Dentro de las principales restricciones se tiene: tiempo de trabajo de los operadores de salud, el envío de operadores de salud calificados a realizar las visitas, la salida y el regreso de los operadores de salud a sus respectivos hogares, entre otras. Es importante resaltar que el componente dinámico del problema surge en la aceptación de nuevos pacientes o nuevas demandas cuando el sistema esté corriendo, en este caso un nuevo esquema de ruteo debe ser generado con el fin de atender a los nuevos pacientes. Se realizan las siguientes consideraciones puntuales al problema:

- Cada servicio o visita está caracterizada por un nivel de habilidad o experticia determinado y una duración específica.
- Se considera también la prioridad en la atención con el fin de visitar lo más pronto posible a los pacientes con condiciones médicas más críticas. La prioridad en el servicio toma valores desde 1 (servicio urgente) hasta 5 (servicio menos urgente), por lo cual se busca que los tiempos de llegada a las ubicaciones de los pacientes coincidan con los tiempos

establecidos en el TRIAGE[8] disponibles en (García, 2013). Por tanto, se pretende enviar operadores de salud calificados a los hogares de los pacientes respetando los tiempos establecidos por el TRIAGE en lo posible mientras se minimizan los tiempos de transporte.

- Los operadores de salud empiezan y terminan sus rutas o recorridos en sus hogares, tienen un tiempo máximo de trabajo determinado y están caracterizados por un nivel de habilidad o experticia "*q*", el cual toma valores desde 1 (cuidados usuales) hasta 5 (atención especializada).
- La visita domiciliaria es realizada solo si la habilidad del recurso (operador de salud) es mayor o igual a la habilidad requerida por el paciente, en otras palabras, cada operador de salud con un nivel de habilidad "*q*" solo puede visitar pacientes que necesitan una habilidad menor o igual a "*q*".
- Si en un horizonte de planeación un paciente requiere dos o más visitas domiciliarias se creará una nueva demanda.
- Los tiempos de viaje son determinísticos.
- Los operadores de salud trabajan en la misma área geográfica y pueden operar en todo el territorio de los pacientes.
- Los tiempos de viaje de una ubicación a otra son los mismos sin importar la dirección de viaje.

Para el caso de estudio se emplea la información de un proveedor del servicio de cuidado a la salud domiciliaria[9] en la ciudad de Bogotá. El proveedor cuenta con un total de 21319 usuarios afiliados al servicio en el año 2016, los cuales se distribuyen por localidades como se muestra en la Tabla 4-8. Los usuarios al momento de notificar su necesidad del servicio se convierten en pacientes a los cuales se les asigna y envía un operador de salud calificado para que realice la atención correspondiente.

Tabla 4-8 Distribución de usuarios del servicio de cuidado domiciliario por localidad

#	Localidad	Número de usuarios	#	Localidad	Número de usuarios
1	Usaquén	2917	**13**	Teusaquillo	1355
2	Chapinero	886	**14**	Los mártires	283
3	Santafé	402	**15**	Antonio Nariño	263
4	San Cristóbal	220	**16**	Puente Aranda	748
5	Usme	73	**17**	La Candelaria	200
6	Tunjuelito	174	**18**	Rafael Uribe	228
7	Bosa	232	**19**	Cuidad Bolívar	156
8	Kennedy	2195	**20**	Comuna 1	34
9	Fontibón	1950	**21**	Comuna 2	32
10	Engativá	3008	**22**	Comuna 5	51
11	Suba	4881	**23**	Comuna 6	18
12	Barrios unidos	1013			

Fuente: datos presentados en (Espejo Diaz, 2016)

La información histórica del sistema se recolectó durante 92 días consecutivos respecto a: información histórica de las solicitudes por hora presentadas en 92 días, georreferenciación o ubicación espacial de los hogares de los usuarios mediante las coordenadas de latitud y longitud, georreferenciación de los hogares de los operadores de salud, tiempo de servicio de los pacientes, nivel de habilidad de los operadores de salud, nivel de habilidad requerido por

[8] TRIAGE es un concepto utilizado en emergencias médicas el cual establece los tiempos de respuesta de acuerdo con la prioridad de los pacientes

[9] Esta información fue suministrada por el M.Sc. Gustavo Flórez, a quien se agradece por su colaboración a este proyecto dentro del desarrollo de su tesis de Maestría en Ingeniería Industrial de la Universidad Distrital dirigida por PhD(c) Eduyn López-Santana en el año 2016.

los pacientes para que se les realice una visita domiciliaria, y nivel de prioridad en la atención de los pacientes.

A continuación, se presenta los resultados de la aplicación del SE para el CCSS con el fin de determinar el sector, sección y división de esta actividad, y posteriormente se aplica el SE para el CPT con el fin de identificar el problema a resolver y la técnica de solución posible.

4.2.2 Resultados para la clasificación de sistemas de servicios para el Caso 2

La aplicación del SE para el CCSS en el caso de estudio parte de la adquisición de conocimiento para las características asociadas al proceso. En este caso se tomó una muestra de una empresa del sector de cuidado a la salud quien ofrece un servicio de atención domiciliaria y se elaboraron 6 muestras de la encuesta sobre las 31 características. Los datos de las respuestas obtenidas se presentan en detalle en el Anexo R primer apartado (R.1).

En la Tabla 4-9 se presentan los resultados de los valores de los atributos obtenidos para cada una de las muestras (M1 a M6), el promedio de ellas, el valor de referencia, la desviación estándar de las muestras, el error y el error absoluto en cada columna, para el modelo de optimización no lineal. De manera similar, en la Tabla 4-10 se presentan los resultados del método ANFIS para esta fase de adquisición de conocimiento. Se puede observar como el error absoluto medio para todos los atributos es de 25.7% para el método ANFIS en comparación con 63.3% del método de optimización no lineal, lo cual refleja una mejor precisión para el método ANFIS, aunque la desviación en las muestras es menor para el método de optimización.

Tabla 4-9 Resultados de atributos para el modelo de optimización no lineal para el Caso 2

a	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Promedio	Referencia	Desviación	Error	Error absoluto
1	1.10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.02	1.00	0.04	0.02	1.7%
2	4.00	4.00	3.90	4.00	4.00	4.00	3.98	5.00	0.04	-1.02	20.3%
3	4.60	4.60	4.60	4.70	4.40	4.60	4.58	5.00	0.10	-0.42	8.3%
4	1.60	1.60	1.70	3.20	1.60	1.50	1.87	1.00	0.66	0.87	86.7%
5	2.20	2.30	2.20	2.20	2.20	2.20	2.22	1.00	0.04	1.22	121.7%
6	3.90	3.80	4.80	2.90	3.90	3.80	3.85	3.00	0.60	0.85	28.3%
7	1.70	1.50	2.30	1.90	1.80	1.90	1.85	1.00	0.27	0.85	85.0%
8	1.20	2.20	1.20	2.20	2.20	2.20	1.87	1.00	0.52	0.87	86.7%
9	1.40	2.20	1.40	1.50	2.20	1.40	1.68	1.00	0.40	0.68	68.3%
10	5.00	4.90	4.90	5.00	4.80	4.90	4.92	5.00	0.08	-0.08	1.7%
11	3.10	3.10	3.20	3.10	3.10	3.10	3.12	1.00	0.04	2.12	211.7%
12	2.90	2.90	3.80	2.90	2.90	2.90	3.05	5.00	0.37	-1.95	39.0%
Promedio									0.26	0.33	63.3%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-10 Resultados de atributos para el modelo ANFIS para el Caso 2

a	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Promedio	Referencia	Desviación	Error	Error absoluto
1	1.09	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.00	0.01	0.11	10.7%
2	3.67	3.67	1.00	3.67	3.67	3.67	3.22	5.00	1.09	-1.78	35.6%
3	5.00	5.00	5.00	5.37	5.00	5.00	5.06	5.00	0.15	0.06	1.2%
4	1.06	1.06	1.06	2.02	1.06	0.96	1.20	1.00	0.40	0.20	20.2%
5	1.50	1.86	1.50	1.50	1.50	1.50	1.56	1.00	0.15	0.56	56.1%
6	3.86	4.00	3.86	1.80	3.86	4.00	3.56	3.00	0.87	0.56	18.7%
7	0.94	1.06	1.14	2.12	2.17	1.00	1.40	1.00	0.58	0.40	40.4%
8	1.32	1.28	1.32	1.28	1.28	1.28	1.29	1.00	0.02	0.29	29.2%
9	1.00	0.40	1.00	1.00	0.40	1.00	0.80	1.00	0.31	-0.20	19.9%
10	5.01	4.89	4.89	5.01	5.08	4.89	4.96	5.00	0.08	-0.04	0.7%
11	1.40	1.40	3.00	1.40	1.40	1.40	1.67	1.00	0.65	0.67	66.7%
12	4.50	4.50	4.67	4.50	4.50	4.50	4.53	5.00	0.07	-0.47	9.4%
Promedio									0.36	0.03	25.7%

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en la Figura 4-17 se observa el grafico de los atributos para todas las muestras, el valor promedio y el de referencia. Se observa un mejor ajuste del valor promedio para el

método ANFIS (grafico b) en comparación con el método de optimización (grafico a). Los mayores valores distantes para ambos métodos se observan en los atributos de durabilidad, lugar y estandarización, sin embargo, en el ANFIS se observa una mejor convergencia hacia el valor de referencia.

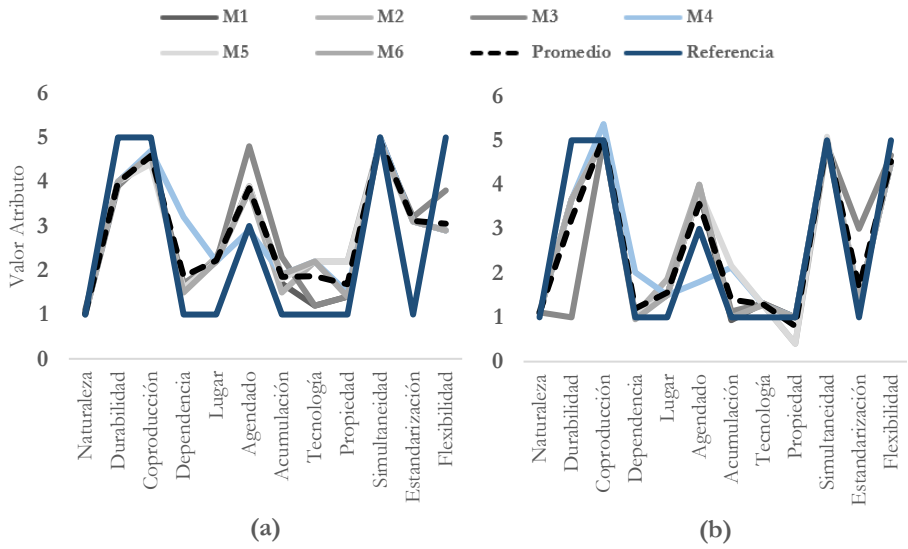


Figura 4-17 Resultados del modelo de optimización para los atributos del Caso 2: (a) modelo de optimización y (b) modelo basado en ANFIS.

Fuente: Elaboración propia.

Se toma el resultado del promedio de los atributos obtenidos con el modelo ANFIS para aplicar los SBR del motor de inferencia del CCSS. En la Figura 4-18 se presentan los resultados obtenidos al aplicar los tres SBR presentados en la sección 3.2.3 mediante la herramienta SchES. Se obtuvo como sector Servicio aplicando un algoritmo J48 con 99.6% de asertividad. Es de resaltar que con los demás modelos también se obtendría una clasificación de sector Servicio, lo cual afirma la clasificación obtenida como resultado del sector. Para la sección se obtuvo Sección Q correspondiente a actividades de atención de la salud humana y de asistencia social con un algoritmo J48 y asertividad del 84.6%. Este resultado es congruente con la actividad desarrollada relacionada con salud. El siguiente mejor resultado corresponde a la sección N de actividades de servicios administrativos y de apoyo, y otro a la sección G de comercio al por mayor y al por menor; reparación de vehículos automotores y motocicletas. Por último, para la división se obtuvo como resultado sección D87 de actividades de atención residencia medicalizada para todos los modelos, el mejor fue de DecisionStump con 66.7% de asertividad. Este resultado obtenido corresponde a la actividad que desarrolla el prestador de salud y fue validada con el objeto de la organización.

4.2.3 Resultados del componente de programación de tareas para el Caso 2

Tomando la información y resultados del CCSS para el caso de estudio de cuidado a la salud domiciliaria es necesario completar la información respecto a los campos cliente, recurso y control de flujo de la notación. Esta información se presenta en el Anexo R segundo apartado (R.2).

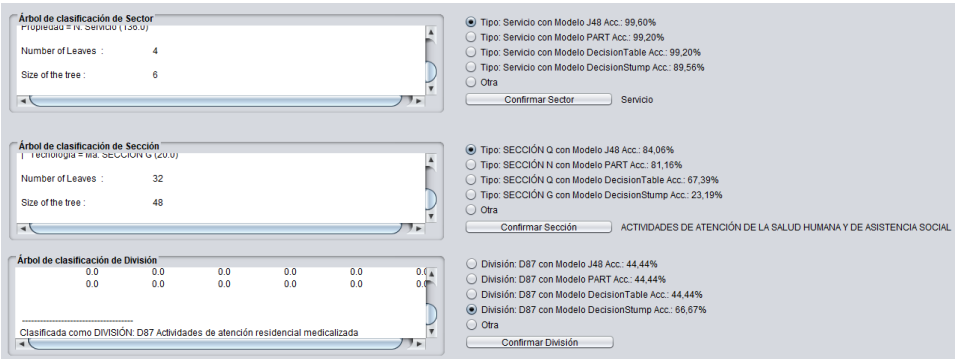


Figura 4-18 Resultados de clasificación de actividad económica del CCSS para el Caso 2.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

Se debe aplicar los SBR presentado en la sección 3.3.2 en forma de cascada para el tipo de problema, la medida de desempeño y el grupo de técnica de solución. En la Figura 4-19 se presentan los resultados obtenidos en *SchES* para el tipo de problema en cada uno de los campos. Para el cliente, el resultado obtenido fue Sche que representa un problema de programación de tareas puro (scheduling) el cual representa que para solo los parámetros del cliente el problema representa un caso de asignación como se ha evidenciado en la literatura. El de mejor resultado fue del algoritmo PART con un 84.40%. de asertividad Para el campo del recurso, el mejor resultado fue con algoritmo PART con un 77.6% para un problema de programación (sche), seguida del algoritmo J48 con un resultado de ruteo (Rou) y un asertividad de 74.6% y los demás obtuvieron como resultado Sch&Rou, es decir Programación y Ruteo. En este caso, no hay un resultado unánime para los problemas desde el punto de vista del recurso, lo cual también se evidencia en la literatura respecto al problema. Por último, está el resultado respecto al campo control de flujo, en este caso se obtuvo como mejor resultado un problema de ruteo (Rou) con un 75.8% de asertividad para el algoritmo PART, seguida de un problema combinado (Sch&Rou) con un 71.4% de asertividad en el J48, luego está de nuevo Sch&Rou para el algoritmo REPTree con 65.6%, luego están Sche con 63.2% y de nuevo Sch&Rou con 55.6% para DecisionStump. Este resultado, ya presenta el componente de ruteo en el problema presentando la interacción de los problemas entre el cliente y recurso. Finalmente, se tomó como el de mejor asertividad de los resultados del campo cliente, para el de recursos se tomó el de ruteo ya que es el más adecuado para este componente, y para el control de flujo se selecciona programación y ruteo combinado el cual representa el problema de cuidado a la salud domiciliaria.

En la Figura 4-20 se muestra el resultado obtenido de SchES para el tipo de criterio para el caso de cuidado a la salud domiciliaria para cada componente de la notación de PTSS. Se observa que para el campo cliente el resultado con mejor asertividad fue el Cliente-Recurso con 72% para el algoritmo PART. Los demás resultados fueron para criterios de scheduling, General, y Cliente. Para el campo de recurso, el mejor resultado obtenido fue de tipo general con algoritmos PART (66.20%) y J48 (66.8%), los demás para criterios tipo cliente y recursos. Por último, para el control de flujo el criterio tipo General fue el de mejor resultado para algoritmo PART con 64% de asertividad. Solo el algoritmo de DecisionStump obtuvo como resultado recursos, los demás fueron el criterio de tipo general. En este sentido se observa que el tipo de criterio aquí sugerido con mejor resultado fue la relación cliente-recurso para un criterio combinado o múltiple.

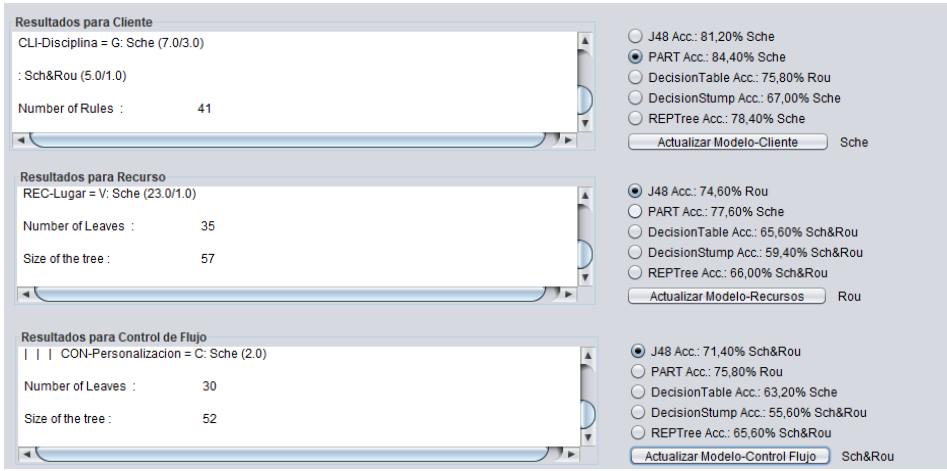


Figura 4-19 Resultados tipo de problema del CPT para el Caso 2.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

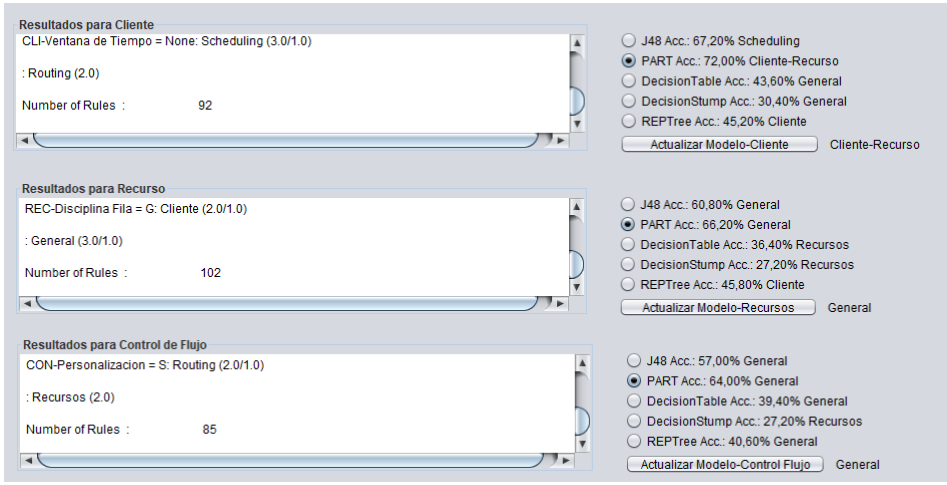


Figura 4-20 Resultados del tipo de criterio del CPT para el Caso 2.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

Por último, se debe aplicar el SBR para determinar el grupo de técnica de solución. En la Figura 4-21 se muestran los resultados obtenidos mediante la herramienta *SchES*. En este caso se obtuvo para el campo de cliente la sugerencia del grupo de Modelos Estocásticos con una exactitud fue de 74.2% del algoritmo PART, para recurso fue la de Metaheurísticas con 71.8% de asertividad del algoritmo J48, y para control de flujo se encontró la sugerencia de Optimización con de 67% de asertividad del algoritmo PART. Estos fueron los mejores valores obtenidos por *SchES* y fueron los que se seleccionaron para el grupo de técnicas de solución.

Se obtuvo como resultado para el tipo de problema una combinación de programación (cliente), y ruteo (recurso y control de flujo), para medida de desempeño un objetivo múltiple en la combinación de cliente y recurso, y como grupo de medida de desempeño el emplear modelos estocásticos para campo cliente, metaheurísticas para recurso, y optimización para ruteo. Entonces, ahora se debe decidir si se aborda el problema de forma conjunta o separada. Dada la información suministrada por la empresa de servicios de salud domiciliario en cuanto

a solicitudes de citas historias y que la demás información en cuanto a recursos es tomada como un supuesto, la decisión se toma para trabajar un problema de programación y ruteo (Sch&Rou) de forma conjunta para todos los campos, con un objetivo múltiple de Cliente-Recurso y mediante métodos de optimización.

Empleando la herramienta *SchES*, se presentan los resultados de la Figura 4-22 en cuanto a la selección específica de la técnica de solución. En la parte superior se presenta el resumen obtenido, el cual presenta primero la pestaña de Problema en la cual se aplican las reglas de problema de Sche&Rou, del área de servicio y la sub-área de Hospitalidad y cuidado de la salud, la cual presenta una frecuencia de problemas de cuidado de salud domiciliaria de 26 documentos, seguida de otros problemas como las citas, el servicio de emergencias, servicios preventivos, etc. Aquí el usuario puede seleccionar la mejor sub-área de acuerdo a su problema en particular, se seleccionó el de mayor frecuencia. Luego se presenta la pestaña de medida de desempeño, en la cual se seleccionó un criterio múltiple con una frecuencia de 5 documentos. Por último, está la técnica específica en la cual se presenta los grupos con su respectiva frecuencia. Se puede observar que el primer grupo es de heurísticas con una frecuencia de 11, seguida de optimización con una de 10. Se selecciona la de optimización y en la técnica particular aparece programación lineal entera mixta con 9 documentos y programación lineal con 1. Aquí se puede observar que el SE sugiere que la técnica con mayor frecuencia en la base de conocimiento es la de programación lineal entera mixta de acuerdo a los resultados obtenidos anteriormente y a las selecciones previas en la fase de parametrización de la técnica.

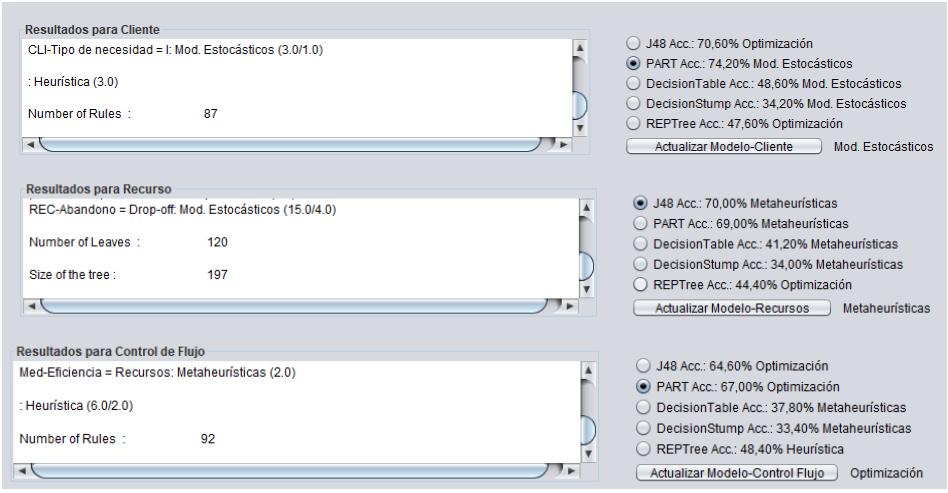


Figura 4-21 Resultados del grupo de técnica de solución del CPT para el Caso 2.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

Por otro lado, la herramienta SchES permite que el usuario pueda visualizar los documentos de la base de conocimiento sugeridos. Este resultado se presenta en la Figura 4-23, donde se muestra la ventana con una tabla de los documentos indicando el número, el año, el título y el archivo, el cual se puede obtener por el usuario para consultar de forma específica. Se destacan las referencias de (Cissé et al., 2017; Gutiérrez & Vidal, 2013; Landa-silva, 2016) donde presentan modelos de optimización para el cuidado a la salud domiciliaria.

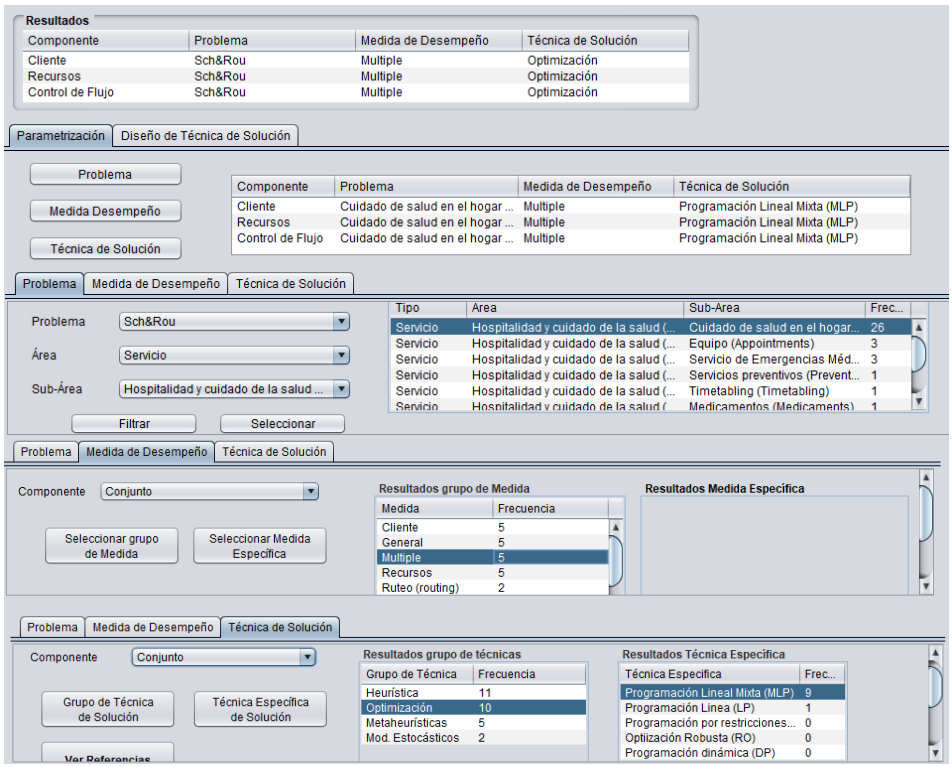


Figura 4-22 Resultados de la selección específica del CPT para el Caso 2.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

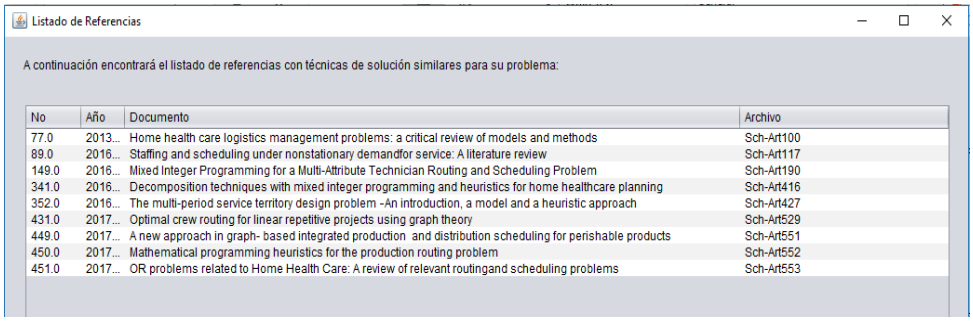


Figura 4-23 Resultados de los documentos relacionados con la técnica seleccionada en el CPT para el Caso 2.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

4.2.4 Resultados e indicadores para el Caso 2

En el Anexo R y tercer apartado (R.3) se presenta el modelo de optimización planteado para el problema de servicio de cuidado a la salud domiciliaria presentado en (E. López-Santana, Espejo-Díaz, & Méndez-Giraldo, 2016). Este modelo se implementó sobre una instancia que se encuentra en el Anexo R.4 referente a la localización de los cuidadores de salud y de los pacientes.

Al resolver el modelo presentado, en la Tabla 4-11se muestran los resultados para la función multi-objetivo del problema, la cual está compuesta por una parte que busca minimizar el

tiempo de desplazamiento de operadores de salud (FO_1) y a la segunda que minimizar la demora en la prestación del servicio (FO_2), que corresponde a una ponderación mediante los parámetros α y β, respectivamente. Se puede observar que el menor valor de la función objetivo global se obtiene cuando se le da más importancia a la minimización de la demora en la prestación del servicio. Sin embargo, este comportamiento de la función objetivo se puede observar en la Figura 4-24 que muestra la frontera de las funciones objetivo para la instancia de prueba. Esta frontera representa el límite de los posibles valores de esta función multiobjetivo y mostrar que de acuerdo con la selección de pesos de α y β, se mejora o se empeora una función objetivo en particular.

Tabla 4-11 Resultados para la instancia de prueba del Caso 2.

α	β	FO_1	FO_2	FO
1.00	0.00	456.53	347.45	456.53
0.90	0.10	456.53	347.45	445.62
0.80	0.20	456.53	347.45	434.71
0.70	0.30	456.53	347.45	423.80
0.60	0.40	461.35	338.56	412.23
0.50	0.50	483.36	305.62	394.49
0.40	0.60	483.36	305.62	376.72
0.30	0.70	483.36	305.62	358.94
0.20	0.80	517.39	295.00	339.48
0.10	0.90	517.39	295.00	317.24
0.00	1.00	517.39	293.75	293.75

Fuente: Tomado de n (Espejo Diaz, 2016)

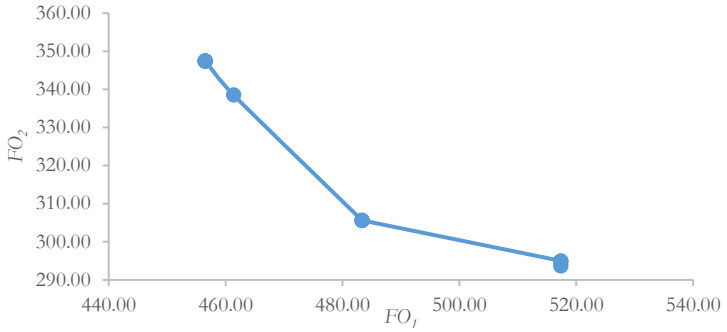


Figura 4-24 Frontera eficiente de las funciones objetivo FO_1 y FO_2 de la instancia de prueba para el Caso 2.

Fuente: Elaboración propia.

En este caso es difícil la comparación para poder determinar si se puede mejorar o no indicadores de eficiencia y eficacia. Para esto, se debe seleccionar una combinación de parámetros α y β y comparara contra dos casos base, si solo se considerara la función objetivo de ruteo (Base 1) o solo la función objetivo de la promesa de servicio (Base 2). En la Tabla 4-12 se presenta los resultados de los indicadores de eficiencia respecto a los experimentos base 1 y 2 para la selección de α=0.6 y β=0.4. Estableciendo el indicador de eficiencia como el costo de ruteo (FO_1) relacionada con la utilización de recursos, y el de eficacia como la promesa de servicio (FO_2) relacionada con la atención a los pacientes lo más pronto posible, se puede observar que respecto al experimento Base 1 el indicador de eficiencia se aumenta en 1%, es decir se empeora, mientras que el de eficacia se disminuye en 2.559%, es decir se mejora. Por otro lado, al comparar con el experimento Base 2, se observa que el indicador de eficiencia mejora en 10.83%, mientras que el de eficacia empeora en 15.25%. Entonces, se observa como existe un balance entre la mejora de una función y el empeoramiento de la otra de acuerdo con la selección, por tanto, en este caso al ser una función con dos objetivos se

debe seleccionar la combinación de pesos de acuerdo con la meta definida por el sistema respecto al que se considere más importante.

Tabla 4-12 Indicadores de eficiencia y eficacia del Caso 2 respecto a los experimentos base

	Eficiencia FO_1 (ruteo)			Eficacia FO_2 (promesa de servicio)		
Caso Base	**Valor Base**	**Valor Modelo**	**% mejora**	**Valor Base**	**Valor Modelo**	**% mejora**
Base 1 (ruteo)	456.53	461.35	1%	347.44	338.55	-2.55%
Base 2 (Promesa de servicio)	517.38	461.35	-10.83%	293.74	338.55	15.25%

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Caso 3: Servicios de mantenimiento

Este caso[10] de estudio describe la aplicación del SE propuesto en el sector de servicios de mantenimiento. Este consiste en tipo de servicio que realiza programas de mantenimiento basados en inspecciones periódicas en una planta de fabricación de productos o en una empresa de prestación de servicios, por ejemplo, máquinas, estaciones de trabajo, cajeros, entre otras. Estas inspecciones varían desde exploraciones visuales hasta pruebas no destructivas llevadas cabo con diferentes instrumentos. Del mismo modo, todas las inspecciones necesitan personal para las visitas y otros recursos que son escasos. Por lo tanto, es necesaria una gestión de estos recursos, para sincronizar las operaciones de mantenimiento que garanticen el buen funcionamiento de las máquinas, cumpliendo con unas medidas de desempeño especificadas.

La programación del mantenimiento juega un papel crucial en el desempeño de las líneas de producción en serie o en una red de distribución (E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, et al., 2016). Las empresas suelen delegar la planeación y programación de mantenimiento a personal con experiencia, confiando en su intuición y conocimiento, pero cuando se enfrentan a programar los trabajos, incluso para planificadores experimentados, sólo puede considerar un número limitado de posibilidades. Además, a menudo se necesita un tiempo largo para generar (manualmente) un programa factible por tanto es necesario emplear otras técnicas como la investigación de operaciones para ayudar como instrumento para la toma de decisiones de planeación y programación de mantenimiento.

El caso de estudio presentado en esta sección es inspirado en el problema presentado en (E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, et al., 2016), en el cual se busca determinar la mejor policita conjunta para un problema de ruteo y mantenimiento combinado donde un conjunto de estaciones distribuidas geográficamente necesitan operaciones de mantenimiento, tanto preventivas como correctivas las cuales están sujetas fallas no determinísticas. Estas operaciones son realizadas por un conjunto de técnicos en una fecha determinada, para la cual se asigna una ventana de tiempo que garantice el máximo rendimiento o minimice el tiempo no disponible de la máquina. Estos trabajadores pueden tener un nodo de base fijo (como un depósito) o estar asignados a diferentes estaciones, lo que hace necesario que ellos viajen para llevar a cabo las operaciones en cada estación.

El problema consiste en dado un horizonte de planeación y un conjunto de técnicos localizados en un depósito determinar la asignación óptima para cada trabajador de una ruta de operaciones de mantenimiento que tenga en cuenta su capacidad (en tiempo disponible) y su especialidad, buscando el mínimo costo de ruteo (por ejemplo, el tiempo de viaje), balancear la carga de trabajo de los técnicos, y minimizando los costos de mantenimiento de los equipos. Este problema tiene dos componentes principales:

[10] El trabajo de esta sección fue presentado en POMS 2017 (E. López-Santana & Mendez-Giraldo, 2017).

- Mantenimiento: Desde la perspectiva de los modelos de mantenimiento presenta características como el ciclo de vida de las máquinas en los nodos y el proceso degradación de estas.
- Ruteo: Desde el punto de vista de ruteo, el problema presenta algunos aspectos como la necesidad de sincronizar los recursos, las capacidades técnicas y las ventanas de tiempo para realizar operaciones de mantenimiento.

De esta forma se desea encontrar una política óptima de mantenimiento y ruteo de técnicos con el mínimo costo de ruteo y mantenimiento de los equipos para la situación descrita anteriormente.

A continuación, se presenta la descripción del caso, y la aplicación del SE para el CPT con el fin de identificar el problema a resolver y la técnica de solución posible. En este caso de estudio no se aplicó el CCSS debido a que no se contó con una muestra para establecer las entradas para el proceso de adquisición de conocimiento, y adicionalmente en este caso de estudio se permite evidenciar una de las posibles formas de operación de *SchES* que consiste en ejecutar el SE para el CPT a partir de los campos de la notación del problema.

4.3.1 Descripción del Caso 3

Este problema consiste en una extensión del presentado en (E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, et al., 2016). Dado un n conjunto de clientes $V_C = \{1,2,\dots,N\}$ que están geográficamente distribuidos en una región, donde cada cliente tiene una máquina sujeta a fallas imprevistas. Las máquinas son mutuamente independientes con respecto a su comportamiento de falla y, por lo tanto, es posible determinar una política de mantenimiento óptima para cada máquina por separado. Para reducir la ocurrencia de estas fallas, las operaciones de mantenimiento preventivo (PM) se programan con una cierta frecuencia para cada máquina en un horizonte de planeación. Entonces, se define T como un conjunto de períodos $\{1,2,\dots,T\}$, por ejemplo, días en una semana. Para cada período $t \in T$, se considera un conjunto de técnicos idénticos $K = \{1,2,..,m\}$, que deben visitar el conjunto de máquinas para realizar las operaciones de PM programadas. Además, el técnico realiza una operación de CM en los casos en que las máquinas fallan antes de la fecha programada de la operación de PM. Se define un depósito central indexado por 0, y se considera como el punto de partida y destino final para todos los técnicos.

Entonces, el problema del problema de optimización de ruteo y mantenimiento combinado multi-período consiste en determinar una política conjunta de mantenimiento y de ruteo para todas las máquinas, de modo que minimice el costo de ruteo y el costo de mantenimiento total esperado (costos de PM y CM). Los supuesto y condiciones del problema se resumen de la siguiente manera:

- Las máquinas son mutuamente independientes con respecto a su comportamiento de falla.
- Las máquinas empiezan en una condición como nuevas (*as good as new condition*), y después de la operación PM o CM vuelven a ese mismo estado.
- El tiempo medio requerido para realizar una operación de CM es mayor que el tiempo medio requerido para realizar una operación de PM.
- El costo de CM es mayor que el costo de PM.
- Para cualquier período, cada máquina impone una ventana de tiempo dura en la que las operaciones de PM o CM deben comenzar.
- Es posible programar un máximo de operación de PM en cada período para cada cliente.
- Todos los técnicos son homogéneos en el sentido de que pueden realizar cualquier operación de PM o CM y los tiempos de viaje entre cualquier par de clientes son iguales.

- Para todos los períodos, todos los técnicos comienzan en el depósito al comienzo del horizonte de planificación y deben regresar al depósito al final del horizonte de planeación.
- Los tiempos de viaje son determinísticos y cumplen con la desigualdad del triángulo.
- En caso de falla antes del comienzo del próximo PM, el cliente debe esperar al técnico, es decir, el técnico no se reprograma según la nueva situación del cliente.

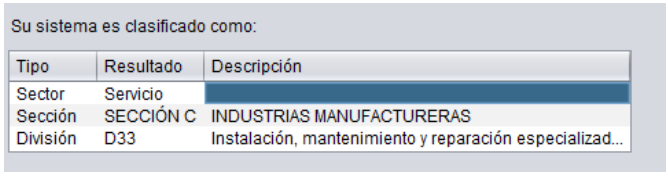
Una aplicación práctica de este problema puede ser en una compañía de petrolera se tiene un conjunto de operaciones diarias que implica la administración de una red de estaciones de bombeo. Debido a los altos costos de detener la operación de bombeo, es necesario tener una política de mantenimiento que garantice los más altos niveles de servicio. Sin embargo, esta política se traduce en visitas más frecuentes de técnicos a las diferentes estaciones de bombeo y por tanto es costosa. Para una mejor toma de decisiones, la compañía puede explorar el balance entre el nivel de servicio y los costos operativos, por medio de una política que tenga en cuenta un modelo de mantenimiento, localización y ruteo.

Otra posible aplicación real son las operaciones de mantenimiento de hardware de seguridad (por ejemplo, cámaras de vídeo) en una red de cajeros automáticos. La mayoría de los bancos subcontratan esta operación de mantenimiento a un tercero, quien se compromete a realizar el mantenimiento preventivo dentro de ventanas de tiempo determinadas. Cuando aparecen fallas o accidentes (por ejemplo, el vandalismo), los técnicos deben ir al cajero automático en un tiempo más ajustado, esto implica costos no previstos y visitas más frecuentes. Para la compañía que subcontrata es deseable reducir sus costos operacionales, mientras se mantiene el mismo nivel de servicio a sus clientes. Aquí de nuevo se realizará un balance entre el nivel de servicio y los costos de operación.

A continuación, se presenta los resultados de la aplicación del SE para el CPT con el de identificar el tipo de problema a resolver y la técnica de solución posible.

4.3.2 Resultados del componente de programación de tareas para el Caso 3

Dada la descripción del caso en la sección previa, en el Anexo S primer apartado (S.1) se presentan los valores obtenidos para la notación de PTSS en cada uno de los campos de cliente, recurso y control de flujo. La herramienta *SchES* empieza por preguntar cuál es la clasificación de acuerdo con el CIIU para la actividad económica, para este caso se define que es sector Servicio, para la sección la C correspondiente a Industrias Manufactureras y para la división la D33 de Instalación, mantenimiento y reparación especializada de maquinaria y equipo. Estos resultados se presentan en la Figura 4-25.


Su sistema es clasificado como:

Tipo	Resultado	Descripción
Sector	Servicio	
Sección	SECCIÓN C	INDUSTRIAS MANUFACTURERAS
División	D33	Instalación, mantenimiento y reparación especializad...

Figura 4-25. Datos ingresados para clasificación de actividad del Caso 3
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

Al aplicar los SBR descritos en la sección 3.3.2 sobre la notación dada para este problema se obtienen los resultados presentados en la Figura 4-26 para el tipo de problema indicando los métodos utilizados y su asertividad. Para el campo cliente el resultado sugerido es Sch&Rou correspondiente a un problema combinado de programación y ruteo con 84.4% de asertividad. Para los campos recurso y control de flujo el resultado fue Sche correspondiente a un problema de programación puro con 77.6% y 75.8% de asertividad, respectivamente. Para este problema el campo cliente representa a los nodos y su problema de mantenimiento,

a los cuales se les debe tener en cuenta los aspectos de programación y ruteo combinados. Para el campo recurso, su representación en el problema es los técnicos que debe viajar a realizar las operaciones de PM o CM, entonces el problema de ruteo (Rou) sugerido por el algoritmo J48 con 74.6% de asertividad es más adecuado y se selecciona este. Por último, para el campo control de flujo que representa la conexión entre los clientes y recurso, en este caso se emplea la sugerencia de un problema de programación.

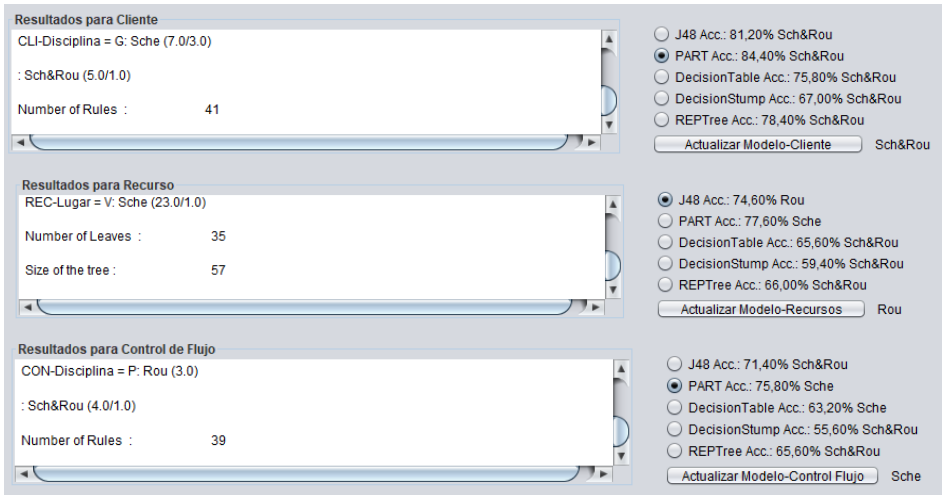


Figura 4-26 Resultados tipo de problema del CPT para el Caso 3.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

Para el tipo de criterio, los resultados obtenidos se presentan en la Figura 4-27. Para el campo cliente se obtuvo tipo múltiple, para el campo recurso se obtuvo tipo recursos, y para el campo control de flujo también múltiple, con asertividad de 72%, 66.2% y 64%, respectivamente. Todos los resultados con el método PART. En este caso, se decide emplear la sugerencia obtenida con el método propuesto para cada campo.

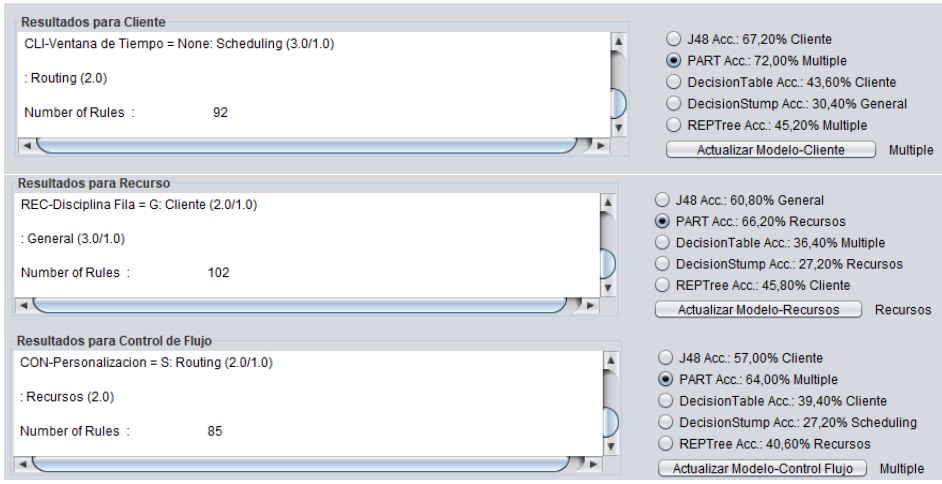


Figura 4-27 Resultados tipo de criterio del CPT para el Caso 3.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

En la Figura 4-28 se presentan los resultados para el grupo de técnica de solución. Los métodos seleccionados con mejor asertividad son: en el campo cliente se obtuvo Modelos estocásticos, en el campo recurso optimización, y en el campo control de flujo se obtuvo Modelos estocásticos de nuevo. Los asertividades fueron de 74.2%, 70% y 675, con métodos PART, J48 y PART, respectivamente para cada campo. En este caso los resultados son adecuados, debido a que para el campo cliente que representa el problema de mantenimiento el método adecuado según (E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, et al., 2016) es un modelo estocástico, para el campo recurso que representa un problema de ruteo el método adecuado es un modelo de optimización o metaheurísticas dependiendo del tamaño del problema, y para el control de flujo se debe tener también un modelo estocástico que represente la conexión entre ellos.

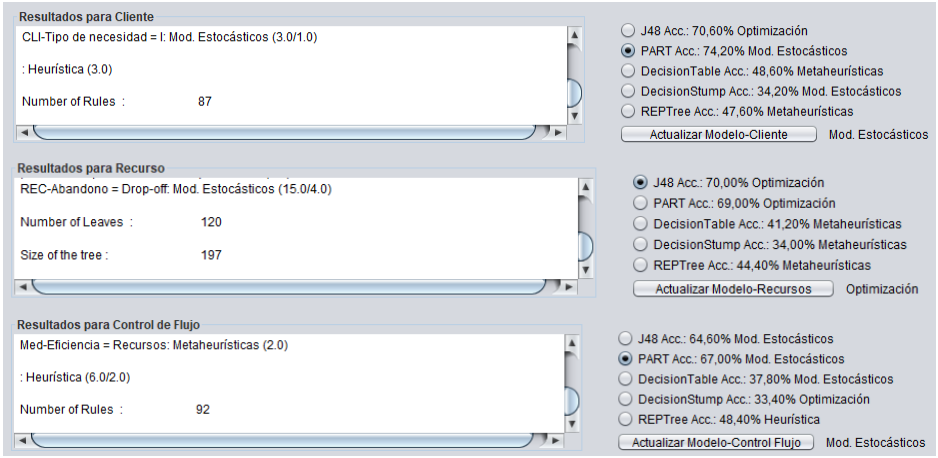


Figura 4-28 Resultados grupo de técnica de solución del CPT para el Caso 3.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

Con estos resultados se procede a la selección específica para el problema, medida y técnica de solución. Se selecciona el tipo de operación del SE como separado para cada campo de la notación de PTSS. En la Figura 4-29 se presentan los resultados del tipo de problema para cada campo, donde se seleccionó de acuerdo a la clasificación CIIU (ver Figura 4-25) como área la programación de técnicos y subárea la de mantenimiento para los tres campos, cada uno con una frecuencia de documentos diferente: 6 para cliente y recurso, y 14 para control de flujo.

En la Figura 4-30 se presentan el tipo de criterio especifico, en la cual para el campo cliente se selección múltiple con un documento, para el campo recurso 2 de tipo general, y para el campo control de flujo 5 en el tipo de programación.

Para la técnica de solución específica, la Figura 4-31 presenta los resultados para cada campo. Primero se presenta el campo cliente, con la selección de modelos estocásticos y simulación con una frecuencia de 2 documentos. Donde se presenta una revisión de literatura de la programación de personal bajo demanda no estacionaria y una aplicación en cuidado a la salud domiciliaria. Para el campo recurso, el grupo de optimización con una selección específica de programación lineal mixta con 9 documentos donde se resalta la aplicación de (Zamorano & Stolletz, 2017) en la cual presentan un problema de programación de fuerza de trabajo (técnicos) para múltiples periodos y utilizan un esquema de descomposición para resolverlo. Para el campo de control de flujo, se selecciona modelos estocásticos con una frecuencia de 25 documentos y la técnica específica de mayor frecuencia es Simulación con 9 documentos,

aunque también se sugieren otras técnicas como teoría de colas con 7 documentos y programación estocástica con 7 documentos.



Figura 4-29 Resultados selección de problema específico del CPT para el Caso 3.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

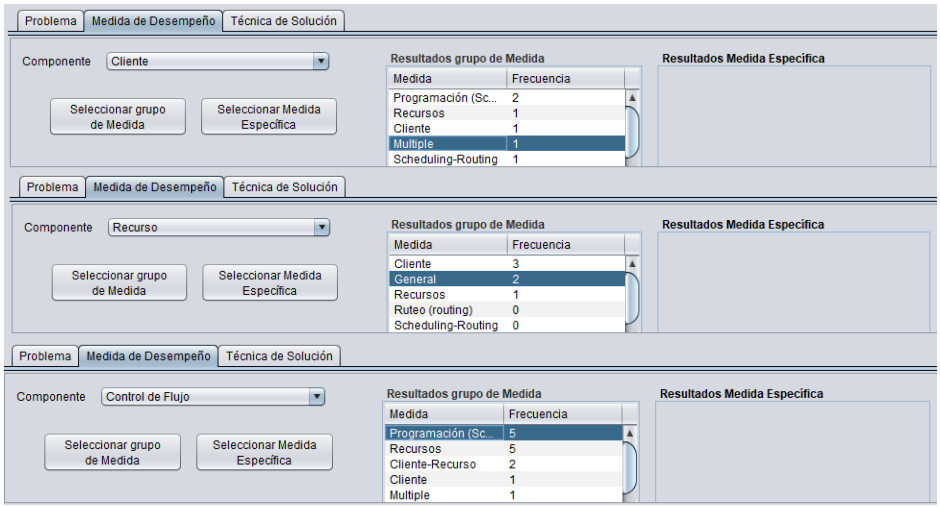


Figura 4-30 Resultados selección de tipo de criterio específico del CPT para el Caso 3.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

Los resultados finales de este proceso de selección son presentados en la Figura 4-32. Para todos los campos se selecciona como problema específico el problema de mantenimiento. Para el campo cliente el tipo de criterio es múltiple dado que se consideran costos de mantenimiento preventivo y correctivo, junto con las probabilidades de falla de las máquinas. La técnica sugerida es analizar mediante simulación. Para el campo de recursos, el problema de ruteo se sugiere abordarlo con una medida de desempeño de tipo general, considerando los costos de mantenimiento y los de ruteo de forma simultánea y el método es un modelo de programación lineal mixta. Por último, para el campo control de flujo que representa la conexión entre clientes y recurso el problema de mantenimiento se puede analizar a través de simulación con una medida de desempeño de programación, por ejemplo los tiempos de

espera definidos por (E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, et al., 2016) que involucran las decisiones de ruteo y mantenimiento.

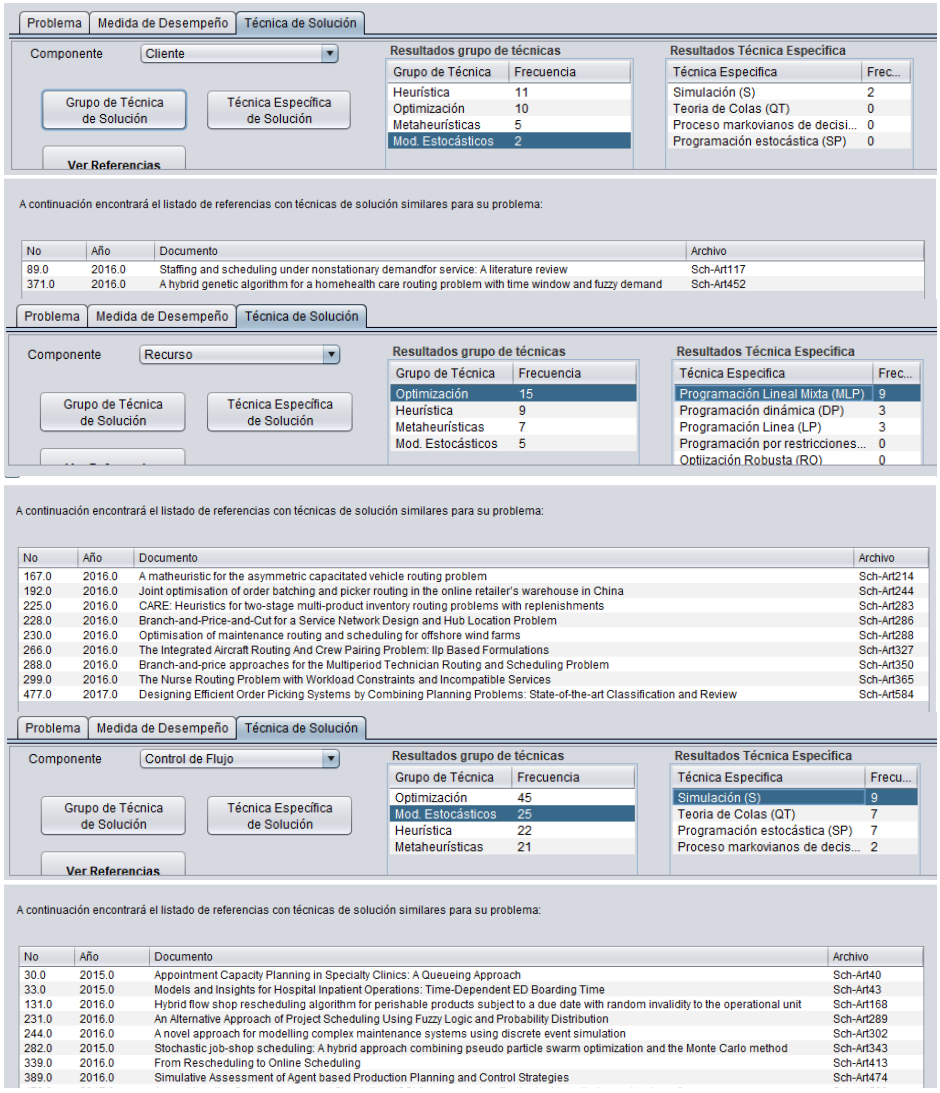


Figura 4-31 Resultados selección de técnica de solución específica del CPT para el Caso 3.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

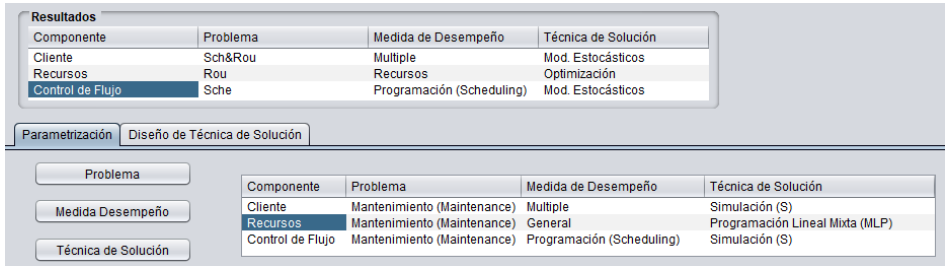


Figura 4-32 Resumen de resultados selección específica del CPT para el Caso 3.
Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de *SchES*.

4.3.3 Resultados e indicadores para el Caso 3

Con los resultados obtenidos y basado en el desarrollo de (E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, et al., 2016) se propone el siguiente esquema presentado en la Figura 4-33 de solución para el problema de mantenimiento y ruteo combinado en múltiples periodos. Es un proceso de dos fases en la cual se resuelven dos modelos. Primero el modelo de mantenimiento (MM) y con estos resultados el modelo de ruteo y mantenimiento (M&MR).

1. Modelo de mantenimiento (MM): para cada cliente se resuelve el MM presentado por (E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, et al., 2016). La entrada de este modelo consiste en los diferentes costos de mantenimiento preventivo, correctivo y tiempo de espera, junto con los tiempos medios de cada operación y la función de densidad del tiempo entre fallas que describe el comportamiento de cada máquina. El MM permite determinar el tiempo óptimo de una operación de PM. Este tiempo óptimo se calcula al minimizar los costos de la política de mantenimiento total por unidad de tiempo (CM y PM). Dado el horizonte de planeación, el resultado consiste en la cantidad de operaciones de PM, la fecha en que debe ejecutarse cada operación de PM y el costo de la política de mantenimiento para cada período $t \in T$.
2. Modelo de Ruteo y Mantenimiento (MR&M): Este modelo toma como entrada las salidas del MM, el conjunto de períodos T y el grafo $G = (V, A)$ correspondiente a la ubicación geográfica de los clientes y el depósito. Para el MR&M, se propone un enfoque de solución basado en generación de columnas para encontrar un conjunto de rutas de modo que todas las operaciones de PM se ejecuten dentro de una ventana de tiempo y la duración de la ruta no exceda la carga de trabajo disponible de cada técnico y cada período. La salida es un conjunto de rutas para cada técnico en cada período, con las operaciones de PM programadas. El objetivo es minimizar una función que combina el costo de ruteo y el costo de mantenimiento dado en el MM.

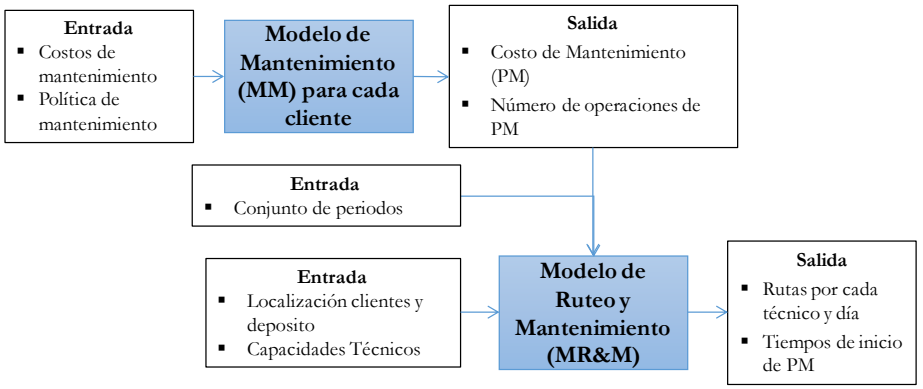


Figura 4-33 Esquema de solución para el problema de mantenimiento del caso 3
Fuente: Elaboración propia.

En el Anexo S segundo apartado (S.2) se presenta en detalle estos dos modelos con su formulación matemática. El esquema propuesto en este caso de estudio resuelve el problema en dos fases, primero el modelo de MM y luego el MR&M. En el esquema propuesto por (E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, et al., 2016) es un proceso iterativo a través de la conexión entre MM y MR&M dada por tiempo de espera, definido como el tiempo en que una máquina que fallo antes del PM debe estar esperando a que arribe el técnico a repararla. Este tiempo de espera para esta aplicación es considerado como cero, dado que se desea evaluar la convergencia del método de descomposición basado en generación de columnas para el problema de mantenimiento.

Como ejemplo de aplicación se emplea un instancia adaptada de (Solomon, 1987) tipo R101 y los costos de mantenimiento fueron generados según lo propuesto por (E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, et al., 2016). Se consideran 6 clientes, 5 días como horizonte de planeación, 3 técnicos y tiempos de espera de cero. Los datos de la instancia se presentan en el Anexo S.3.

En la Figura 4-34 se observa como el método de descomposición converge al valor óptimo del problema aproximadamente en la iteración 13. En la Tabla 4-13 se presenta el resultado de la solución óptima para los costos de mantenimiento y la asignación de PM sobre el horizonte de planeación. En la Tabla 4-14 se muestra la solución de las rutas obtenidas por cada día y cada técnico y su correspondiente costo de ruteo. En este caso se observa cómo se pasa de un problema de 6 nodos a 14 en total, al considerar la policita de mantenimiento.

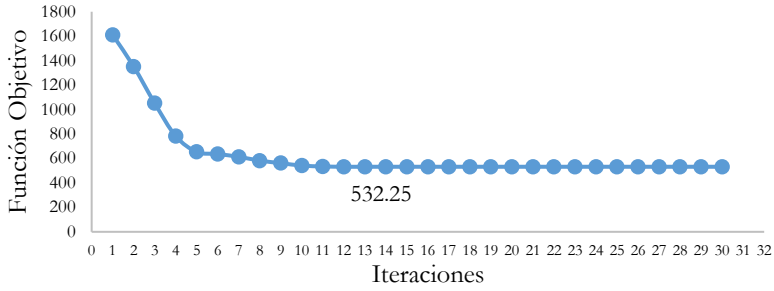


Figura 4-34 Resultados de método iterativo para el problema de mantenimiento del Caso 3
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-13 Resultados solución óptima de costos de mantenimiento del Caso 3

r	*i*	*T*					*Frecuencia*	*Costo*
		1	*2*	*3*	*4*	*5*		
170	1	0	1	1	1	0	3	22.98
3	2	1	0	1	0	1	3	15.3
76	3	0	0	1	0	0	1	3.42
101	4	0	0	1	0	1	2	7.68
42	5	0	0	1	1	0	2	7.13
175	6	1	0	1	1	0	3	19.74
Total		**2**	**1**	**6**	**3**	**2**	**14**	**76.25**

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-14 Resultados solución óptima de costos de ruteo del Caso 3

t	*p*	*Vc*						*Frecuencia*	*Costo*
		1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*		
1	146	0	1	0	0	0	1	**2**	**56**
2	0	1	0	0	0	0	0	**1**	**40**
3	43	0	1	0	1	0	0	**2**	**76**
	53	1	0	1	0	0	0	**2**	**68**
	63	0	0	0	0	1	1	**2**	**50**
4	149	1	0	0	0	1	1	**3**	**90**
5	65	0	1	0	1	0	0	**2**	**76**
Total		**3**	**3**	**1**	**2**	**2**	**3**	**14**	**456**

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4-35 se presenta el comportamiento del modelo de ruteo y mantenimiento cuando se aumenta el número de clientes de 6 a 10 y 20 en total. Se puede observar que, aunque el método converge hacia un valor constante, toma un número mayor de iteraciones a medida que el número de clientes aumenta, lo cual indica que para instancias más grandes y

realistas se debe contar con un método que resuelva el subproblema de diseño de rutas de una manera más eficiente. Para esto se podrían utilizar heurísticas o metaheurísticas.

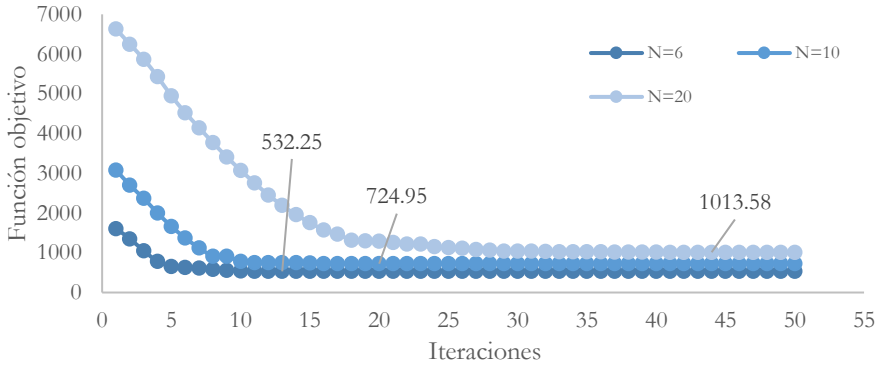


Figura 4-35 Resultados de método iterativo para el problema de mantenimiento del Caso 3 variando el número de clientes
Fuente: Elaboración propia.

Para poder realizar una comparación de este resultado, se define un experimento base en el cual se emplean patrones para realizar el mantenimiento como se presenta en el Anexo S.3 y se resuelve el modelo sin considerar el mantenimiento, es decir con solo el esquema de ruteo en la descomposición planteada. En la Tabla 4-15 se presentan los resultados obtenidos para el costo de manteniendo con estos patrones y en la Tabla 4-16 la solución de ruteo obtenida. Se puede observar al comparar con los resultados del modelo completo que se mantiene el número de operaciones de mantenimiento a realizar en 14, el costo total de ruteo se mantiene, sin embargo, el de mantenimiento aumenta a 87.18.

Tabla 4-15 Resultados de los costos de mantenimiento en experimento base del Caso 3

r	*i*	*T*					*Frecuencia*	*Costo*
		1	*2*	*3*	*4*	*5*		
4	1	0	1	0	1	1	**3**	**23.73**
4	2	0	1	0	1	1	**3**	**14.95**
9	3	0	0	0	0	1	**1**	**4.24**
7	4	0	0	0	1	1	**2**	**8.35**
7	5	0	0	0	1	1	**2**	**6.57**
4	6	0	1	0	1	1	**3**	**29.34**
Total		**0**	**3**	**0**	**5**	**6**	**14**	**87.18**

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-16 Resultados de los costos de ruteo en experimento base del Caso 3

t	*p*	*Vc*						*Frecuencia*	*Costo*
		1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*		
1	47	0	1	0	0	0	1	2	56
	0	1	0	0	0	0	0	1	40
2	N							0	0
3	3	1	0	0	0	0	0	1	40
	34	0	0	0	0	1	1	2	50
	39	0	1	0	1	0	0	2	76
4	35	0	1	0	1	0	0	2	76
	60	1	0	1	0	0	0	2	68
	255	0	0	0	0	1	1	2	50
5	N							0	0
total		**3**	**3**	**1**	**2**	**2**	**3**	**14**	456

Fuente: Elaboración propia.

Para este caso de estudio, se encuentra que el indicador de eficiencia considerado como el costo de ruteo no se ve afectado con el modelo propuesto mientras que, para el costo de mantenimiento, que se considera como un costo de eficacia al estar relacionado con cumplir la necesidad del cliente, si mejora en un 12.54%, como se resume en la Tabla 4-17.

Tabla 4-17 Indicadores de eficiencia y eficacia del Caso 3 respecto al experimento base

Caso Base	Eficiencia (Costo Ruteo)			Eficacia (Costo Mantenimiento)		
	Valor Base	Valor Modelo	% mejora	Valor Base	Valor Modelo	% mejora
Patrones de mantenimiento definidos	456	456	0%	87.18	76.25	-12.54%

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Resumen y conclusiones del capítulo

En este capítulo se presentó la aplicación del SE propuesto en tres casos de estudio de sistemas de servicio. En cada uno de ellos se aplicaron distintas fases del SE en cuanto a la utilización del CCSS y el CPT, demostrando uno de los aportes de la propuesta de esta tesis doctoral en cuanto a la versatilidad y flexibilidad del SE para aplicarlo en diferentes fases del proceso de modelación y toma de decisiones. En todos los casos de estudio presentados se utilizó la herramienta informática *SchES*, validando su funcionamiento y resultados del SE desarrollado.

En el caso 1 se presentó la forma de utilizar el SE propuesto para una empresa de servicios de mensajería. Se emplearon todas las opciones de clasificación completa presentes en *SchES*, la cual empieza con la adquisición de conocimiento mediante las preguntas diseñadas para obtener la información necesaria de características y determinar los atributos con el método ANFIS. Luego se determinó el sector, sección y división de la actividad, encontrando un buen ajuste en los resultados obtenidos, con un error aceptable y una desviación baja. Además, la información permite construir la notación del problema respecto a los tres campos de cliente, recurso y control de flujo, para posteriormente determinar el problema, la medida de desempeño y la técnica de solución para el problema. En el caso de estudio, los resultados evidenciaron que se incluye el aspecto de ruteo (campo de recurso) y de programación (campo cliente y control de flujo). También se evidencio la versatilidad de la herramienta *SchES* en cuanto a la posibilidad de seleccionar por cada campo el problema, medida de desempeño y técnica de solución, así como la flexibilidad para seleccionar distintos resultados.

Como recomendaciones para el caso 1 se destaca la necesidad de incorporar la información estocástica de la naturaleza de los tiempos de arribo de los pedidos, del tiempo de servicio, entre otros, ya que esta fue la sugerencia dada por *SchES* en cuanto técnica de solución.

El caso 2 permitió presentar la forma de utilizar el SE propuesto en una situación de servicio compleja como lo es la del cuidado de la salud, y una de sus variantes en el ámbito domiciliario. Se observa que el sistema de adquisición de conocimiento permite mediante las preguntas diseñadas obtener la información necesaria para la determinación de los atributos y con este el sector, sección y división de la actividad. Los resultados presentan un buen ajuste, con un error aceptable y una desviación baja. En cuanto a la utilización de la herramienta *SchES* se observa una de sus variantes partiendo de la clasificación de actividades mediante el ingreso de los atributos y con está realizando la clasificación de sector, sección y división. Además, la información permite construir la notación del problema respecto a los tres campos de cliente, recurso y control de flujo, para posteriormente determinar la medida de desempeño y con esto el problema específico y la técnica de solución para el problema. En el caso de estudio, los resultados evidenciaron que se incluye el aspecto de ruteo (campo recurso y control de flujo) y de programación (campo cliente). Para la técnica de solución, se obtuvo que el mejor método fue el de optimización, lo cual valida las herramientas revisadas en la literatura respecto a este problema.

Como recomendaciones para el caso 2, se destaca la necesidad de construir procedimientos heurísticos o metaheurísticos que permitan resolver problemas de mayor tamaño en un tiempo más rápido, así como la inclusión de estos en un modelo multi-agente que permita resolver varias veces el modelo de programación matemática en distintos periodos de tiempo como lo planteado en (E. R. López-Santana, Espejo-Díaz, & Méndez-Giraldo, 2016), lo cual permite adicionar el componente dinámico propio de este tipo de sistemas de servicio. Por otro lado, también se puede incorporar la información estocástica de la naturaleza de los tiempos de arribo de las solicitudes, del tiempo de servicio, e incluso la variabilidad del tipo de necesidad.

En el caso 3 se presentó una de las formas de utilización del SE propuesto para el CPT en la herramienta informática *SchES* aplicada en un problema de servicios de mantenimiento. En este caso, la herramienta *SchES* tiene la versatilidad de empezar con la adquisición de conocimiento correspondiente a la notación del problema respecto a los tres campos cliente, recurso y control de flujo. Luego, se aplican los SBR para determinar el tipo de problema, la medida de desempeño y la técnica de solución para el sistema analizado. Respecto al caso de estudio, los resultados evidenciaron que en el tipo de problema está inmerso el aspecto de ruteo (en el campo de recurso) y de programación (para los campos cliente y control de flujo). En cuanto a la técnica de solución, *SchES* sugirió las técnicas apropiadas según el planteamiento realizado por (E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, et al., 2016) respecto a la utilización de modelos estocásticos para los campos de cliente y control de flujo, y de optimización para el campo de recurso. En los modelos desarrollados se evidencio la utilización de las técnicas sugeridas de acuerdo con las referencias presentadas por el SE, validando su aporte como sistema de apoyo a la toma de decisiones.

Como recomendaciones para el caso 3, es notoria la necesidad de desarrollar la conexión entre los modelos de ruteo y mantenimiento para hacer iterativo el esquema de solución. Por otro lado, para instancias de mayor tamaño se puede explorar métodos basados en metaheurísticas para resolver el problema de ruteo o el subproblema del diseño de rutas, y esto concuerda con la sugerencia dada por *SchES* en cuanto a la técnica de solución.

Finalmente, con estos tres casos, en los cuales se aplicó el SE propuesto y se desarrollaron algunas técnicas específicas las cuales se probaron con algunos datos reales y/o inspirados en instancias de la literatura, se evidencia como si se empleara los resultados sugeridos se mejoraría unos indicadores de eficiencia en la utilización de recursos y la eficacia en la atención a los clientes relacionados con la función de programación de tareas, ayudando a los encargados de la toma de decisiones a identificar el problema específico, la medida de desempeño y una técnica de solución, y de esta manera validando el cumplimiento de la hipótesis de investigación planteada. Aunque se debe resaltar que no en todos los casos, se mejoraron ambos indicadores de forma simultánea, esto es debido a la naturaleza multiobjetivo de la medida de desempeño, en la cual se debe encontrar un balance entre ambos indicadores.

Capítulo 5. CONCLUSIONES GENERALES Y CONTRIBUCIONES DE LA TESIS

En este capítulo se presentan las conclusiones generales, recomendaciones, contribuciones, publicaciones y trabajos futuros derivados de esta tesis doctoral.

5.1 Conclusiones generales

En esta tesis doctoral se estudió el problema de programación de tareas en sistemas de servicios (PTSS). Este es un problema complejo que exhibe dos componentes esenciales: análisis de sistemas de servicios y el problema de programación de tareas.

El primero corresponde al estudio y análisis de los sistemas de servicios desde las ciencias de la decisión, la ingeniería y la gestión del cocimiento. Respecto a este campo, la presente investigación contribuye con el análisis de la toma de decisiones en el nivel operativo donde se encuentra el problema de programación de tareas. Mediante una revisión de literatura sobre los problemas de toma de decisiones en los sistemas de servicio se evidenció la falta de enfoques que integraran la ciencia e ingeniería de los sistemas de servicio con modelos de gestión del conocimiento. Mediante la revisión de literatura se establecieron características y elementos representativos y distintivos de los sistemas de servicios, para establecer un primer aporte que consiste en una definición del sistema de servicio como una "*configuración dinámica entre cliente y recurso que permite mediante un control de flujo la interacción entre ellos con el fin de agregar valor a un resultado tomando un conjunto de entradas, procesos y estructuras desarrollando una actividad organizada mediante la coproducción*".

El segundo componente esencial del problema estudiado corresponde al problema de programación de tareas. Este es un problema de toma de decisiones a nivel operativo muy referenciado en la literatura científica desde la óptica de los sistemas de manufactura, pero poco estudiado desde la ciencia e ingeniería de los sistemas de servicios. Por tanto, de la definición propuesta para sistema de servicios se establecieron los componentes principales para la modelación de problemas de PTSS. La notación propuesta es basada en cuatro campos $C|R|F|\gamma$ correspondientes a cliente, recurso, control de flujo, y medida de desempeño, respectivamente. Para cada uno de ellos se establecieron unos componentes y parámetros asociados que permiten caracterizar un problema de PTSS. Esta notación constituye otro aporte de esta investigación, contribuyendo al campo de la modelación de este tipo de problemas. Adicionalmente, se realizó una caracterización de la literatura científica de problemas de PTSS sobre estos cuatro campos, que permitieron establecer tendencias en las técnicas empleadas para su solución.

Con estos dos componentes se logró cumplir con el primer objetivo específico de la presente tesis doctoral en cuanto a la identificación de factores de los sistemas de servicio que afectaran al problema de PTSS y que permitieron establecer parámetros para el desarrollo de técnicas para resolverlo, el cual constituyó el insumo para el cumplimiento del segundo y tercer objetivo específicos. Con la definición y notación propuesta, se construyó un sistema experto

híbrido que permitió establecer una metodología para dar solución a los problemas de PTSS. El sistema experto propuesto está estructurado en dos componentes.

El primero corresponde al componente de clasificación de sistemas de servicios que permite clasificar una actividad económica por sector de la economía (primario, manufactura o servicio) y por sección y división del código CIIU. Para lograr esto, se construyeron diferentes modelos para transformar el conocimiento de los expertos en el sistema de servicio en un conjunto de características y atributos que sirven de base para la aplicación de unos sistemas basados en reglas (SBR) para obtener la clasificación deseada. El carácter híbrido de este primer componente está en la integración de modelos de optimización no lineal, con sistemas de inferencia difuso, redes neuronales y algoritmos de aprendizaje de máquina.

El segundo consiste en el componente de programación de tareas que permite, a partir de la notación de PTSS y la clasificación obtenida en el primer componente, establecer el tipo de problema de programación de tareas, la medida de desempeño y la técnica de solución sugerida para resolver el problema. Este componente se estructuró a través de tres SBR que se ejecutan en forma de cascada para lograr el objetivo propuesto. Este SE es recursivo y flexible, dado que emplea la información disponible de las características y atributos para completar la notación de PTSS, en caso de no estar disponible por medio de un sistema de adquisición de conocimiento se completa. Además, es flexible en cuanto a la utilización de varios modelos de aprendizaje de máquina y minería de datos para construir el sistema de reglas que aplicara en cada SBR.

Con estos dos sistemas expertos funcionando de manera integrada y plasmándolo en un prototipo computacional llamado *SchES* se dio cumplimiento al cuarto objetivo específico. *SchES* es un prototipo computacional desarrollado en Java que permite a un usuario aplicar los sistemas expertos propuestos en esta tesis de doctorado a una empresa que busque identificar su tipo de sector, y para representar e identificar una técnica de solución a un problema relacionado con PTSS. *SchES* como prototipo computacional desarrollado en un lenguaje orientado a objetos presenta ventajas como la interconexión con bases de datos, la facilidad de una interfaz de usuario amigable y rápida, con la posibilidad de personalizar los archivos maestros que el usuario puede construir, alimentar y depurar. Adicionalmente, *SchES* es una herramienta flexible que permite emplear en su totalidad los SE propuestos o solo emplear el del CCSS o el del CPT, además de ejecutar los sistemas de adquisición de conocimiento de acuerdo con el requerimiento y disponibilidad de información del usuario. De esta manera, el sistema experto híbrido propuesto y su implementación en *SchES* se convierten en una estrategia para la construcción de métodos que permitan resolver un problema de PTSS. Este último aspecto constituye otro aporte al conocimiento en el ámbito de la toma de decisiones en los sistemas de servicios, y establece a la herramienta *SchES* como un sistema de apoyo a la decisión (DSS, *decision support system*).

Empleado *SchES*, que representa a los SE desarrollados, se analizaron tres casos de estudio de sistemas de servicios representativos. El primero correspondió a servicios de mensajería, en el cual se identificó un problema de programación y ruteo de vehículos para la entrega de documentos en un ambiente de varios periodos. Para su solución se determinó un proceso de tres fases correspondiente a cada uno de los componentes cliente, recurso y control de flujo. En este caso, se empleó *SchES* en su esquema de operación completo desde la adquisición de conocimiento de características, atributos e implementación del CCSS, para luego aplicar el CPT con la adquisición de conocimiento de la notación de PTSS. El segundo caso trato sobre servicios de cuidado a la salud domiciliaria, en donde se define un problema de ruteo de operadores de salud con el fin de cumplir una cita de revisión con previa agenda. En este caso se identificó la utilización de un modelo de optimización de programación entera mixta con un objetivo múltiple. En este caso, *SchES* se empleó desde la adquisición de conocimiento de los atributos, luego el CCSS y posteriormente el CPT. Por último, el tercer

caso correspondió a un problema de servicios de mantenimiento. Para su solución, se definió un esquema de dos fases correspondientes a los campos de cliente con un modelo de mantenimiento estocástico y del campo recurso con un modelo de optimización de programación entera mixta. Para este último caso, se empleó *SchES* desde la ejecución del CPT con la adquisición de conocimiento de la notación de PTSS.

Con la implementación de estos tres casos de estudio que constituían el quinto objetivo específico, se logró cumplir la hipótesis planteada en la Tesis Doctoral y el objetivo general en cuanto a la integración de técnicas de modelación matemática y algoritmos heurísticos con modelos de gestión del conocimiento e inteligencia a través de un sistema experto híbrido que mejoraron la función de programación de tareas en sistemas de servicios, mediante una apoyo a la modelación e identificación de técnicas de solución considerando, siendo un sistema de apoyo a la decisión.

De esta tesis doctoral se deriva como el enfoque de ciencia de los servicios aporta al campo de la programación de tareas al clarificar las interacciones entre los componentes de este tipo de sistemas, en especial, al incluir características primordiales como la coproducción, la variabilidad, la heterogeneidad y la intangibilidad, las cuales no eran consideradas como relevantes en el campo de la programación de tareas. Adicionalmente, este enfoque permite establecer la necesidad e importancia de los sistemas de clasificación de servicios como una forma de manejar la diversidad propia de este sector, y de esta manera poder identificar problemas de programación de tareas.

Por otro lado, la importancia de la notación propuesta radica en establecer un esquema de representación completo del problema de programación de tareas en sistemas de servicio, el cual permite que pueda generalizar los problemas presentes en sistemas de servicio, y poder ser empleado para la comparación de medidas de desempeño y la identificación de técnicas de solución. Al respecto, en las bases de conocimiento de programación de tareas y sistemas de servicios se identificó como problemas principales los relacionados con programación de tareas puro (*scheduling*), ruteo (*routing*) y el problema combinado de programación ruteo (*scheduling & routing*). Estos problemas recogen de forma general, las características de varios tipos de sistemas de servicios, y exhiben ciertos comportamientos relacionados con variabilidad, múltiples objetivos, necesidades perecederas, prioridades, entre otros; los cuales fueron suplidos con la notación propuesto, y constituyen uno de los principales aportes al conocimiento en el campo de la programación de tareas de esta tesis.

Por último, esta tesis doctoral evidencia como el empleo de técnicas híbridas con enfoques de modelación matemática, algoritmos de clasificación, minería de datos y aprendizaje de máquina, ayudan el desarrollo de reglas que alimentan la estructura de un sistema experto y mejora su funcionamiento en cuanto a robustez y rapidez. Adicionalmente, se encontró que la ejecución de sistemas de reglas en forma cascada mejora el desempeño de los sistemas expertos dado que se define de una mejora manera las bases de conocimiento y se reduce la variabilidad de la información de salida. Este enfoque de ejecución en forma cascada del sistema experto propuesto constituye un aporte en metodología de construcción de este tipo de herramientas.

5.2 Recomendaciones

Las recomendaciones derivadas de esta Tesis Doctoral se pueden dar en dos categorías. La primera para las organizaciones de servicios, en las cuales se puede implementar la metodología generada en *SchES* para sus procesos de toma de decisiones en el nivel operativo. Aquí las organizaciones deben hacer un esfuerzo por sistematizar el conocimiento presente en su personal con miras a generar procedimientos documentados que se basen en herramientas de gestión como la que se presenta en este trabajo, y que se puede implementar y vincular con sus sistemas de gestión con el fin de mejorar su competitividad y productividad.

En especial las pequeñas y medianas empresas (pymes) que se ven enfrentadas a problemas desafiantes en el nivel operativo, y que por la escasez de recursos no pueden tener acceso a un personal especializado en técnicas de modelación matemática e investigación de operaciones, *SchES* se convierte en una alternativa viable con el fin de ayudar a su proceso de toma de decisiones que redunde en una mejora de sus procesos y el incremento de su productividad.

La segunda categoría corresponde a la comunidad académica y científica, en la cual se pueden desarrollar mejoras en los procesos de formación con esta nueva tendencia en los procesos de toma de decisiones, utilizando técnicas hibridas basadas en la integración de campos como la modelación matemática y la gestión del conocimiento. Estas nuevas tendencias proyectan la utilización de metodologías como las propuestas en esta Tesis Doctoral, en el ámbito de industria inteligente e industria 4.0 donde la integración de los procesos industriales y de servicios, las funciones organizacionales, y las tecnologías de la información y la comunicación (TICs), son el futuro de la gestión empresarial.

5.3 Resumen de contribuciones de la tesis

Esta tesis de doctorado presenta las siguientes contribuciones al conocimiento:

- Una revisión del estado del arte de los problemas de toma de decisiones en sistemas de servicios. En esta revisión se definió unos componentes y un conjunto de características relacionadas con los servicios y asociados a problemas de programación de tareas. Adicionalmente, se identificaron los métodos de solución y se realizó su correspondiente clasificación.
- Una representación de sistema de servicio enfocado al problema de programación de tareas, y un conjunto de características y atributos para su clasificación. Esta definición genera una propuesta de notación que caracteriza al sistema de servicio y sus componentes en un problema de programación de tareas.
- Un primer SE que permite clasificar un sistema de acuerdo con su actividad tomando en consideración los atributos que definen unas características mediante un modelo de inferencia neuro difuso y un modelo de optimización no lineal. Por otro lado, para determinar la clasificación del sistema de servicio se empleó un sistema basado en reglas como motor de inferencia del SE.
- Un segundo SE que determina el tipo de problema de programación de tareas de acuerdo con la clasificación del sistema de servicio y propone uno o varios métodos de solución para el problema en particular. Este SE funciona en una metodología cascada mediante tres componentes. El primer componente, clasifica la familia de problema de programación de tareas. Luego el segundo componente, identifica la categoría de medidas de desempeño. Por último, el tercer componente determina el grupo de técnicas de solución sugeridas para el modelamiento del problema. Con estos resultados, se procede a parametrizar la técnica de solución donde de acuerdo con la familia de problemas se sugiere una representación específica del mismo, permitiendo seleccionar dicho problema por el usuario. Con estos resultados, el segundo componente determina la familia de medidas de desempeño a emplear de acuerdo con la caracterización del sistema (notación) y la familia y problema específico de programación de tareas. Por último, con los resultados de los dos anteriores se presenta al usuario el grupo de técnicas y su posterior despliegue en subgrupos específicos de técnicas de solución para el problema.

- En cuanto a los tres casos de estudio[11] se realizó aplicación de la propuesta y trabajos derivados en los siguientes sectores:
  - En el sector de servicios de mensajería se desarrolló un método híbrido basado en un Sistema Experto, algoritmos de agrupación y Colonia de Hormigas para el ruteo, con el fin de diseñar programas y rutas de entrega para operadores.
  - En el sector de servicios de cuidado a la salud domiciliaria se desarrolló un método de solución basado en sistemas multi-agente y métodos de ruteo y programación de operadores de salud.
  - En el sector de servicios de mantenimiento, con la propuesta de un modelo estocástico para la generación de programas de mantenimiento preventivo y un modelo de ruteo para la programación de técnicos

5.4 Lista de publicaciones derivadas de la tesis

Las siguientes publicaciones en revistas indexadas soportan esta tesis doctoral:

1. Lopez-Santana, E.., Bolaños, S., & Méndez-Giraldo, G. (2016). Modelo metodológico para programación de tareas en sistemas de servicios: un enfoque de ingeniería de software. Redes de Ingeniería, 7(1), 55–66. https://doi.org/10.14483/UDISTRITAL.JOUR.REDES.2016.1.A07. **Categoría C (Q4) en Colciencias, 2016.**
2. López-Santana E.R., Méndez-Giraldo G.A. (2016) A Non-linear Optimization Model and ANFIS-Based Approach to Knowledge Acquisition to Classify Service Systems. In: Huang DS., Han K., Hussain A. (eds) Intelligent Computing Methodologies. ICIC 2016. Lecture Notes in Computer Science, vol 9773. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42297-8_73 **Categoría A2 (Q2) en Colciencias, 2016.**
3. López-Santana E.R., Méndez-Giraldo G.A. (2016) A Knowledge-Based Expert System for Scheduling in Services Systems. In: Figueroa-García J., López-Santana E., Ferro-Escobar R. (eds) Applied Computer Sciences in Engineering. WEA 2016. Communications in Computer and Information Science, vol 657. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50880-1_19. **Categoría B (Q3) en Colciencias, 2016.**
4. López-Santana E., Méndez-Giraldo G., Rodriguez-Molano J.I. (2018) A Rule-Based System to Classify Scheduling Problems and Solution Techniques for Service Systems. In: Tan Y., Shi Y., Tang Q. (eds) Data Mining and Big Data. DMBD 2018. Lecture Notes in Computer Science, vol 10943. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93803-5_42. **Categoría A2 (Q2) en Colciencias, 2017.**
5. López-Santana, E., Rodríguez-Vásquez, W., & Méndez-Giraldo, G. (2018). A hybrid expert system, clustering and ant colony optimization approach for scheduling and routing problem in courier services. International Journal of Industrial Engineering Computations, 9(3), 369–396. https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2017.8.001. **Categoría A1 (Q1) en Colciencias, 2017.**

[11] En el transcurso del desarrollo de esta Tesis Doctoral se implementaron dos casos de estudio adicionales a los presentados en este documento. Uno de ellos fue en el sector de sistemas de ruteo para recolección de basuras publicado en *WEA2015* (Daza Cruz, Patiño Chirva, & López-Santana, 2015) e *Ingeniería* (Patiño Chirva et al., 2016) en colaboración con las estudiantes Xiomara Daza y Johana Patiño en su trabajo de grado de Ingeniería Industrial de la Universidad Distrital bajo la tutoría del profesor Eduyn López-Santana. El segundo caso fue en el sector de administración de operaciones de salud publicado en WEA2015 (Lopez-Santana et al., 2015) en colaboración con el estudiante Gustavo Flórez en el marco de su tesis de Maestría en Ingeniería Industrial de la Universidad Distrital bajo la tutoría del profesor Eduyn López-Santana. Ambos trabajos fueron vinculado directamente a la tesis de doctorado en el grupo de investigación ARCOSES.

Las siguientes son publicaciones en revistas indexadas derivadas de resultados parciales y aplicaciones de esta tesis doctoral:

1. Patiño Chirva, J. A., Daza Cruz, Y. X., & López-Santana, E. R. (2016). A Hybrid Mixed-Integer Optimization and Clustering Approach to Selective Collection Services Problem of Domestic Solid Waste. Ingeniería, 21(2), 235–247. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2016.2.a09 **Categoría B (Q3) en Colciencias, 2016.**
2. López-Santana E.R., Espejo-Díaz J.A., Méndez-Giraldo G.A. (2016) Multi-agent Approach for Solving the Dynamic Home Health Care Routing Problem. In: Figueroa-García J., López-Santana E., Ferro-Escobar R. (eds) Applied Computer Sciences in Engineering. WEA 2016. Communications in Computer and Information Science, vol 657. Springer, Cham https://doi.org/10.1007/978-3-319-50880-1_17. **Categoría B (Q3) en Colciencias, 2016.**
3. Rodríguez-Vásquez W.C., López-Santana E.R., Méndez-Giraldo G.A. (2016) Proposal for a Hybrid Expert System and an Optimization Model for the Routing Problem in the Courier Services. In: Figueroa-García J., López-Santana E., Ferro-Escobar R. (eds) Applied Computer Sciences in Engineering. WEA 2016. Communications in Computer and Information Science, vol 657. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50880-1_13. **Categoría B (Q3) en Colciencias, 2016.**
4. López-Santana E., Méndez-Giraldo G., Rodriguez J. (2018) A Rule-Based System to Scheduling and Routing Problem in Home Health Care Services. In: Gervasi O. et al. (eds) Computational Science and Its Applications – ICCSA 2018. ICCSA 2018. Lecture Notes in Computer Science, vol 10961. Springer, Cham https://doi.org/10.1007/978-3-319-95165-2_35 **Categoría A2 (Q2) en Colciencias, 2017.**
5. López-Santana, E., Méndez-Giraldo, G. & Figueroa Garcia, J. (2018) Scheduling in Queuing Systems and Networks using ANFIS. In Fuzzy and Rough Sets-Recent Advances and Applications. (*aceptado, en impresión*). **Categoría (Q3), 2018.**

Las siguientes son participaciones en congresos para socialización de avances de resultados parciales que soportan esta tesis doctoral:

1. Lopez-Santana, E. & Méndez-Giraldo, G. (2015) A Notation to Scheduling Problem in Service Systems. IIE Annual Conference and Expo Industrial and Systems Engineering Research Conference 2015- ISERC – llevada a cabo del 30 de mayo al 2 de junio del 2015 en la ciudad de Nashville, Tenessee, Estados Unidos.
2. Daza Cruz, Y. X., Patiño Chirva, J. A., & López-Santana, E. (2015). A mixed integer optimization model to design a selective collection routing problem for domestic solid waste. Workshop on Engineering Applications - International Congress on Engineering (WEA) Bogotá, Colombia.
3. Lopez-Santana, E., Méndez-Giraldo, G.., & Florez Becerra, G. (2015). On the conceptual design of multi-agent system for load balancing using multi-class queueing networks. 2015 Workshop on Engineering Applications - International Congress on Engineering (WEA), Bogotá, Colombia.
4. López-Santana, E., & Méndez-Giraldo, G. (2015). Proposal for a rule-based classification system for service systems. In Proceedings of Fifth International Conference on Computing Mexico-Colombia and XV Academic Conference on Artificial Intelligence (pp. 1–8). Cartagena, Colombia.
5. López-Santana, E., Espejo-Díaz, J., & Méndez-Giraldo, G. (2016). Modelo de programación entera mixta para programación y ruteo en cuidado a la salud domiciliaria considerando la promesa de servicio. In III Congreso Internacional de Industria y Organizaciones – "Gestión de Cadenas de Abastecimiento en un Mundo Cambiante" (pp. 1–8). Cali, Colombia.

6. López-Santana, E., & Méndez-Giraldo, G. (2017). Solving multi-period service scheduling and routing problems: a multi-period maintenance service application. In 28th Annual Conference of the Production and Operations Management Society (POMS) Hyatt Regency Bellevue, Seattle, USA.
7. López-Santana, E., Méndez-Giraldo, G. & Figueroa Garcia, J. (2017) An ANFIS-based approach to Scheduling in Queueuing Systems. In 2nd International Symposium on Fuzzy and Rough Sets (ISFUROS 2017). Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara, Cuba.
8. López-Santana, E., & Méndez-Giraldo, G. (2018). Prototipo de Sistema Experto híbrido para programación de tareas en servicios. In V Congreso Internacional de Industria y Organizaciones - Industria y Logística para el desarrollo, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Se obtuvo el siguiente premio internacional:

Emerging Economies Doctoral Student Award 2017 (EEDSA 2017). Premio otorgado en la 28th Annual Conference of Production and Operations Management Society (POMS 2017). http://poms.org/awards/eedsa_awards . Este premio es un reconocimiento que se concede a estudiantes doctorales mediante la postulación evaluada por un jurado en los siguientes criterios: hoja de vida y trayectoria del aspirante, propuesta de investigación y avances obtenidos, y la presentación en la conferencia. La selección se realiza entre aspirantes de Latinoamérica y el caribe, África, y Asia. La edición 2017 fue la octava entrega de este premio.

5.5 Trabajos futuros

Este trabajo de tesis doctoral genera posibles líneas futuras de desarrollo y de extensión de los aportes aquí logrados. Entre ellos se destacan:

- Aplicar el SE de clasificación de sistemas de servicios con la configuración de los atributos definidos a otros sistemas de clasificación como el NICE y determinar las reglas de clasificación de un nuevo producto o servicio. De esta manera se podría homologar los sistemas de clasificación de actividades económicas y esto podría ayudar a la consolidación de estadísticas y gestión de la productividad desde el punto de vista de políticas de alto nivel
- Explorar métodos de clasificaciones basados en atributos numéricos y que estén sujetos a incertidumbre aplicando entre otras técnicas como la lógica difusa.
- Integrar otros métodos de clasificación para el componente de sistemas de servicios y el de programación de tareas, que permita la comparación y la selección del usuario, por ejemplo, un indicador ponderado entre instancias clasificadas correctamente que sea dependiente de otras variables.
- Homologar y unificar la notación propuesta para problemas de programación en sistemas de servicio con la notación de sistemas de manufactura (como la notación de Graham), y establecer una relación con los desarrollos de estudios de complejidad computacional de los problemas existentes para las técnicas de solución.
- Desarrollo de *SchES* en un lenguaje web que permita el acceso desde diferentes ambientes, para hacerlo más accesible al mercado y en especial a las Pymes, así como incrementar la base de conocimiento.
- Como fase posterior a *SchES*, se puede desarrollar un módulo que permita la generación de modelos estructurados para las técnicas de solución, por ejemplo, para un modelo de optimización, se puede generar las variables de decisión, función objetivo y restricciones, que se podría aplicar al problema de acuerdo a la información de la notación; y para el caso de una heurística/metaheurística una representación del problema y un pseudocódigo para su implementación.

- Explorar métodos de solución para problemas de programación, ruteo y problemas combinados, que son los problemas más comunes en sistemas de servicios, en especial aquellos con información sujeta a incertidumbre y su integración con métodos de optimización, heurísticas y metaheurísticas.

REFERENCIAS

Abbatecola, L., Fanti, M. P., & Ukovich, W. (2016). A review of new approaches for Dynamic Vehicle Routing Problem. *2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 361–366. https://doi.org/10.1109/COASE.2016.7743429

Abdolzadeh, M., & Rashidi, H. (2009). Solving Job Shop Scheduling Problem Using Cellular Learning Automata. In *Third UKSim European Symposium on Computer Modeling and Simulation* (pp. 49–54). IEEE. https://doi.org/10.1109/EMS.2009.68

Adeli, H. (1988). *Expert systems in construction and structural engineering*. CRC Press. Retrieved from http://books.google.com.co/books?id=l4w9AAAAIAAJ

Akada, Y. T., & Awamura, H. K. (2015). Time and motion study for operation improvement in Ryokans. *Journal of Japan Industrial Management Association*, *66*(4E), 448–459. Retrieved from https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84960337584&partnerID=40&md5=6ec7830e384cbd0d03996352d056ee62

Álvarez, L., Caicedo, C., Malaver, M., & Méndez, G. (2011). Investigación y desarrollo de un prototipo de Sistema Experto para Scheduling en Pymes con entorno Job Shop. *Revista Científica*, *0*(12).

Archetti, C., Jabali, O., & Speranza, M. G. (2015). Multi-period Vehicle Routing Problem with Due dates. *Computers & Operations Research*, *61*, 122–134. https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.03.014

Asobancaria. (2017). *El sector servicios: ¿vamos por buen camino?* Retrieved from http://www.asobancaria.com/wp-content/uploads/2018/02/1115.pdf

Assaleh, K. (2007). Extraction of Fetal Electrocardiogram Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, *54*(1), 59–68. https://doi.org/10.1109/TBME.2006.883728

Atabakhsh, H. (1991). A survey of constraint based scheduling systems using an artificial intelligence approach. *Artificial Intelligence in Engineering*, *6*(2), 58–73. https://doi.org/10.1016/0954-1810(91)90001-5

Azadeh, A., Faiz, Z. S., Asadzadeh, S. M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2011). An integrated artificial neural network-computer simulation for optimization of complex tandem queue systems. *Mathematics and Computers in Simulation*, *82*(4), 666–678. https://doi.org/10.1016/j.matcom.2011.06.009

Bachouch, R. Ben, Guinet, A., & Hajri-Gabouj, S. (2010). An optimization model for task assignment in home health care. In *2010 IEEE Workshop on Health Care Management (WHCM)* (pp. 1–6). IEEE. https://doi.org/10.1109/WHCM.2010.5441277

Baldwin, R. O., Davis IV, N. J., Midkiff, S. F., & Kobza, J. E. (2003). Queueing network analysis: concepts, terminology, and methods. *Journal of Systems and Software*, *66*(2), 99–117. https://doi.org/10.1016/S0164-1212(02)00068-7

Balka, K., Raasch, C., & Herstatt, C. (2014). The effect of selective openness on value creation in user innovation communities. *Journal of Product Innovation Management*, *31*(2), 392–407. https://doi.org/10.1111/jpim.12102

Banco Mundial. (2018). Servicios, etc., valor agregado (% del PIB). Retrieved June 15, 2018, from https://datos.bancomundial.org/

Begur, S. ., Miller, D. M., & Weaber, J. . (1997). An integrated spatial decision support system for scheduling and routing home health care nurses. *Institute of Operations Research and Management Science*, 35–48.

Berglund, M., & Karltun, J. (2007). Human, technological and organizational aspects influencing the production scheduling process. *International Journal of Production Economics*, *110*(1–2), 160–174. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.02.024

Bhatnagar, S., Prasad, H., & Prashanth, L. (2013). Service Systems. In S. I. Gass & M. C. Fu (Eds.).

Blazewicz, J., Ecker, K. H., Pesch, E., Schmidt, G., & Weglarz, J. (2007). *Handbook on Scheduling: From*

Theory to Applications. Springer.
Bloch, C., & Manier, M.-A. (1999). Notation and typology for the hoist scheduling problem. In *IEEE SMC'99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No.99CH37028)* (Vol. 6, pp. 475–480). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICSMC.1999.816598
Borsani, V., Matta, A., Beschi, G., & Sommaruga, F. (2006). A Home Care Scheduling Model For Human Resources. In *2006 International Conference on Service Systems and Service Management* (pp. 449–454). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICSSSM.2006.320504
Böttcher, M., & Fähnrich, K.-P. (2011). Service Systems Modeling: Concepts, Formalized Meta-Model and Technical Concretion. In H. Demirkan, J. C. Spohrer, & V. Krishna (Eds.), *The Science of Service Systems* (pp. 131–149). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8270-4
Braekers, K., Hartl, R. F., Parragh, S. N., & Tricoire, F. (2016). A bi-objective home care scheduling problem: Analyzing the trade-off between costs and client inconvenience. *European Journal of Operational Research*, *248*(2), 428–443. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.028
Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuyse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers and Industrial Engineering*, *99*, 300–313. https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007
Bray, D. A. (2007). Literature Review - Knowledge Management Research at the Organizational Level. *SSRN Electronic Journal*, *67*(1), 1–18. https://doi.org/10.2139/ssrn.991169
Breidbach, C. F., Brodie, R., & Hollebeek, L. (2014). Beyond virtuality: From engagement platforms to engagement ecosystems. *Managing Service Quality*, *24*(6), 592–611. https://doi.org/10.1108/MSQ-08-2013-0158
C, L., & Iyer, S. A. (2013). Application of queueing theory in health care: A literature review. *Operations Research for Health Care*, *2*, 25–39. https://doi.org/10.1016/j.orhc.2013.03.002
Cappanera, P., & Scutellà, M. G. (2013). Home care optimization: Impact of pattern generation policies on scheduling and routing decisions. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, *41*, 53–60. https://doi.org/10.1016/j.endm.2013.05.075
Castillo-Salazar, J. A., Landa-Silva, D., & Qu, R. (2014). Workforce scheduling and routing problems: literature survey and computational study. *Annals of Operations Research*, 1–29. https://doi.org/10.1007/s10479-014-1687-2
Ceschin, F. (2013). Critical factors for implementing and diffusing sustainable product-Service systems: Insights from innovation studies and companies' experiences. *Journal of Cleaner Production*, *45*, 74–88. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.034
Ceschin, F. (2014). How the design of socio-technical experiments can enable radical changes for sustainability. *International Journal of Design*, *8*(3), 1–21. Retrieved from https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84920111130&partnerID=40&md5=52456626232fb29435ad95ca499dcc4d
Chen, W. K. (2004). *The electrical engineering handbook*. Book, Academic press.
Chen, Y., Wang, X., Lin, F., & Tang, K. (2006). The multi-agent modelling of production logistics system and the shop dynamic scheduling optimization in discrete manufacturing enterprises. *Technology and Innovation Conference, 2006. ITIC 2006. International*, 604–610. https://doi.org/10.1049/cp:20060833
Cheng, C.-B., & Mao, C.-P. (2007). A modified ant colony system for solving the travelling salesman problem with time windows. *Mathematical and Computer Modelling*, *46*(9–10), 1225–1235. Journal Article. https://doi.org/10.1016/j.mcm.2006.11.035
Cheng, E., & Richs, J. L. (1998). *A Home Health Care Routing and Scheduling Problem*. Houston, Texas, USA. Retrieved from http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.51.8869
Chiarini, A. (2014). Strategies for developing an environmentally sustainable supply chain: Differences between manufacturing and service sectors. *Business Strategy and the Environment*, *23*(7), 493–504. https://doi.org/10.1002/bse.1799
Choi, E., & Tcha, D. W. (2007). A column generation approach to the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *Computers and Operations Research*, *34*(7), 2080–2095. https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.08.002
Chong, A. Y.-L., & Zhou, L. (2014). Demand chain management: Relationships between external antecedents, web-based integration and service innovation performance. *International Journal of Production Economics*, *154*, 48–58. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.04.005
Chong, C. S., Low, M. Y. H., Sivakumar, A. I. A. A. I., Gay, K. L., Hean Low, M., Sivakumar, A. I. A. A. I., & Gay, K. L. (2006). A Bee Colony Optimization Algorithm to Job Shop Scheduling. In L.

F. Perrone, F. P. Wieland, J. Liu, B. G. Lawson, D. M. Nico, & R. M. Fujimoto (Eds.), *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference* (pp. 1954–1961). IEEE Press. https://doi.org/10.1109/WSC.2006.322980

Chu, Y., & You, F. (2013). Integration of production scheduling and dynamic optimization for multi-product CSTRs: Generalized Benders decomposition coupled with global mixed-integer fractional programming. *Computers and Chemical Engineering*, *58*, 315–333. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.08.003

Cissé, M., Yalçındağ, S., Kergosien, Y., Şahin, E., Lenté, C., & Matta, A. (2017). OR problems related to Home Health Care: A review of relevant routing and scheduling problems. *Operations Research for Health Care*, *13–14*, 1–22. https://doi.org/10.1016/j.orhc.2017.06.001

Conway, R. W., Maxwell, W. L., & Miller, L. W. (1967). *Theory of Scheduling*. New York, NY, USA: Addison Wesley. Retrieved from http://books.google.com/books?id=Yr5_kQDa_ssC&pgis=1

Dalkir, K. (2011). Knowledge Management in Theory and Practice. Retrieved from http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1995301

Dan, Z., Cai, L., & Zheng, L. (2009). Improved Multi-Agent System for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Tsinghua Science & Technology*, *14*(3), 407–412. https://doi.org/10.1016/S1007-0214(09)70058-6

DANE. (2012). Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades Económicas. Revisión 4 adaptada para Colombia. Departamento Adminstrativo Nacional de Estadística.

Daza Cruz, Y. X., Patiño Chirva, J. A., & López-Santana, E. (2015). A mixed integer optimization model to design a selective collection routing problem for domestic solid waste. In *2015 Workshop on Engineering Applications - International Congress on Engineering (WEA)* (pp. 1–5). IEEE. https://doi.org/10.1109/WEA.2015.7370127

De Carvalho, M. M., Ho, L. L., & Pinto, S. H. B. (2014). The Six Sigma program: An empirical study of Brazilian companies. *Journal of Manufacturing Technology Management*, *25*(5), 602–630. https://doi.org/10.1108/JMTM-04-2012-0045

Dean, M. D., & Nair, S. K. (2014). Mass-casualty triage: Distribution of victims to multiple hospitals using the SAVE model. *European Journal of Operational Research*, *238*(1), 363–373. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.03.028

Defraeye, M., & Van Nieuwenhuyse, I. (2016). Staffing and scheduling under nonstationary demand for service: A literature review. *Omega (United Kingdom)*, *58*, 4–25. https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.04.002

Delen, D., Zaim, H., Kuzey, C., & Zaim, S. (2013). A comparative analysis of machine learning systems for measuring the impact of knowledge management practices. *Decision Support Systems*, *54*(2), 1150–1160. https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.10.040

Demirkan, H., & Delen, D. (2013). Leveraging the capabilities of service-oriented decision support systems: Putting analytics and big data in cloud. *Decision Support Systems*, *55*(1), 412–421. https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.05.048

Demirkan, H., Spohrer, J. C., & Krishna, V. (2011). Introduction of the Science of Service Systems. In H. Demirkan, J. C. Spohrer, & V. Krishna (Eds.), *The Science of Service Systems* (pp. 1–11). Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8270-4_1

Deters, C., Secco, E. L., Wuerdemann, H. A., Lam, H. K., Seneviratne, L. D., & Althoefer, K. (2013). Model-free fuzzy tightening control for bolt/nut joint connections of wind turbine hubs. In *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 270–276). https://doi.org/10.1109/ICRA.2013.6630587

Díez, R. P., Gómez, A. G., & Martínez, N. de A. (2001). *Introduction to Artificial Intelligence: Expert Systems, Artificial Neural Networks, and Evolutionary Computation*. Universidad de Oviedo.

Ding, Q., Hu, X., Sun, L., & Wang, Y. (2012). An improved ant colony optimization and its application to vehicle routing problem with time windows. *Neurocomputing*, *98*, 101–107. Journal Article. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2011.09.040

Dong, C.-S. J., & Srinivasan, A. (2013). Agent-enabled service-oriented decision support systems. *Decision Support Systems*, *55*(1), 364–373. https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.05.047

Duffuaa, S. O. S. (2000). Mathematical models in maintenance planning and scheduling. *Maintenance, Modeling and Optimization*, 39–53. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4329-9_2

Durugbo, C. (2014). Strategic framework for industrial product-service co-design: Findings from the microsystems industry. *International Journal of Production Research*, *52*(10), 2881–2900. https://doi.org/10.1080/00207543.2013.857054

Edvardsson, B., Meiren, T., Schäfer, A., & Witell, L. (2013). Having a strategy for new service

development - does it really matter? *Journal of Service Management*, *24*(1), 25–44. https://doi.org/10.1108/09564231311304170

Erol, R., Sahin, C., Baykasoglu, A., & Kaplanoglu, V. (2012). A multi-agent based approach to dynamic scheduling of machines and automated guided vehicles in manufacturing systems. *Applied Soft Computing Journal*, *12*(6), 1720–1732. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.02.001

Espejo Diaz, J. A. (2016). *Modelo de Simulación Basado en Agentes para Resolver el Problema de Ruteo en el Cuidado de la Salud Domiciliaria. Trabajo Pregrado*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Retrieved from http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/3813

Farahani, R. Z., Rezapour, S., & Kardar, L. (2011). *Logistics operations and management: concepts and models*. Book, Elsevier. https://doi.org/10.1016/c2010-0-67008-8

Favaretto, D., Moretti, E., & Pellegrini, P. (2004). Ant colony system for variants of traveling salesman problem with time windows. *Ca Foscari University, Venice, Tech. Rep.* Journal Article.

Fikar, C., & Hirsch, P. (2017). Home health care routing and scheduling: A review. *Computers & Operations Research*, *77*, 86–95. https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.07.019

Francis, P. M., Smilowitz, K. R., & Tzur, M. (2008). The period vehicle routing problem and its extensions. In B. Golden, S. Raghavan, & E. Wasil (Eds.), *The Vehicle Routing Problem* (Vol. 43, pp. 73–102). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-77778-8_4

Gallego, J., Rubalcaba, L., & Hipp, C. (2013). Services and organisational innovation: the right mix for value creation. *Management Decision*, *51*(6), 1117–1134. https://doi.org/10.1108/MD-11-2012-0446

Galvagno, M., & Dalli, D. (2014). Theory of value co-creation: A systematic literature review. *Managing Service Quality*, *24*(6), 643–683. https://doi.org/10.1108/MSQ-09-2013-0187

García-Galán, S., Prado, R. P., & Muñoz Expósito, J. E. (2012). Fuzzy scheduling with swarm intelligence-based knowledge acquisition for grid computing. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *25*(2), 359–375. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2011.11.002

García, M. M. (2013). Estudio Del Triaje En Un Servicio De Urgencias Hospitalario. *RevistaEnfermeríaCyL*, *5*(1), 42–49.

Geethanjali, M., & Raja Slochanal, S. M. (2008). A combined adaptive network and fuzzy inference system (ANFIS) approach for overcurrent relay system. *Neurocomputing*, *71*(4–6), 895–903. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2007.02.015

Genet, N., Boerma, W., Kroneman, M., Hutchinson, A., & Saltman, R. B. (2012). Home Care across Europe - Current structure and future challenges. *World Health Organization*, 156.

Gibbons, R. (1993). *Un primer curso de teoría de juegos*. (A. Bosh, Ed.). Buenos Aires.

Glover, F. W., & Kochenberger, G. A. (2003). *Handbook of metaheuristics*. (G. Fred & Gary A. Kochenberger, Eds.) (Vol. 57). Book, Springer US. https://doi.org/10.1007/b101874

Goel, A., & Meisel, F. (2013). Workforce routing and scheduling for electricity network maintenance with downtime minimization. *European Journal of Operational Research*, *231*(1), 210–228. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.05.021

Gottfredson, L. S. (1997). Mainstream science on intelligence: An editorial with 52 signatories, history, and bibliography. *Intelligence*, *24*(1), 13–23.

Graham, R. L., Lawler, E. L., Lenstra, J. K., & Kan, A. H. G. R. (1979). Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling: a Survey. *Annals of Discrete Mathematics*, *5*(C), 287–326. https://doi.org/10.1016/S0167-5060(08)70356-X

Grigoriev, A., Van de Klundert, J., & Spieksma, F. C. R. (2006). Modeling and solving the periodic maintenance problem. *European Journal of Operational Research*, *172*(3), 783–797. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.11.013

Gromicho, J. A. S., van Hoorn, J. J., Saldanha-da-Gama, F., & Timmer, G. T. (2012). Solving the job-shop scheduling problem optimally by dynamic programming. *Computers & Operations Research*, *39*(12), 2968–2977. https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.02.024

Guerra, L., Molinillo, S., & Bermúdez, G. (2009). Inteligencia Organizacional como elemento dinamizador de configuraciones organizativas competitivas del sector empresarial. *Espacios*, *30*, 10.

Guo, Q., & Zhang, M. (2008). Research on intelligent manufacturing system based on multi-agent. In *Intelligent Robotics and Applications* (pp. 829–838). Springer.

Gutiérrez, E. V., & Vidal, C. J. (2013). Home Health Care Logistics Management Problems: A critical review of models and methods. *Rev. Fac. Ingeniería. Universidad de Antioquia*, *68*, 160–175.

Hall, M., Frank, E., Holmes, G., Pfahringer, B., Reutemann, P., & Witten, I. H. (2009). The WEKA data mining software. *ACM SIGKDD Explorations*, *11*(1), 10–18.

https://doi.org/10.1145/1656274.1656278
Harmon, P., & King, D. (1988). *Sistemas expertos: aplicaciones de la inteligencia artificial en la actividad empresarial*. Ediciones Díaz de Santos. Retrieved from http://books.google.com.co/books?id=QZ3C7-y6LxAC
Haslinda, a., & Sarinah, a. (2009). A Review of Knowledge Management Models. *The Journal of International Social Research*, *2*(9), 187–198.
Heo, C. Y., Lee, S., Mattila, A., & Hu, C. (2013). Restaurant revenue management: Do perceived capacity scarcity and price differences matter? *International Journal of Hospitality Management*, *35*, 316–326. https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2013.05.007
Holte, R. C. (1993). Very Simple Classification Rules Perform Well on Most Commonly Used Datasets. *Machine Learning*, *11*(1), 63–90. https://doi.org/10.1023/A:1022631118932
Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2011). *Factory physics - Foundations of Manufacturing Management*. Irwin/McGraw-Hill. Retrieved from http://books.google.com.co/books?id=Pci5AAAAIAAJ
Hsieh, F.-S., & Lin, J.-B. (2014). Scheduling Patients in Hospitals Based on Multi-agent Systems. In M. Ali, J.-S. Pan, S.-M. Chen, & M.-F. Horng (Eds.), *Modern Advances in Applied Intelligence* (pp. 32–42). Springer International Publishing.
Huang, M.-H., & Rust, R. T. (2013). IT-Related Service: A Multidisciplinary Perspective. *Journal of Service Research*, *16*(3), 251–258. https://doi.org/10.1177/1094670513481853
Huynh Tuong, N., Soukhal, A., & Billaut, J.-C. (2010). A new dynamic programming formulation for scheduling independent tasks with common due date on parallel machines. *European Journal of Operational Research*, *202*(3), 646–653. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.06.033
Ing, D. (2011). Service Systems in Changing Paradigms; An Inquiry Through the Systems Science. In H. Demirkan, J. C. Spohrer, & V. Krishna (Eds.), *The Science of Service Systems* (pp. 267–296). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8270-4
Issaoui, B., Zidi, I., Marcon, E., & Ghedira, K. (2015). New multi-objective approach for the home care service problem based on scheduling algorithms and variable neighborhood descent. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, *47*, 181–188. https://doi.org/10.1016/j.endm.2014.11.024
Jang, J.-S. R. J. S. R. (1993). ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, *23*(3), 665–685. https://doi.org/10.1109/21.256541
Jardine, A. K. S., & Tsang, A. H. C. (2005). Component Replacement Decisions. In *Maintenance, Replacement, and Reliability* (pp. 27–89). CRC Press, Taylor & Francis Group.
Jin, T., Tian, Z., & Xie, M. (2015). A game-theoretical approach for optimizing maintenance, spares and service capacity in performance contracting. *International Journal of Production Economics*, *161*, 31–43. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.11.010
John, G. H., & Langley, P. (1995). Estimating Continuous Distributions in Bayesian Classifiers. In *Proceedings of the Eleventh Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence* (pp. 338–345). San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc.
Joore, P., & Brezet, H. (2015). A Multilevel Design Model: The mutual relationship between product-service system development and societal change processes. *Journal of Cleaner Production*, *97*, 92–105. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.043
Kamvysi, K., Gotzamani, K., Andronikidis, A., & Georgiou, A. C. (2014). Capturing and prioritizing students' requirements for course design by embedding Fuzzy-AHP and linear programming in QFD. *European Journal of Operational Research*, *237*(3), 1083–1094. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.02.042
Kara, I., & Derya, T. (2015). Formulations for Minimizing Tour Duration of the Traveling Salesman Problem with Time Windows. *Procedia Economics and Finance*, *26*, 1026–1034. https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)00926-0
Kek, A. G. H., Cheu, R. L., & Meng, Q. (2008). Distance-constrained capacitated vehicle routing problems with flexible assignment of start and end depots. *Mathematical and Computer Modelling*, *47*(1–2), 140–152. https://doi.org/10.1016/j.mcm.2007.02.007
Kendall, D. G. (1953). Stochastic Processes Occurring in the Theory of Queues and their Analysis by the Method of the Imbedded Markov Chain. *The Annals of Mathematical Statistics*, *24*(3), 338–354. https://doi.org/10.1214/aoms/1177728975
Khan, H. U., Artail, H. A., Malik, Z., & Niazi, M. (2015). Information technology adoption, possible challenges, and framework of supply chain management: A case study of a leading gulf economy. In *2014 4th International Conference on Engineering Technology and Technopreneuship, ICE2T 2014* (Vol. 2014–Janua). https://doi.org/10.1109/ICE2T.2014.7006207
King, W. R. (2009). Knowledge Management and Organizational Learning. In W. R. King (Ed.),

Knowledge Management and Organizational Learning (Vol. 4, pp. 3–13). Springer Science & Business Media. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0011-1_1

Krishnamoorthy, C. S., & Rajeev, S. (1996). *Artificial intelligence and expert systems for engineers*. Boca Raton: CRC Press.

Kusiak, A. (1990). *Intelligent manufacturing systems*. London: Prentice Hall International.

Laha, D. (2007). Heuristics and Metaheuristics for Solving Scheduling Problems. *Handbook of Computational Intelligence in Manufacturing and Production Management*, 1–18. https://doi.org/10.4018/978-1-59904-582-5.ch001

Landa-silva, W. L. D. (2016). Decomposition techniques with mixed integer programming and heuristics for home healthcare planning. *Annals of Operations Research*. https://doi.org/10.1007/s10479-016-2352-8

Laporte, G. (2016). Scheduling issues in vehicle routing. *Annals of Operations Research*, *236*(2), 463–474. https://doi.org/10.1007/s10479-013-1423-3

Lee, C.-Y., Lei, L., & Pinedo, M. (1997). Current trends in deterministic scheduling. *Annals of Operations Research*, *70*(0), 1–41. https://doi.org/10.1023/A:1018909801944

Lee, M. R., & Chen, T. T. (2012). Revealing research themes and trends in knowledge management: From 1995 to 2010. *Knowledge-Based Systems*, *28*, 47–58. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2011.11.016

Lepmets, M., Mesquida, A. L., Cater-Steel, A., Mas, A., & Ras, E. (2014). The evaluation of the IT service quality measurement framework in industry. *Global Journal of Flexible Systems Management*, *15*(1), 39–57. https://doi.org/10.1007/s40171-013-0052-7

Liao, Y.-W., Wang, Y.-M., Wang, Y.-S., & Tu, Y.-M. (2015). Understanding the dynamics between organizational IT investment strategy and market performance: A system dynamics approach. *Computers in Industry*, *71*, 46–57. https://doi.org/10.1016/j.compind.2015.02.006

Liebowitz, J. (2000). *Building organizational intelligence. A knowledge management primer* (CRC Primer). USA.

Lightfoot, H., Baines, T., & Smart, P. (2013). The servitization of manufacturing: A systematic literature review of interdependent trends. *International Journal of Operations and Production Management*, *33*(11), 1408–1434. https://doi.org/10.1108/IJOPM-07-2010-0196

López-Ibáñez, M., & Blum, C. (2010). Beam-ACO for the travelling salesman problem with time windows. *Computers & Operations Research*, *37*(9), 1570–1583. Journal Article. https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.11.015

López-Santana, E., Akhavan-Tabatabaei, R., Dieulle, L., Labadie, N., & Medaglia, A. L. (2016). On the combined maintenance and routing optimization problem. *Reliability Engineering & System Safety*, *145*, 199–214. https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.09.016

López-Santana, E., Espejo-Díaz, J., & Méndez-Giraldo, G. (2016). Modelo de programación entera mixta para programación y ruteo en cuidado a la salud domiciliaria considerando la promesa de servicio. In *III Congreso Internacional de Industria y Organizaciones – "Gestión de Cadenas de Abastecimiento en un Mundo Cambiante"* (pp. 1–8). Cali, Colombia.

López-Santana, E., & Mendez-Giraldo, G. (2017). Solving multi-period service scheduling and routing problems: a multi-period maintenance service application. In *28th Annual Conference of the Production and Operations Management Society (POMS)* (pp. 1–6).

López-Santana, E., & Méndez-Giraldo, G. (2015). Proposal for a rule-based classification system for service systems. In *Proceedings of Fifth International Conference on Computing Mexico-Colombia and XV Academic Conference on Artificial Intelligence* (pp. 1–8). Cartagena.

López-Santana, E., Méndez-Giraldo, G., & Rodriguez-Molano, J. I. (2018a). A Rule-Based System to Scheduling and Routing Problem in Home Health Care Services. In O. Gervasi, B. Murgante, S. Misra, E. Stankova, C. M. Torre, A. M. A. C. Rocha, … Y. Ryu (Eds.), *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2018* (Vol. 10961, pp. 496–508). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95165-2_35

López-Santana, E., Méndez-Giraldo, G., & Rodriguez-Molano, J. ignacio. (2018b). A Rule-Based System to Classify Scheduling Problems and Solution Techniques for Service Systems. In Y. Tan, Y. Shi, & Qirong Tang (Eds.), *Data Mining and Big Data* (Vol. 10943, pp. 445–455). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93803-5_42

López-Santana, E. R., Espejo-Díaz, J. A., & Méndez-Giraldo, G. A. (2016). Multi-agent Approach for Solving the Dynamic Home Health Care Routing Problem. In J. C. Figueroa-García, E. R. López-Santana, & R. Ferro-Escobar (Eds.), *Applied Computer Sciences in Engineering WEA 2016* (pp. 188–200). Springer International Publishing AG. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50880-1_17

López-Santana, E. R., & Méndez-Giraldo, G. A. (2016a). A Knowledge-Based Expert System for

Scheduling in Services Systems. In J. C. Figueroa-García, E. R. López-Santana, & R. Ferro-Escobar (Eds.), *Applied Computer Sciences in Engineering WEA 2016* (Vol. 657, pp. 212–224). Springer International Publishing AG. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50880-1_19

López-Santana, E. R., & Méndez-Giraldo, G. A. (2016b). A Non-linear Optimization Model and ANFIS-Based Approach to Knowledge Acquisition to Classify Service Systems. In D.-S. Huang, V. Bevilacqua, & P. Premaratne (Eds.), *Intelligent Computing Methodologies* (Vol. 9773, pp. 789–801). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42297-8_73

Lopez-Santana, E. R., Méndez-Giraldo, G. A., & Florez Becerra, G. F. (2015). On the conceptual design of multi-agent system for load balancing using multi-class queueing networks. *2015 Workshop on Engineering Applications - International Congress on Engineering (WEA)*, 1–7. https://doi.org/10.1109/WEA.2015.7370128

López-Santana, E. R., & Romero Carvajal, J. de J. (2015). A hybrid column generation and clustering approach to the school bus routing problem with time windows. *Ingeniería*, *20*(1), 111–127. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2015.1.a07

López-Santana, E., Rodríguez-Vásquez, W. C., & Méndez-Giraldo, G. (2018). A hybrid expert system, clustering and ant colony optimization approach for scheduling and routing problem in courier services. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, *9*(3), 369–396. https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2017.8.001

Lun, Y. H. V, Lai, K.-H., Wong, C. W. Y., & Cheng, T. C. E. (2013). Demand chain management in the container shipping service industry. *International Journal of Production Economics*, *141*(2), 485–492. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.12.009

Madureira, A., Cunha, B., & Pereira, I. (2014). Cooperation Mechanism for Distributed resource scheduling through artificial bee colony based self-organized scheduling system. In *Proceedings of the 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2014* (pp. 565–572). https://doi.org/10.1109/CEC.2014.6900574

Madureira, A., Pereira, I., Pereira, P., & Abraham, A. (2014). Negotiation mechanism for self-organized scheduling system with collective intelligence. *Neurocomputing*, *132*, 97–110. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2013.10.032

Madureira, A., Pereira, I., & Sousa, N. (2010). Collective intelligence on dynamic manufacturing scheduling optimization. In *Proceedings 2010 IEEE 5th International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications, BIC-TA 2010* (pp. 1693–1697). https://doi.org/10.1109/BICTA.2010.5645248

Madureira, A., Sousa, N., & Pereira, I. (2011). Swarm Intelligence for Scheduling: a Review.

Manier, M.-A., & Bloch, C. (2003). A Classification for Hoist Scheduling Problems. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, *15*(1), 37–55. https://doi.org/10.1023/A:1023952906934

Marilungo, E., Peruzzini, M., & Germani, M. (2015). An integrated method to support PSS design within the Virtual Enterprise. In *Procedia CIRP* (Vol. 30, pp. 54–59). https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.021

Marquès, G., Chalal, M., & Boucher, X. (2013). PSS production systems: A simulation approach for change management. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40361-3_48

Martínez, Á., & Lázaro, P. (2007). La Ciencia de los Servicios: un nuevo enfoque para la innovación en compañías de servicios. *Universia Business Review*, (15), 120–127.

McAdam, R., & McCreedy, S. (1999). A critical review of knowledge management models. *The Learning Organization*, *6*(3), 91–101. https://doi.org/10.1108/09696479910270416

Medina, L. A., & Silva, R. (2014). Industrial engineering from the vision of a portable automated model. In *IIE Annual Conference and Expo 2014* (pp. 3673–3682). Retrieved from https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84910072686&partnerID=40&md5=cf3e4a5515d9181cacfa5e09fc7b65fe

Méndez-Giraldo, G. (2001). *Sistemas Cooperativos Asistidos para la Programación de la Producción en la Industria Manufacturera Colombiana* (1st ed.). Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico.

Méndez-Giraldo, G. (2011). *Programación de tareas-Scheduling*. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Méndez-Giraldo, G., Álvarez, L., Caicedo, C., & Malaver, M. (2013). *Expert system for scheduling production-research and development of a prototype* (1st ed.). Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Méndez, G. (2003). *Gerencia de manufactura Función de planeación*. 1a ed. Bogotá: Universidad Distrital

Francisco José de Caldas.
Méndez Giraldo, G. A. (2014). Consideraciones sobre la línea de investigación en Inteligencia Organizacional en el Doctorado en Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. *Ingeniería*, *19*(2). https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2014.2.a06
Metaxiotis, K. S., Askounis, D., & Psarras, J. (2002). Expert systems in production planning and scheduling: A state-of-the-art survey. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *13*(4), 253–260. https://doi.org/10.1023/A:1016064126976
Mönch, L., & Almeder, C. (2009). Ant colony optimization approaches for scheduling jobs with incompatible families on parallel batch machines. *Proceedings MISTA*, 106–114.
Moons, S., Ramaekers, K., Caris, A., & Arda, Y. (2017). Integrating production scheduling and vehicle routing decisions at the operational decision level: A review and discussion. *Computers and Industrial Engineering*, *104*, 224–245. https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.12.010
Mourtzis, D., Fotia, S., & Doukas, M. (2015). Performance indicators for the evaluation of product-service systems design: A review. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22759-7_68
Nauck, D. D. (2003). Fuzzy data analysis with NEFCLASS. *International Journal of Approximate Reasoning*, *32*(2–3), 103–130. https://doi.org/10.1016/S0888-613X(02)00079-8
Nemhauser, G. (2012). Column Generation for Linear and Integer Programming. *Optimization Stories*, *I*, 65–73. Retrieved from http://www.emis.ams.org/journals/DMJDMV/vol-ismp/21_nemhauser-george-colgen.pdf
North, K., & Pöschl. (2003). *Un test de inteligencia para las organizaciones* (La Coria). Trujillo.
Olivera, A. (2004, August). *Heurísticas para Problemas de Ruteo de vehículos*. Universidad de la República de Montevideo, Uruguay.
Omara, F. A., & Arafa, M. M. (2010). Genetic algorithms for task scheduling problem. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, *70*(1), 13–22. https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2009.09.009
Pan, J.-N., & Nguyen, H. T. N. (2015). Achieving customer satisfaction through product-service systems. *European Journal of Operational Research*, *247*(1), 179–190. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.018
Patil, S. K., & Kant, R. (2014). Methodological literature review of knowledge management research. *Tékhne*, *12*(1–2), 3–14. https://doi.org/10.1016/j.tekhne.2014.07.001
Patiño Chirva, J. A., Daza Cruz, Y. X., & López-Santana, E. R. (2016). A Hybrid Mixed-Integer Optimization and Clustering Approach to Selective Collection Services Problem of Domestic Solid Waste. *Ingeniería*, *21*(2), 235–247. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2016.2.a09
Pereira, I., & Madureira, A. (2013). Self-Optimization module for Scheduling using Case-based Reasoning. *Applied Soft Computing*, *13*(3), 1419–1432. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.02.009
Pinedo, M. L. (2009). Service Models. In *Planning and Scheduling in Manufacturing and Services* (pp. 37–49). Springer New York.
Pinedo, M. L. (2016). *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26580-3
Pinedo, M., Zacharias, C., & Zhu, N. (2015). Scheduling in the service industries: An overview. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, *24*(1), 1–48. https://doi.org/10.1007/s11518-015-5266-0
Pinheiro, G., Hernández, R., & Raposo, M. (2007). *La inteligencia organizativa de las empresas del sector textil portugués* (La Coria). Trujillo.
Poels, G., Van Der Vurst, G., & Lemey, E. (2013). Towards an ontology and modeling approach for service science. *Lecture Notes in Business Information Processing*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36356-6_21
Polyvyanyy, A., & Weske, M. (2011). Flexible Service Systems. In H. Demirkan, J. C. Spohrer, & V. Krishna (Eds.), *The Science of Service Systems* (pp. 73–90). Springer US.
Pureza, V., Morabito, R., & Reimann, M. (2012). Vehicle routing with multiple deliverymen: Modeling and heuristic approaches for the VRPTW. *European Journal of Operational Research*, *218*(3), 636–647. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.12.005
Quinlan, J. R. (1993). *C4.5: Programs for Machine Learning*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc.
Rada-Vilela, J. (2017). fuzzylite: a fuzzy logic control library. Retrieved from http://www.fuzzylite.com/
Reim, W., Parida, V., & Sjödin, D. R. (2016). Risk management for product-service system operation. *International Journal of Operations and Production Management*, *36*(6), 665–686. https://doi.org/10.1108/IJOPM-10-2014-0498

Rihm, T., & Trautmann, N. (2017). A decomposition heuristic for short-term planning of assessment centres. *European Journal of Industrial Engineering*, *11*(6), 725–751. https://doi.org/10.1504/EJIE.2017.089099

Rodríguez-Vásquez, W. C. (2016). *Sistema experto hibrido para optimizar los procesos de programación, zonificación y diseño de rutas de un servicio de mensajería considerando restricciones de ventanas de tiempo, múltiples periodos de tiempo, fechas de vencimiento, distancia y horario en*. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas. https://doi.org/http://hdl.handle.net/11349/4517

Rodríguez-Vásquez, W. C., López-Santana, E. R., & Méndez-Giraldo, G. A. (2016). Proposal for a Hybrid Expert System and an Optimization Model for the Routing Problem in the Courier Services. In J. C. Figueroa-García, E. R. López-Santana, & R. Ferro-Escobar (Eds.), *Applied Computer Sciences in Engineering WEA 2016* (Vol. 657, pp. 141–152). Springer International Publishing AG. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50880-1_13

Rodriguez, S., Correa, D., & López-Santana, E. (2015). An Alternative Iterative Method to Periodic Vehicle Routing Problem. In S. Cetinkaya and J. K. Ryan (Ed.), *IIE Annual Conference and Expo 2015* (pp. 2001–2010).

Ross, S. (2006). *Introduction to Probability Models* (9th ed.). Academic Press. Retrieved from http://www.amazon.com/dp/0125980620

Ross, S. M. (1995). *Stochastic Processes* (2nd ed.). Wiley. Retrieved from http://www.amazon.com/dp/0471120626

Russell, S. J., & Norvig, P. (2010). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall.

Sadegheih, A. (2006). Scheduling problem using genetic algorithm, simulated annealing and the effects of parameter values on GA performance. *Applied Mathematical Modelling*, *30*(2), 147–154. https://doi.org/10.1016/j.apm.2005.03.017

Saravanan, M., Vijayakumar, S. J. D., & Srinivasan, R. (2014). A multicriteria permutation flowshop scheduling problem with setup times. *International Journal of Engineering & Technology (0975-4024)*, *6*(3).

Secco, E. L., & Magenes, G. (2002). A feedforward neural network controlling the movement of a 3-DOF finger. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, *32*(3), 437–445. https://doi.org/10.1109/TSMCA.2002.803101

Selviaridis, K., & Norrman, A. (2014). Performance-based contracting in service supply chains: A service provider risk perspective. *Supply Chain Management*, *19*(2), 153–172. https://doi.org/10.1108/SCM-06-2013-0216

Sensuse, D. I., Sucahyo, Y. G., Rohajawati, S., & Anggia, P. (2014). Models and frameworks of knowledge management: A literature review. In *2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering* (Vol. 2, pp. 1166–1170). IEEE. https://doi.org/10.1109/InfoSEEE.2014.6947854

Shin, K., & Han, S. (2012). A Centroid-based Heuristic Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem. *Computing and Informatics*, *30*(4), 721–732. Retrieved from http://www.cai.sk/ojs/index.php/cai/article/view/192

Siler, W., & Buckley, J. J. (2004). *Fuzzy expert systems and fuzzy reasoning*. John Wiley & Sons. Retrieved from http://books.google.com.co/books?id=MQNtBFmVfswC

Singh, B., Grover, S., & Singh, V. (2017). A benchmarking model for Indian service industries using MICMAC and WISM approach. *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, *8*, 1266–1281. https://doi.org/10.1007/s13198-017-0598-4

Smith, L., Maull, R., & Ng, I. C. L. (2014). Servitization and operations management: A service dominant-logic approach. *International Journal of Operations and Production Management*, *34*(2), 242–269. https://doi.org/10.1108/IJOPM-02-2011-0053

Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. *Operations Research*, *35*(2), 254–265. https://doi.org/10.1287/opre.35.2.254

Spohrer, J. C., Demirkan, H., & Krishna, V. (2011). Service and Science. *The Science of Service Systems*, 325–358. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8270-4

Spohrer, J., Maglio, P. P., Bailey, J., Gruhl, D., Jim Spohrer, Paul P. Maglio, … Daniel Gruhl. (2007). Steps Toward a Science of Service Systems. In *The 2007 IEEE International Conference on Information Reuse and* (Vol. 40, pp. 71–77). IEEE Computer Society. https://doi.org/10.1109/MC.2007.33

Stary, C. (2014). Non-disruptive knowledge and business processing in knowledge life cycles – Aligning value network analysis to process management. *Journal of Knowledge Management*, *18*(4), 651–686. https://doi.org/10.1108/JKM-10-2013-0377

Stefansson, H., Jensson, P., & Shah, N. (2006). Integration of multi-scale planning and scheduling

problems. *Computer Aided Chemical Engineering*, *21*(C), 2111–2116. https://doi.org/10.1016/S1570-7946(06)80360-3
Superintendencia de Sociedades. (2018). *Comportamiento De Las 1.000 Empresas Más Grandes del Secor Real, por ingresos operacionales Informe* (Vol. 1).
Svobodová, A., & Koudelková, P. (2011). Collective Intelligence And Knowledge Management As A Tool For Innovations. *ECONOMICS AND MANAGEMENT*.
Talib, F., Rahman, Z., & Qureshi, M. N. (2013). An empirical investigation of relationship between total quality management practices and quality performance in Indian service companies. *International Journal of Quality and Reliability Management*, *30*(3), 280–318. https://doi.org/10.1108/02656711311299845
Tan, B., Gershwin, S. B., Liberopoulos, G., Meerkov, S. M., & Papadopoulos, C. T. (2015). Advances in stochastic models of manufacturing and service operations. *Annals of Operations Research*, *231*(1). https://doi.org/10.1007/s10479-015-1868-7
Tarantilis, C. D., Paraskevopoulos, D. C., Laporte, G., Repoussis, P. P., & Tarantilis, C. D. (2016). Resource constrained routing and scheduling: Review and research prospects. *European Journal of Operational Research*, *263*(February), 737–754. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.05.035
Toth, P., & Vigo, D. (2002a). The vehicle routing problem, volume 9 of SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications. *SIAM, Philadelphia, PA*. Journal Article. https://doi.org/10.1137/1.9780898718515
Toth, P., & Vigo, D. (2002b). *The vehicle routing problem*. *Optimization* (Vol. 9). Philadelphia: SIAM. https://doi.org/10.1137/1.9780898718515
Tsai, W.-H., Yang, C.-H., Chang, J.-C., & Lee, H.-L. (2014). An Activity-Based Costing decision model for life cycle assessment in green building projects. *European Journal of Operational Research*, *238*(2), 607–619. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.03.024
Tukker, A. (2015). Product services for a resource-efficient and circular economy - A review. *Journal of Cleaner Production*, *97*, 76–91. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.049
Tyler, A. R. (2007). *Expert Systems Research Trends*. Nova Publishers.
UNESCO. (2009). *Clasificación Industrial Internacional Uniforme de todas las actividades económicas (CIIU)* (Estadístico No. Seria M No. 4/Rev. 4). New York, NY, USA: Naciones Unidas.
Usher, J. M. (2003). Negotiation-based routing in job shops via collaborative agents. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *14*(5), 485–499. https://doi.org/10.1023/A:1025705426184
Van Den Bergh, J., Beliën, J., De Bruecker, P., Demeulemeester, E., & De Boeck, L. (2013). Personnel scheduling: A literature review. *European Journal of Operational Research*, *226*(3), 367–385. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.11.029
Vanberkel, P. T., Boucherie, R. J., Hans, E. W., & Hurink, J. L. (2013). Optimizing the strategic patient mix combining queueing theory and dynamic programming. *Computers and Operation Research*, *43*, 271–279. https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.09.020
Vargo, S. L., & Lusch, R. F. (2008a). Service-dominant logic: Continuing the evolution. *Journal of the Academy of Marketing Science*, *36*(1), 1–10. https://doi.org/10.1007/s11747-007-0069-6
Vargo, S. L., & Lusch, R. F. (2008b). Why "service"? *Journal of the Academy of Marketing Science*, *36*(1), 25–38. https://doi.org/10.1007/s11747-007-0068-7
Ventresca, M., & Ombuki, B. M. (2004). Ant colony optimization for job shop scheduling problem. In *Proceedings of 8th IASTED International Conference On Artificial Intelligence and Soft Computing* (pp. 451–152).
Vignier, A., Billaut, J.-C., & Proust, C. (1999). Les problèmes d'ordonnancement de type flow-shop hybride: État de l'art. *RAIRO - Operations Research*, *33*(2), 117–183. https://doi.org/https://doi.org/10.1051/ro:1999108
von Bischhoffshausen, J. K., Hottum, P., & Schüritz, R. (2016). Service science textbooks: Opportunities of an interdisciplinary approach. *Lecture Notes in Business Information Processing*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32689-4_57
Wang, J. W., Wang, H. F., Zhang, W. J., Ip, W. H., & Furuta, K. (2014). On a unified definition of the service system: What is its identity? *IEEE Systems Journal*, *8*(3), 821–826. https://doi.org/10.1109/JSYST.2013.2260623
Wang, X., & Durugbo, C. (2013). Analysing network uncertainty for industrial product-service delivery: A hybrid fuzzy approach. *Expert Systems with Applications*, *40*(11), 4621–4636. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.01.062
Werner, F. (2011). Genetic algorithms for shop scheduling problems: A survey. *Preprint*, *11*, 31.
Wishon, C., & Rene Villalobos, J. (2016). Alleviating food disparities with mobile retailers: Dissecting

the problem from an or perspective. *Computers and Industrial Engineering*, *91*, 154–164. https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.11.014

Witkowski, T., Antczak, A., Antczak, P., & Elzway, S. (2011). Some Results on Evolving Cellular Automata Applied to the Production Scheduling Problem. In *Cellular Automata - Simplicity Behind Complexity* (pp. 377–398).

Xing, K., Wang, H.-F., & Qian, W. (2013). A sustainability-oriented multi-dimensional value assessment model for product-service development. *International Journal of Production Research*, *51*(19), 5908–5933. https://doi.org/10.1080/00207543.2013.810349

Xu, X., Thong, J. Y. L., & Venkatesh, V. (2014). Effects of ICT service innovation and complementary strategies on brand equity and customer loyalty in a consumer technology market. *Information Systems Research*, *25*(4), 710–729. https://doi.org/10.1287/isre.2014.0540

Yalcindag, S., Matta, A., & Sahin, E. (2012). Operator assignment and routing problems in home health care services. *2012 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 329–334. https://doi.org/10.1109/CoASE.2012.6386478

Yalçındağ, S., Cappanera, P., Grazia Scutellà, M., Şahin, E., & Matta, A. (2016). Pattern-based decompositions for human resource planning in home health care services. *Computers & Operations Research*, *73*, 12–26. https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.02.011

Yu, B., Yang, Z. Z., & Yao, B. Z. (2011). A hybrid algorithm for vehicle routing problem with time windows. *Expert Systems with Applications*, *38*(1), 435–441. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.06.082

Yuan, M., Shieh, T., Lu, G., & Lin, Y. (2014). The applications of industrial engineering in agriculture production management. In *Proceedings of the 5th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation, IEMI 2014* (pp. 403–408). https://doi.org/10.2991/978-94-6239-100-0-74

Yuan, Z., & Fügenschuh, A. (2015). *Home Health Care Scheduling: A Case Study*. *Applied Mathematics and Optimization Series* (Vol. 22). Hamburg.

Yue, L. (2013). Application of IE method in modern agro-ecological park planning. In *19th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management: Assistive Technology of Industrial Engineering* (pp. 157–169). https://doi.org/10.1007/978-3-642-38391-5-17

Zamorano, E., & Stolletz, R. (2017). Branch-and-price approaches for the Multiperiod Technician Routing and Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research*, *257*(1), 55–68. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.06.058

Zhang, C., Sun, J., Zhu, X., & Yang, Q. (2008). An improved particle swarm optimization algorithm for flowshop scheduling problem. *Information Processing Letters*, *108*(4), 204–209. https://doi.org/10.1016/j.ipl.2008.05.010

Zhang, H., Tang, D., Huang, T., & Xu, C. (2016). An Agent Based Intelligent Distributed Control Paradigm for Manufacturing Systems, 1549–1554. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.800

Página en blanco intencionalmente

ANEXOS

El siguiente es el listado de anexos como complemento de la tesis doctoral:

Pág.

Anexo A Notaciones para el problema de programación de tareas....161
Anexo B Listado de referencias muestra final revisión de literatura toma de decisiones en la ciencia de los servicios....163
Anexo C Listado completo de Fuentes y citaciones de Revisión de literatura toma de decisiones em ciencia de los servicios....166
Anexo D Listado de Preguntas para las características en el CCSS....167
Anexo E Base de conocimiento para los atributos, sector, sección y división del CCSS....169
Anexo F Base de conocimiento para las 31 características del CCSS....170
Anexo G Resultados detallados para los atributos del sistema de adquisición de conocimiento....171
Anexo H Preguntas y variables del sistema de adquisición de conocimiento para el CPT..179
Anexo I Base de conocimiento para el CPT....183
Anexo J Base de conocimiento para el CPT: relación CIIU y área/sub-área de problemas....186
Anexo K Resultados de algoritmos de clasificación para el tipo de problema....189
Anexo L Resultados de algoritmos de clasificación para el número de criterios....192
Anexo M Resultados de algoritmos de clasificación para el tipo de criterios....198
Anexo N Resultados de algoritmos de clasificación para el grupo de técnicas de solución 204
Anexo O Filtros de SQL aplicados a la base de conocimiento para el CPT....207
Anexo P Manual de usuario para SchES....211
Anexo Q Información complementaria Caso 1: servicios de mensajería....227
Anexo R Información complementaria Caso 2: servicio de cuidado a la salud domiciliaria....242
Anexo S Información complementaria Caso 3: servicio de mantenimiento....248

Página en blanco intencionalmente

Anexo A Notaciones para el problema de programación de tareas

Este anexo presenta la descripción de las notaciones presentadas para el problema de programación de tareas en la literatura científica.

Tabla A.1 Descripción de las notaciones para el problema de programación de tareas

Notación	Descripción
Conway (Conway et al., 1967) A / B / C / D	A: se refiere a los trabajos o piezas a procesar. B: es el símbolo relativo a las máquinas, indica su número. Para indicar un número arbitrario se utiliza el símbolo m. C: Indica el tipo de flujo de las piezas en el taller: F: flujo regular P: flujo permutacional R: flujo aleatorio G: flujo general D: corresponde a la medida de eficiencia elegida para evaluar la calidad de los programas.
Graham (Graham et al., 1979) $\alpha\|\beta\|\gamma$	α: configuración del sistema de producción *1*, una sola máquina *P*, máquinas idénticas en paralelo Q, máquinas en paralelo con velocidades diferentes F, *Flow-shop*, máquinas en serie HF, *Flow-shop* híbrido, generalización del caso anterior, existen una serie de etapas, cada una formada por unas máquinas en paralelo FF, *Flow shop* flexible, representa un *flow shop* en que no todas las piezas tienen que ser procesadas en todas las etapas. Pueden existir más combinaciones, pero solo pueden ser de dos parámetros $\alpha = \alpha_1\alpha_2$(Graham et al., 1979) $\beta = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6\}$: restricciones y/o características propias a las tareas y el sistema. Originalmente esta notación tenía 6 campos posibles para β , sin embargo, varios autores han adicionado campos dejando 8 en total r_i fechas de disponibilidad de las piezas diferente de 0 $s_{h.i}$ tiempos de preparación dependientes de la secuencia *Preemtions* (prmp) Restricciones de precedencia (prec) Familias de trabajos (fmls) Procesamiento en batch (batch(b)) *Breakdowns* (brkdwn) Restricciones de elegibilidad de máquina (M_j) Permutación (prmu) Bloqueo (block) presente en ambientes *Flow shop* No esperas (nwt) Recirculación (rcrc) γ: función objetivo que se va a optimizar *Makespan* ($Cmax$): Tiempo de finalización del último trabajo Máximo retraso (L_{max}): mide el peor incumplimiento de las fechas de entrega $L_1, \dots, L_n$ Tiempo total ponderado de finalización: $\sum w_j C_j$ da un indicador del inventario que se tiene. Es también conocido como el tiempo ponderado de flujo Tardanza total ponderada: $\sum w_j T_j$ Número ponderado de trabajos tardíos: $\sum w_j U_j$
(Vignier et al., 1999) basada en (Graham et al., 1979) $\alpha\|\beta\|\gamma$	Estos autores proponen una notación basada en (Graham et al., 1979), pero desglosando el campo α en cuatro parámetros de la siguiente manera: $\alpha = \alpha_1\alpha_2(\alpha_3\alpha_4^{(1)}, \alpha_3\alpha_4^{(2)}, \dots, \alpha_3\alpha_4^{(\alpha_2)})$ Donde: α_1: es el parámetro α de la nomenclatura de (Graham et al., 1979), α_2: indica el número de etapas en un flow-shop

Notación	Descripción
	$\alpha_3 y \alpha_4$ se repiten para cada una de las α_2 etapas $\alpha_3^{(k)}$: indica el tipo de máquinas en la etapa *k*. Valdrá *0* si hay únicamente una máquina en la etapa, *P* si hay máquinas idénticas en paralelo, *Q* si las máquinas son proporcionales o *R* si hay máquinas en paralelo no relacionadas $\alpha_4^{(k)}$: indica el número de máquinas en la etapa *k*.
Bloch (Bloch & Manier, 1999) y (Manier & Bloch, 2003) $\alpha\|\beta\|\delta\|\gamma$	α: indica el tipo de sistema de HSP. β: indica el sistema físico, tiene 11 campos $\beta = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7, \beta_8, \beta_9, \beta_{10}, \beta_{11}\}$. δ: describe el ambiente de producción considerado, tiene seis campos $\delta = \{\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6\}$. γ: indica el criterio a ser optimizado.
Kendall (Kendall, 1953) 1/2/3/(4/5/6)	Un código que describe el proceso de llegada. Los códigos usados son: *M* para "Markoviano" (la tasa de llegadas sigue una distribución de Poisson), significando una distribución exponencial para los tiempos entre llegadas. *D* para unos tiempos entre llegadas "determinísticas". *G* para una "distribución general" de los tiempos entre llegadas, o del régimen de llegadas. Un código similar que representa el proceso de servicio (tiempo de servicio). Se usan los mismos símbolos. El número de canales de servicio (o servidores). La capacidad del sistema, o el número máximo de clientes permitidos en el sistema incluyendo esos en servicio. Cuando el número está al máximo, las llegadas siguientes son rechazadas. El orden de prioridad en la que los trabajos en la cola son servidos: First Come First Served (FCFS) o First In First Out (FIFO) Last Come First Served (LCFS) o Last In First Out (LIFO) Service In Random Order (SIRO) Processor Sharing Entre otros El tamaño del origen de las llamadas (población o fuente). El tamaño de la población desde donde los clientes vienen. Esto limita la tasa de llegadas.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo B Listado de referencias muestra final revisión de literatura toma de decisiones en la ciencia de los servicios

En este anexo se presenta el listado de referencias empleadas para la revisión de literatura en la toma de decisiones en la ciencia e ingeniería de los sistemas de servicios.

Tabla B.1 Listado de referencias y titulo

No.	Referencia	Título
1	(H Demirkan & Delen, 2013)	Leveraging the capabilities of service-oriented decision support systems: Putting analytics and big data in cloud
2	(Tukker, 2015)	Product services for a resource-efficient and circular economy - A review
3	(Ceschin, 2013)	Critical factors for implementing and diffusing sustainable product-Service systems: Insights from innovation studies and companies' experiences
4	(Lightfoot et al., 2013)	The servitization of manufacturing: A systematic literature review of interdependent trends
5	(Galvagno & Dalli, 2014)	Theory of value co-creation: A systematic literature review
6	(Smith et al., 2014)	Servitization and operations management: A service dominant-logic approach
7	(Talib, Rahman, & Qureshi, 2013)	An empirical investigation of relationship between total quality management practices and quality performance in Indian service companies
8	(Breidbach, Brodie, & Hollebeek, 2014)	Beyond virtuality: From engagement platforms to engagement ecosystems
9	(Selviaridis & Norrman, 2014)	Performance-based contracting in service supply chains: A service provider risk perspective
10	(Xing, Wang, & Qian, 2013)	A sustainability-oriented multi-dimensional value assessment model for product-service development
11	(Edvardsson, Meiren, Schäfer, & Witell, 2013)	Having a strategy for new service development - does it really matter?
12	(Joore & Brezet, 2015)	A Multilevel Design Model: The mutual relationship between product-service system development and societal change processes
13	(Kamvysi, Gotzamani, Andronikidis, & Georgiou, 2014)	Capturing and prioritizing students' requirements for course design by embedding Fuzzy-AHP and linear programming in QFD
14	(M.-H. Huang & Rust, 2013)	IT-Related Service: A Multidisciplinary Perspective
15	(Pan & Nguyen, 2015)	Achieving customer satisfaction through product-service systems
16	(Chiarini, 2014)	Strategies for developing an environmentally sustainable supply chain: Differences between manufacturing and service sectors
17	(Balka, Raasch, & Herstatt, 2014)	The effect of selective openness on value creation in user innovation communities
18	(Tsai, Yang, Chang, & Lee, 2014)	An Activity-Based Costing decision model for life cycle assessment in green building projects
19	(X. Wang & Durugbo, 2013)	Analysing network uncertainty for industrial product-service delivery: A hybrid fuzzy approach
20	(A. Y.-L. Chong & Zhou, 2014)	Demand chain management: Relationships between external antecedents, web-based integration and service innovation performance
21	(Ceschin, 2014)	How the design of socio-technical experiments can enable radical changes for sustainability
22	(Jin, Tian, & Xie, 2015)	A game-theoretical approach for optimizing maintenance, spares and service capacity in performance contracting

No.	Referencia	Título
23	(Reim et al., 2016)	Risk management for product-service system operation
24	(Khan, Artail, Malik, & Niazi, 2015)	Information technology adoption, possible challenges, and framework of supply chain management: A case study of a leading gulf economy
25	(Dean & Nair, 2014)	Mass-casualty triage: Distribution of victims to multiple hospitals using the SAVE model
26	(J. W. Wang, Wang, Zhang, Ip, & Furuta, 2014)	On a unified definition of the service system: What is its identity?
27	(Heo, Lee, Mattila, & Hu, 2013)	Restaurant revenue management: Do perceived capacity scarcity and price differences matter?
28	(Mourtzis, Fotia, & Doukas, 2015)	Performance indicators for the evaluation of product-service systems design: A review
29	(Durugbo, 2014)	Strategic framework for industrial product-service co-design: Findings from the microsystems industry
30	(Lepmets, Mesquida, Cater-Steel, Mas, & Ras, 2014)	The evaluation of the IT service quality measurement framework in industry
31	(Dong & Srinivasan, 2013)	Agent-enabled service-oriented decision support systems
32	(Lun, Lai, Wong, & Cheng, 2013)	Demand chain management in the container shipping service industry
33	(Marilungo, Peruzzini, & Germani, 2015)	An integrated method to support PSS design within the Virtual Enterprise
34	(Stary, 2014)	Non-disruptive knowledge and business processing in knowledge life cycles – Aligning value network analysis to process management
35	(Gallego, Rubalcaba, & Hipp, 2013)	Services and organisational innovation: the right mix for value creation
36	(De Carvalho, Ho, & Pinto, 2014)	The Six Sigma program: An empirical study of Brazilian companies
37	(Xu, Thong, & Venkatesh, 2014)	Effects of ICT service innovation and complementary strategies on brand equity and customer loyalty in a consumer technology market
38	(M. Pinedo et al., 2015)	Scheduling in the service industries: An overview
39	(Liao, Wang, Wang, & Tu, 2015)	Understanding the dynamics between organizational IT investment strategy and market performance: A system dynamics approach
40	(Poels, Van Der Vurst, & Lemey, 2013)	Towards an ontology and modeling approach for service science
41	(Wishon & Rene Villalobos, 2016)	Alleviating food disparities with mobile retailers: Dissecting the problem from an or perspective
42	(Marquès, Chalal, & Boucher, 2013)	PSS production systems: A simulation approach for change management
43	(B. Tan, Gershwin, Liberopoulos, Meerkov, & Papadopoulos, 2015)	Advances in stochastic models of manufacturing and service operations
44	(Singh, Grover, & Singh, 2017)	A benchmarking model for Indian service industries using MICMAC and WISM approach
45	(Rihm & Trautmann, 2017)	A decomposition heuristic for short-term planning of assessment centres
46	(von Bischhoffshausen, Hottum, & Schüritz, 2016)	Service science textbooks: Opportunities of an interdisciplinary approach
47	(Akada & Awamura, 2015)	Time and motion study for operation improvement in Ryokans
48	(M. Yuan, Shieh, Lu, & Lin, 2014)	The applications of industrial engineering in agriculture production management

No.	Referencia	Título
49	(Medina & Silva, 2014)	Industrial engineering from the vision of a portable automated model
50	(Yue, 2013)	Application of IE method in modern agro-ecological park planning
51	(Castillo-Salazar, Landa-Silva, & Qu, 2014)	Workforce scheduling and routing problems: literature survey and computational study
52	(Laporte, 2016)	Scheduling issues in vehicle routing
53	(Gutiérrez & Vidal, 2013)	Home health care logistics management problems: a critical review of models and methods
54	(Defraeye & Van Nieuwenhuyse, 2016)	Staffing and scheduling under nonstationary demand for service: A literature review
55	(Fikar & Hirsch, 2017)	Home health care routing and scheduling: A review
56	(Braekers, Ramaekers, et al., 2016)	The vehicle routing problem: State of the art classification and review
57	(Abbatecola, Fanti, & Ukovich, 2016)	A Review of New Approaches for Dynamic Vehicle Routing Problem
58	(Moons, Ramaekers, Caris, & Arda, 2017)	Integrating production scheduling and vehicle routing decisions at the operational decision level: A review and discussion
59	(Cissé et al., 2017)	OR problems related to Home Health Care: A review of relevant routing and scheduling problems
60	(Tarantilis, Paraskevopoulos, Laporte, Repoussis, & Tarantilis, 2016)	Resource constrained routing and scheduling: Review and research prospects
61	(C & Iyer, 2013)	Application of queueing theory in health care: A literature review
62	(A. Madureira et al., 2014)	Negotiation mechanism for self-organized scheduling system with collective intelligence
63	(H. Zhang, Tang, Huang, & Xu, 2016)	An agent based intelligent distributed control paradigm for manufacturing systems
64	(Vanberkel, Boucherie, Hans, & Hurink, 2013)	Optimizing the strategic patient mix combining queueing theory and dynamic programming
65	(E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018)	A hybrid expert system, clustering and ant colony optimization approach for scheduling and routing problem in courier services

Fuente: Elaboración propia.

Anexo C Listado completo de Fuentes y citaciones de Revisión de literatura toma de decisiones em ciencia de los servicios.

En este anexo se presenta el listado de fuentes para el nivel estratégico (Est), Tacitico (Tac) y Operativo (Ope). Se muestra el número de documentos en total y el número de documentos clasificados en cada categoría. En la última columna se presenta el número de citas total por cada revista.

Tabla C.1 Listado completo de Fuentes y citaciones

Fuente	#	Est	Tac	Ope	Citas
European Journal of Operational Research	5	3	3	1	81
Journal of Cleaner Production	3	3			283
International Journal of Production Economics	3	1	2	1	45
Annals of Operations Research	3		1	3	16
Computers and Industrial Engineering	3	1		3	46
International Journal of Operations and Production Management	3	2	1	1	146
Computers & Operations Research	2			2	26
Managing Service Quality	2	2			105
Lecture Notes in Business Information Processing	2	2	1	1	4
Decision Support Systems	2	2	1		204
Operations Research for Health Care	2		1	2	44
IFIP Advances in Information and Communication Technology	2	1	1	1	16
International Journal of Production Research	2	2			42
Journal of Knowledge Management	1	1	1		12
Global Journal of Flexible Systems Management	1	1	1		13
Journal of Service Research	1	1	1		24
IFAC-PapersOnLine	1			1	2
Procedia CIRP	1	1			12
European Journal of Industrial Engineering	1			1	
Journal of Product Innovation Management	1	1			21
IIE Annual Conference and Expo 2014	1	1			
Expert Systems with Applications	1		1		19
Information Systems Research	1	1			11
Omega	1			1	24
International Journal of Design	1	1			16
IEEE Systems Journal	1	1			14
International Journal of Hospitality Management	1		1		14
Journal of Manufacturing Technology Management	1	1			11
International Journal of Industrial Engineering Computations	1			1	0
Journal of Service Management	1	1			28
19th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management: Assistive Technology of Industrial Engineering	1	1			
Journal of Systems Science and Systems Engineering	1			1	8
Business Strategy and the Environment	1	1	1		22
Management Decision	1	1			12
Revista Facultad de Ingenieria	1	1	1	1	4
Neurocomputing	1			1	18
Supply Chain Management	1		1	1	29
IEEE International Conference on Automation Science and Engineering	1			1	1
International Journal of Systems Assurance Engineering and Management	1	1	1		
Proceedings of the 5th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation, IEMI 2014	1	1			
2014 4th International Conference on Engineering Technology and Technopreneuship, ICE2T 2014	1	1			14
Journal of Japan Industrial Management Association	1		1	1	
Computers in Industry	1	1	1		7
International Journal of Quality and Reliability Management	1	1	1		50
Total	65	39	23	25	1444

Fuente: Elaboración propia.

Anexo D Listado de Preguntas para las características en el CCSS

En este anexo se presenta el listado de las preguntas empleadas en el sistema de adquisición de conocimiento para el conjunto de características. Se presenta la característica, la pregunta y el rango de valores de salida para la respuesta del usuario.

Tabla D.1 Listado de preguntas empleadas para las características

Característica	No	Preguntas	Rangos
Presencia	1	¿Cada vez que usted realiza su actividad es necesaria la presencia del cliente?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Comportamiento	2	¿el comportamiento del cliente afecta su actividad?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Continuidad	3	¿el cliente puede alterar la continuidad en la prestación de su actividad?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Abandono	4	¿el cliente puede abandonar las instalaciones en cualquier instante, incluso durante la actividad?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Operación	5	¿el cliente puede por sí mismo desarrollar la actividad?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Autonomía	6	¿el cliente decide el resultado de la actividad?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Influencia	7	¿el cliente puede modificar el desarrollo de la actividad?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Almacenamiento	8	¿los resultados de la actividad se pueden almacenar?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Tiempo de almacenamiento	9	¿el tiempo de almacenamiento afecta la calidad del resultado de la actividad?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Anticipación	10	¿es posible anticiparse a la satisfacción de los requerimientos del cliente?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Tiempo de espera	11	¿es posible que el cliente pueda esperar para satisfacer su necesidad final?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Tiempo de espera Inicial	12	¿el cliente puede esperar por el inicio de la actividad?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Espacio	13	¿cuenta con espacio para almacenar los resultados de la actividad?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Costo de almacenamiento	14	¿el almacenar resultados de su actividad le genera un costo significativo?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Uso de máquinas/equipos	15	¿requiere de máquinas y/o equipos para el desarrollo de su actividad?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Uso de personas	16	¿requiere de personas para el desarrollo de la actividad?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Interacción	17	¿el cliente interactúa con alguna otra persona?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Beneficiario	18	¿su cliente es el usuario final del resultado?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Permiso	19	¿el cliente necesitaría de una autorización especial para recomercializar la actividad?	S,N
Comercialización	20	¿el cliente puede re-comercializar el resultado de la actividad?	S,N
Virtual	21	¿es necesaria la presencia física del cliente en su actividad?	S,N
Personalización	22	¿el cliente puede modificar las características del resultado de la actividad?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Apariencia	23	¿el resultado de la actividad es físico?	S,N
Productos complementarios	24	¿el cliente recibe algo adicional al resultado físico de la actividad?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Conocimiento	25	¿recibe conocimiento por el resultado de la actividad?	

Característica	No	Preguntas	Rangos
Consumo	26	¿la utilización del resultado de la actividad es simultánea al desarrollo de la misma?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Lugar	27	¿la actividad se desarrolla en sus instalaciones?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Programación de actividades	28	¿sus clientes deben reservar con anticipación para el desarrollo de la actividad?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Programación de recursos	29	¿sus recursos deben ser programados previamente?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Estandarización	30	¿tiene un estándar para el desarrolla de la actividad?	Nunca,Algunas veces,Siempre
Desplazamiento	31	¿Sus recursos se deben desplazar para el desarrollo de la actividad?	Nunca,Algunas veces,Siempre

Fuente: Elaboración propia.

Anexo E Base de conocimiento para los atributos, sector, sección y división del CCSS

Este anexo presenta la base de conocimiento de los 12 atributos, el sector, la sección, y la división para los 246 grupos del CIIU

Debido a tamaño de la tabla, este anexo se presenta de forma digital en la carpeta Anexos llamado **Anexo E**, y se puede consultar en el siguiente enlace:

https://www.dropbox.com/s/7nhgx113dmmjkxr/Anexo%20E.xlsx?dl=0

Anexo F Base de conocimiento para las 31 características del CCSS

Este anexo presenta la base de conocimiento de las 31 características, el sector, la sección, y la división para los 246 grupos del CIIU.

Debido a tamaño de la tabla, este anexo se presenta de forma digital en la carpeta Anexos llamado **Anexo F**, y se puede consultar en el siguiente enlace:

https://www.dropbox.com/s/yjcczhy0cf17758/Anexo%20F.xlsx?dl=0

Anexo G Resultados detallados para los atributos del sistema de adquisición de conocimiento

Este anexo presenta los resultados de los atributos en cuanto a la aplicación del modelo de optimización no lineal y el método ANFIS.

En cada una de las siguientes figuras se presenta, para cada atributo, primero el grafico correspondiente a el resultado obtenido para el modelo ANFIS y Optimización, comparándolo con los Datos de referencia para los 246 grupos del CIIU. Seguido a este gráfico, se presentan las superficies de respuesta de cada atributo con sus características asociadas, el cual indica el comportamiento del valor del atributo a los cambios de cada característica.

A continuación, se presentan los resultados del atributo naturaleza con sus dos características asociadas de apariencia y productos complementarios.

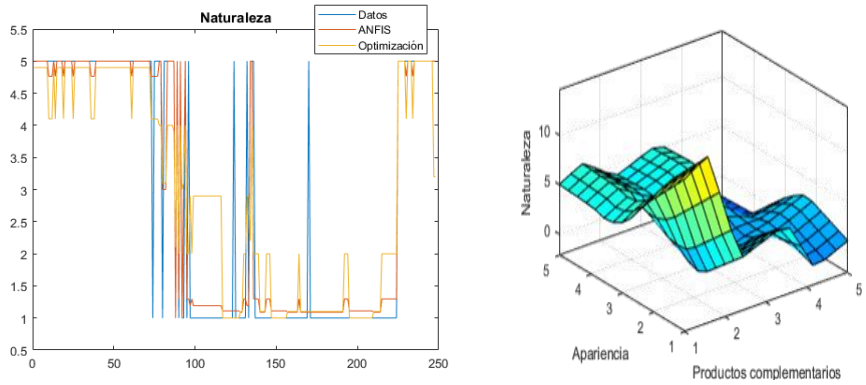


Figura G.1 Resultados Atributo 1: Naturaleza.
Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura se presentan los resultados de durabilidad con las características de consumo y tiempo de almacenamiento.

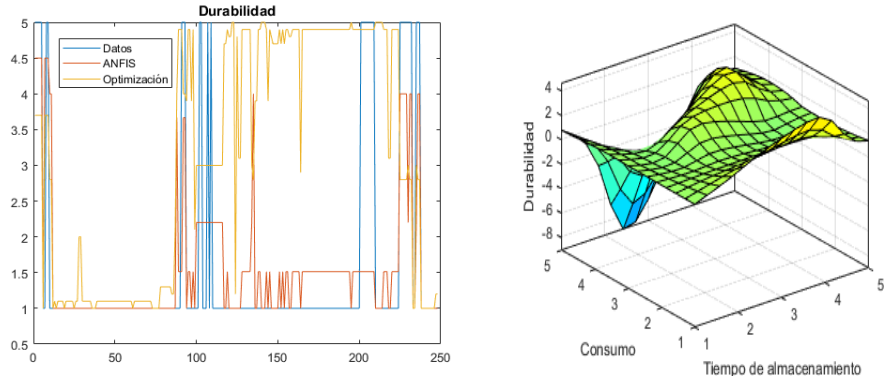


Figura G.2 Resultados Atributo 2: Durabilidad.
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los resultados del atributo coproducción con sus cuatro características relacionadas.

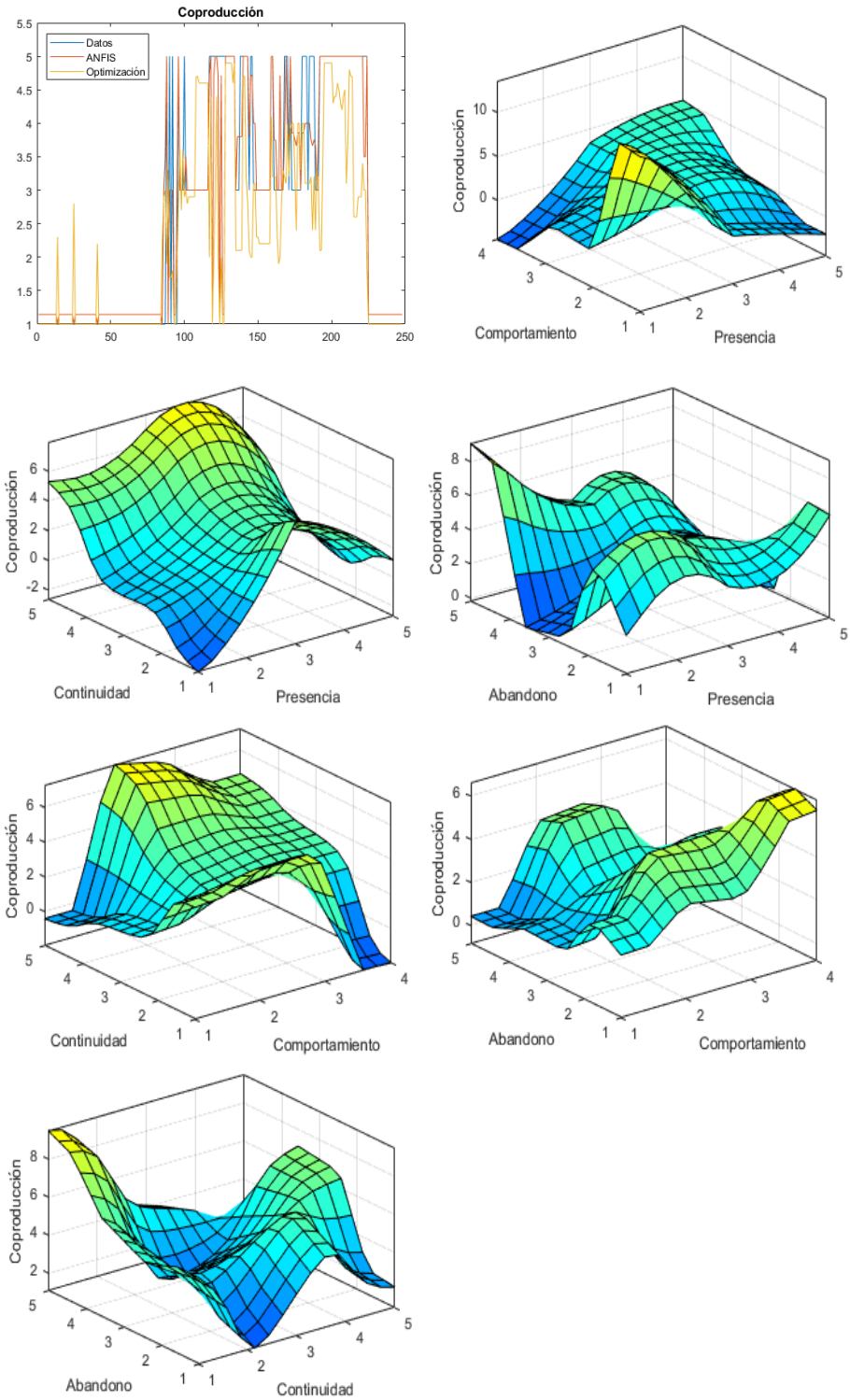


Figura G.3 Resultados Atributo 3: Coproducción.
Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura se presenta el atributo dependencia con las superficies de respuesta para sus características autonomía, operación e influencia.

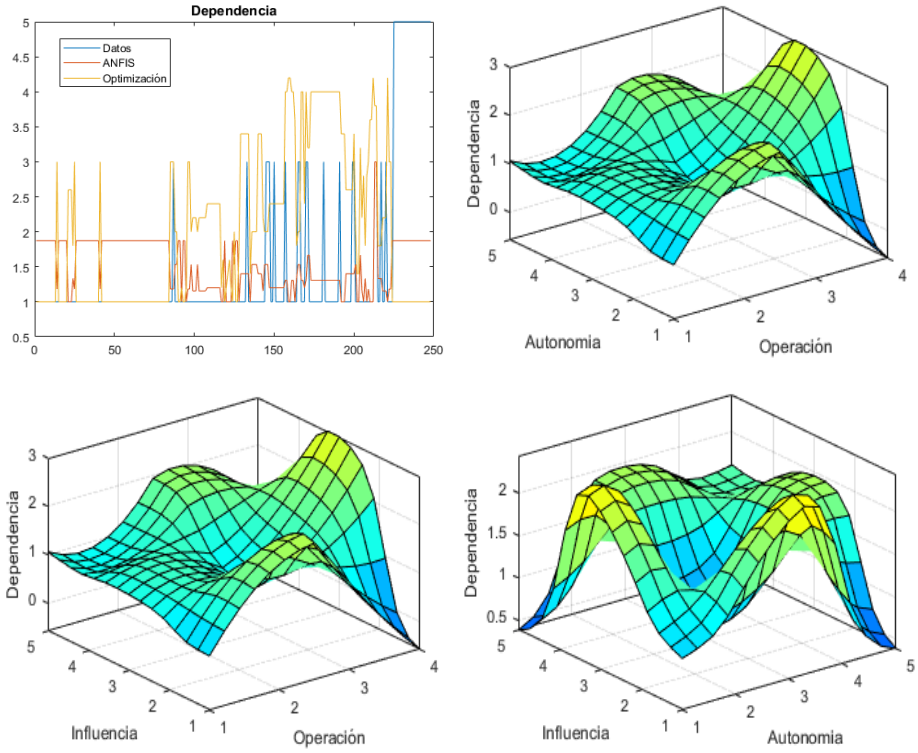


Figura G.4 Resultados Atributo 4: Dependencia.
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los resultados del atributo Lugar con sus características desplazamiento y lugar.

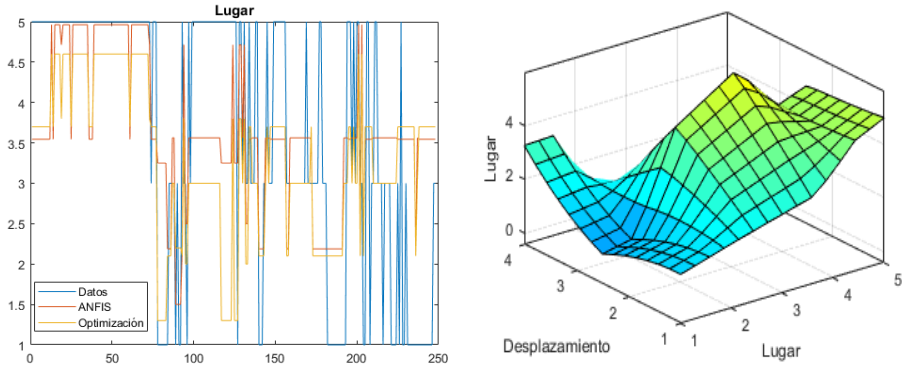


Figura G.5 Resultados Atributo 5: Lugar.
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el resultado del atributo agendado y sus dos características programación de actividades y de recursos.

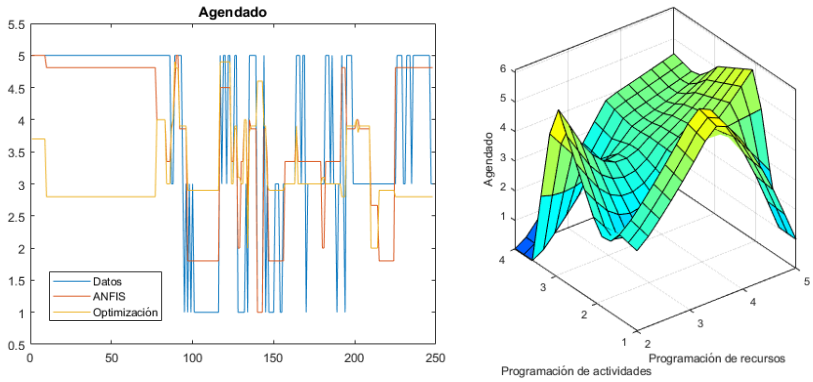


Figura G.6 Resultados Atributo 6: Agendado.
Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura se presentan los resultados del atributo tecnología y las superficies de respuesta para las combinaciones de sus características uso de máquinas/equipos, uso de personas e interacción.

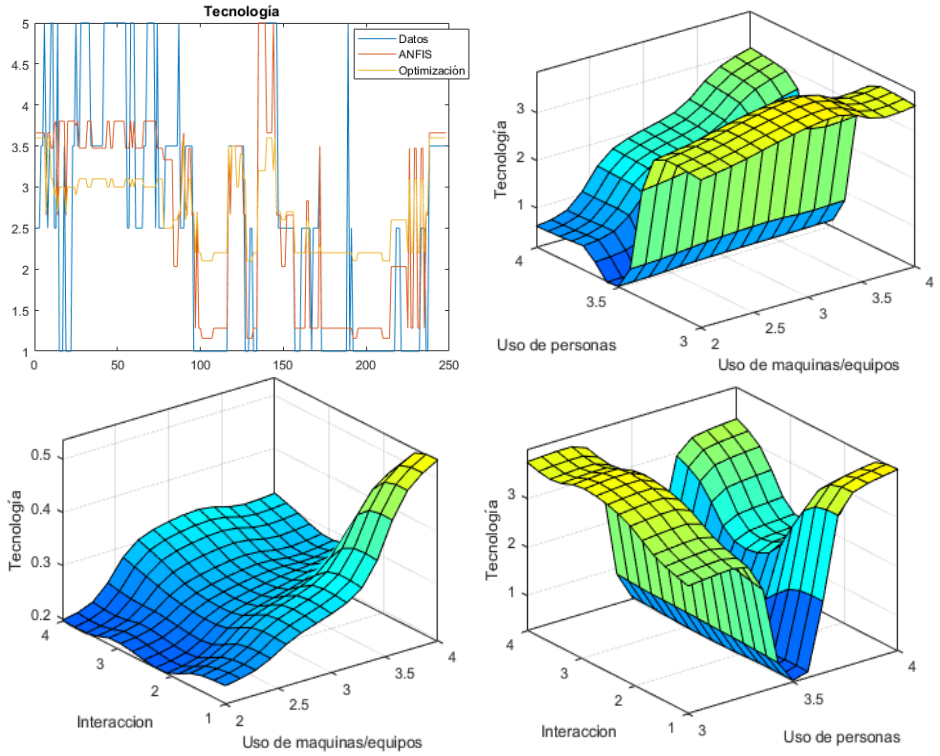


Figura G.7 Resultados Atributo 8: Tecnologia.
Fuente: Elaboración propia.

En las siguientes dos figuras se presentan los resultados del atributo Acumulación con las superficies de respuesta correspondientes a sus seis características asociadas.

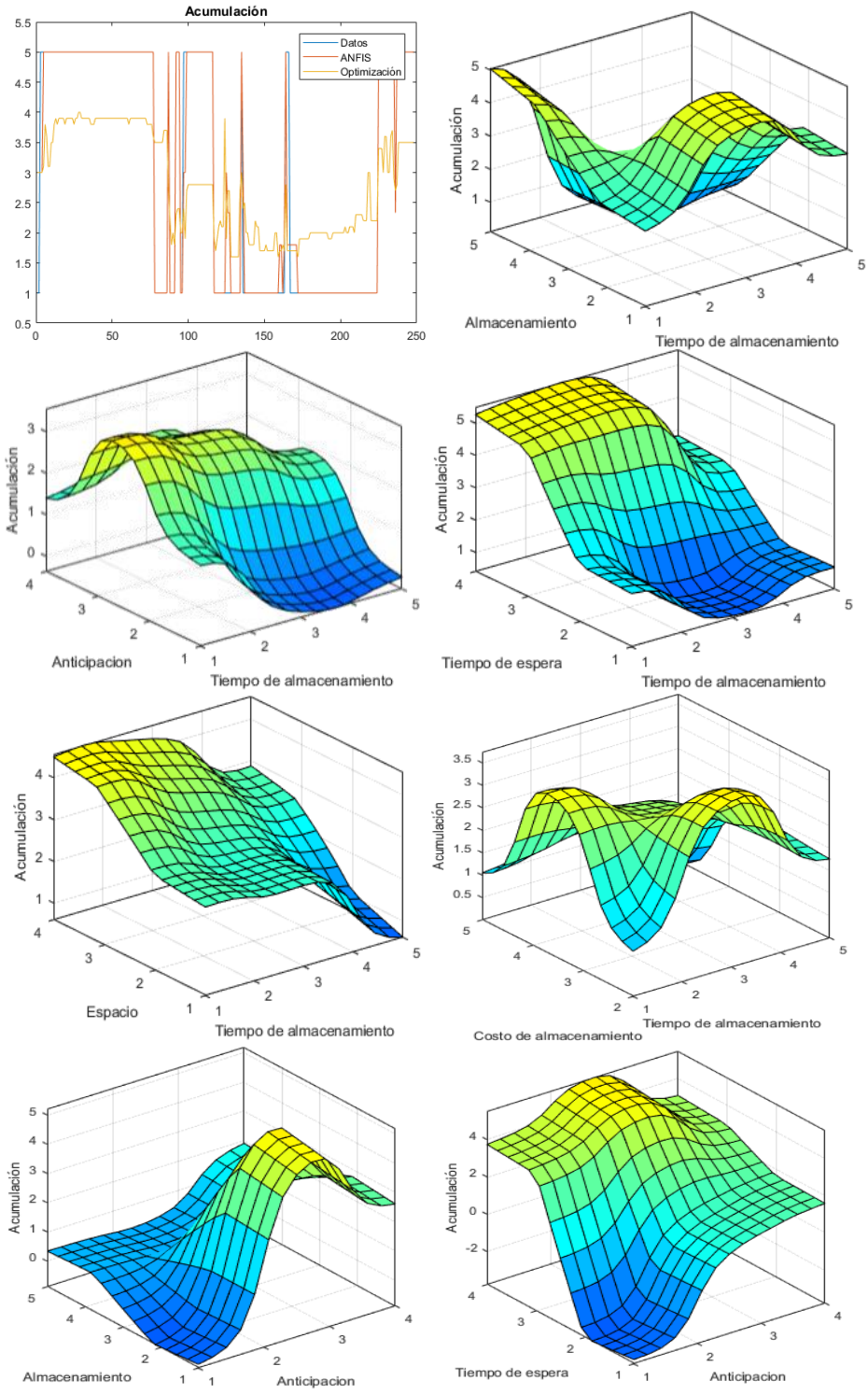


Figura G.8 (Parte 1)Resultados Atributo 7: Acumulación.
Fuente: Elaboración propia.

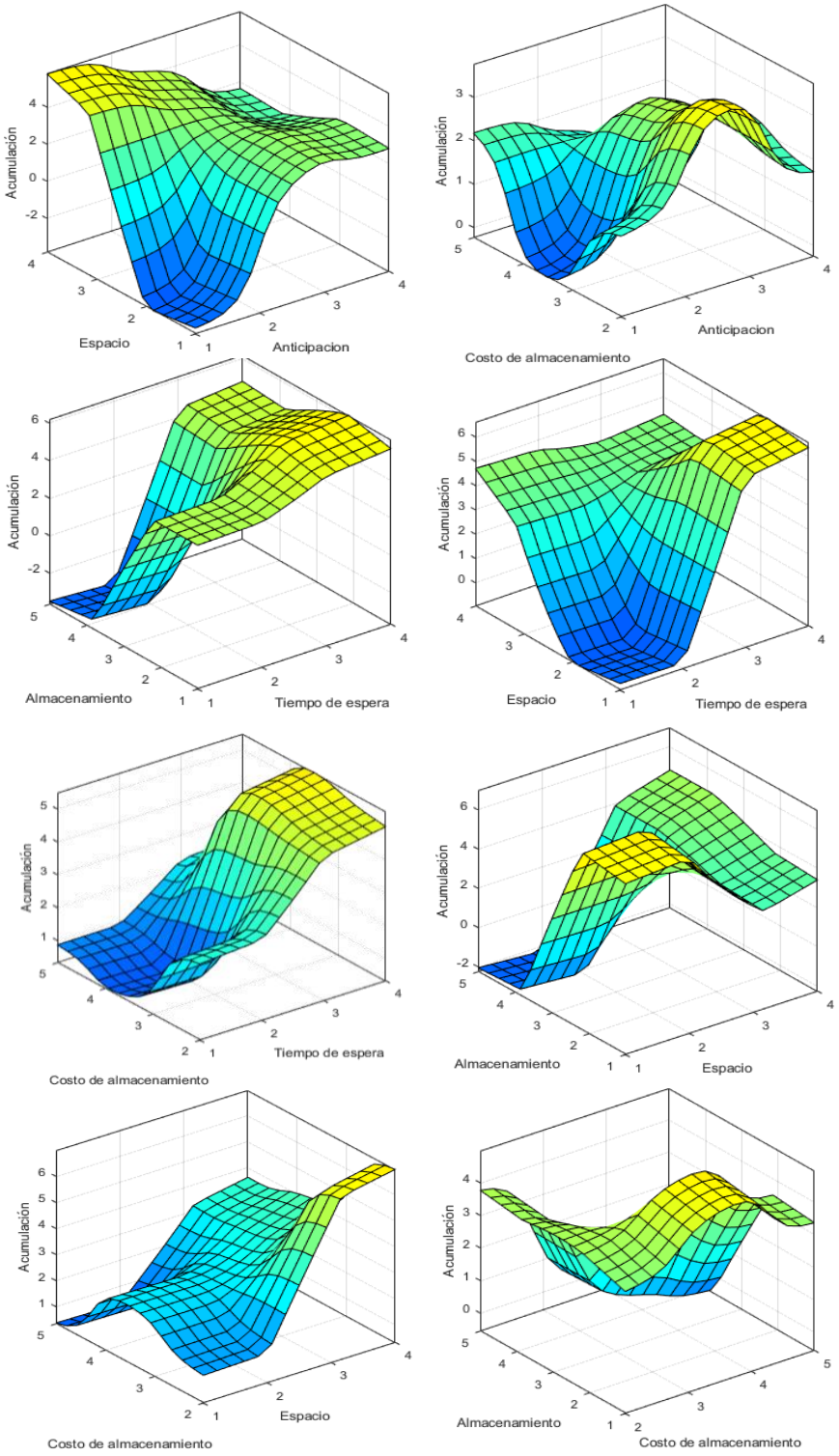


Figura G.8 (Parte 2)Resultados Atributo 7: Acumulación.
Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura se presentan los resultados del atributo propiedad con las superficies derivadas de las características permiso, beneficiario y comercialización.

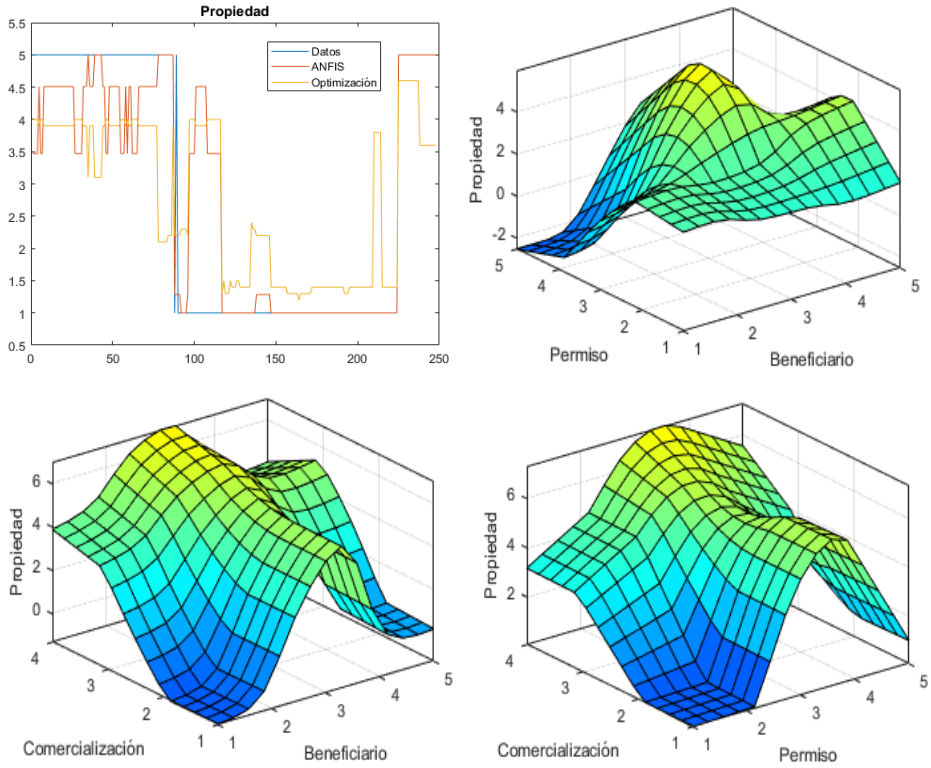


Figura G.9 Resultados Atributo 9: Propiedad
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra el resultado del atributo Simultaneidad y sus características continuidad y presencia.

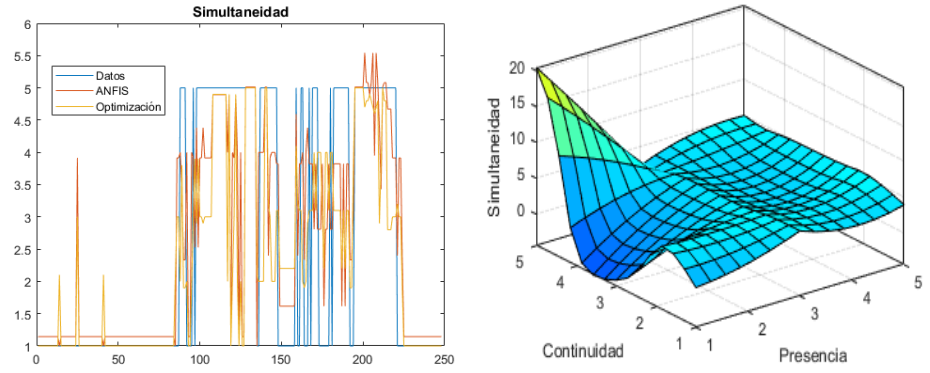


Figura G.10 Resultados Atributo 10: Simultaneidad
Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura se muestra el resultado del atributo estandarización y las superficies de respuesta de las características personalización, influencia, y estandarización.

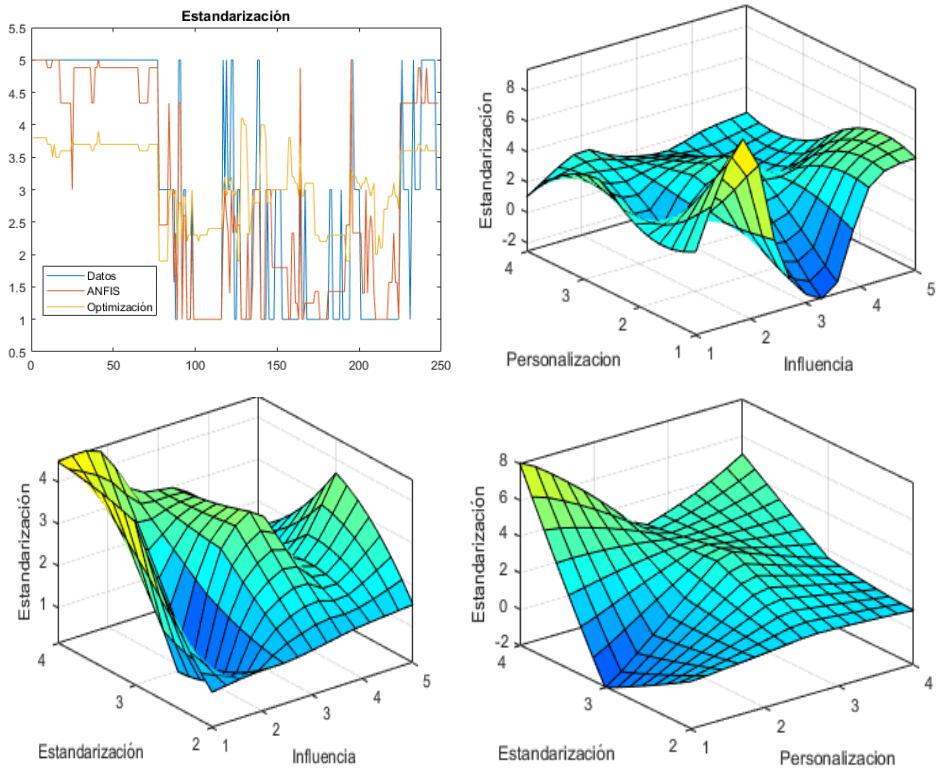


Figura G.11 Resultados Atributo 11: Estandarización
Fuente: Elaboración propia.

Por último, se presenta el resultado del atributo Flexibilidad y la superficie de respuesta de las características personalización e influencia.

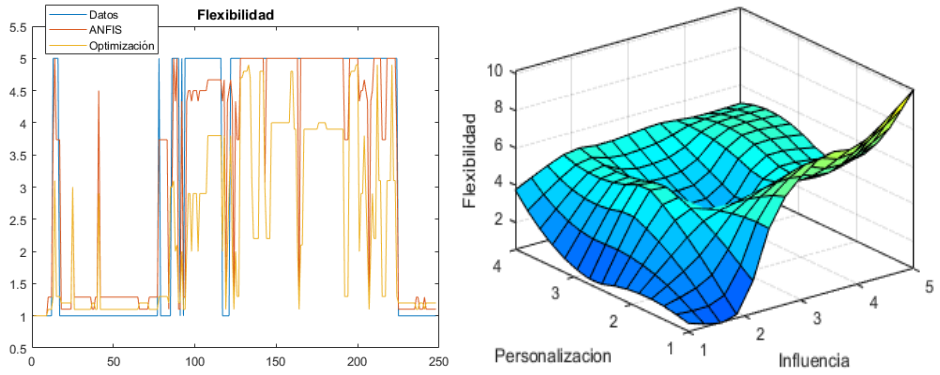


Figura G.12 Resultados Atributo 12: Flexibilidad
Fuente: Elaboración propia.

Anexo H Preguntas y variables del sistema de adquisición de conocimiento para el CPT

En este anexo se presentan las preguntas empleadas para cada variable en la base de conocimiento. A continuación, se presentan dos tablas con esta información, en la Tabla H.1 se presenta cada variable con su campo de la notación, con el componente (Comp.),el tipo de entrada, y el atributo o característica correspondiente. En la Tabla H.2 se presenta para cada variable la correspondiente pregunta, el número de salidas y sus opciones.

Tabla H.1 Relación de variables de la notación

Campo.	Comp.	Variable	Tipo	Atributo	Característica
CLIENTE	Trabajos	Número de Trabajos	Pregunta		
		Número de Tareas a realizar	Pregunta		
		Tipo de tarea	Atributo	Estandarización	
		Expectativa del cliente	Pregunta		
		Tipo de necesidad	Atributo	Naturaleza	
		Durabilidad	Atributo	Durabilidad	
		Demanda	Pregunta		
		Flexibilidad	Atributo	Dependencia	
		Tamaño de Población	Pregunta		
		Múltiples periodos	Pregunta		
		Requerimientos	Pregunta		
		Ventana de Tiempo	Pregunta		
		Agrupación	Pregunta		
		Distribución Geográfica	Característica		Desplazamiento
	Proceso de Llegada - Arribos	Tiempo de liberación	Característica		Anticipación
		Tiempo de Entrega	Pregunta		
		Naturaleza	Pregunta		
		Tiempo de llegada	Pregunta		
		Tamaño de Lote	Pregunta		
		Lugar de arribo	Pregunta		
		Precedencia	Pregunta		
		Disciplina	Pregunta		
RECURSOS	Fila - Cola	Capacidad Fila	Pregunta		
		Disciplina Fila	Pregunta		
		Incumplimiento	Pregunta		
		Abandono	Característica		Abandono
		Procesamiento en la fila	Pregunta		
	Servidores	Número	Pregunta		
		Tipo	Pregunta		
		Agrupación	Pregunta		
		Capacidad Servicio	Pregunta		
		Tiempo de proceso	Pregunta		
		Competencias	Pregunta		
		Recursos	Pregunta		
		Disponibilidad	Pregunta		
		Paradas	Pregunta		
		Tecnología	Característica		Uso de personas
		Ampliación de capacidad	Pregunta		
		Lugar	Pregunta		
		Lugar de origen	Pregunta		
	Atención-Salida	Calidad	Característica		Tiempo de espera
		Lugar-Destino	Pregunta		
		Disciplina	Pregunta		
CONTROL DEL FLUJO	Propiedad	Acceso	Atributo	Propiedad	
		Tiempo	Pregunta		
		Cantidad	Pregunta		

Campo.	Comp.	Variable	Tipo	Atributo	Característica
		Posibilidad rechazo /Sin Posibilidad de rechazo	Pregunta		
	Tipo de atención	Simultaneidad	Atributo	Simultaneidad	
		Agendado	Atributo	Agendado	
		Disciplina	Pregunta		
		Lotes	Pregunta		
		Personalización	Característica		Influencia
		Elegibilidad Maquinas	Característica		Influencia
		Consumo de recursos	Pregunta		
	Movimiento	Ruta	Atributo	Estandarización	
		Recirculación	Pregunta		
		No espera	Característica		Tiempo de espera
		Interrupción de actividades	Pregunta		
		Inventario	Atributo	Acumulación	
		Agrupación de tareas	Pregunta		
		Sincronización de tareas	Característica		Programación de recursos
		Sincronización de recursos	Pregunta		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla H.2 Relación de preguntas con variables de la notación

Variable	Pregunta	No. Salidas	Salidas
Número de Trabajos	Seleccione el rango del número de trabajos a realizar	2	1,Múltiples
Número de Tareas a realizar	¿Existen tareas a realizar por cada trabajo?	2	Si,No
Tipo de tarea	¿el tipo de trabajos es?	2	Estandar,Personalizada
Expectativa del cliente	Identifique la expectativa del cliente:	4	Calidad,Rapidez,Costo,Ninguna
Tipo de necesidad	Seleccione el aspecto físico de su producto/salida:	2	Tangible,Intangible
Durabilidad	¿Su producto es perecedero?	2	Si,No
Demanda	¿el resultado de esta actividad afecta otras actividades o procesos?	2	Si,No
Flexibilidad	¿el cliente posee autonomía en el desarrollo de la actividad?	2	Si,No
Tamaño de Población	Seleccione el tipo de mercado:	2	Finito,Infinito
Múltiples periodos	El horizonte de planeación para satisfacer su necesidad es:	2	Discreto,Único
Requerimientos	¿la tarea a realizar requiere una habilidad específica o un conjunto de ellas o ninguna?	3	Específica,Equipo,Ninguna
Ventana de Tiempo	Para la terminación/entrega de la tarea, usted requiere:	2	Rango de tiempo,Es indiferente
Agrupación	Es posible agrupar las tareas	2	Si,No
Distribución Geográfica	¿se desplaza el proveedor al lugar del cliente?	2	Si,No
Tiempo de liberación	¿debe esperar a la notificación del cliente para empezar a desarrollar la actividad?	2	Si,No
Tiempo de Entrega	Para la terminación/entrega de la tarea, usted requiere:	4	Fecha específica,Ventana de tiempo dura,Ventana de tiempo flexible,Ninguna
Naturaleza	¿Es posible que arriben nuevos trabajos o tareas al sistema?	2	No,Si
Tiempo de llegada	Los tiempos de llegada son:	2	Estocásticos,Detetminísticos
Tamaño de Lote	Las llegadas son:	3	Unitarias,Lotes,Masivas
Lugar de arribo	Los trabajos arriban a:	2	Lugar,Virtual

Variable	Pregunta	No. Salidas	Salidas
Precedencia	Existe relación de precedencia entre los trabajos	2	Si,No
Disciplina	La disciplina de llegada de los trabajos es:	4	Aleatoria,Constante,General,Ruteo
Capacidad Fila	¿El sistema tiene un máximo de clientes para recibir?	2	Si,No
Disciplina Fila	La disciplina en la fila de atención/espera es:	6	FIFO,LIFO,Aleatoria,Prioridades,Lotes,General
Incumplimiento	¿Es posible que el cliente no se presente?	2	Si,No
Abandono	¿el cliente puede abandonar la actividad?	2	Si,No
Procesamiento en la fila	¿Es posible realizar un procesamiento en la fila?	2	Si,No
Número	Seleccione el número de servidores/recursos:	2	Único,Múltiples
Tipo	Seleccione el tipo de recursos:	2	Homogeneo,Heterogéneo
Agrupación	Es posible agrupar los servidores para el procesamiento /atención:	2	Si,No
Capacidad Servicio	Seleccione el tipo de capacidad:	2	Constante,Variable
Tiempo de proceso	Los tiempos de proceso son:	2	Estocásticos,Detetminíst icos
Competencias	¿los recursos tienen competencias específicas?	2	Si,No
Recursos	El tipo de recursos es:	2	Renovable,No renovable
Disponibilidad	¿Posee turnos para el desarrollo de la actividad?	2	Si,No
Paradas	Tipos de Paradas de Mantenimiento:	3	Preventiva,Correctiva,Ninguna
Tecnología	¿su actividad la desarrollan principalmente personas?	2	Si,No
Ampliación de capacidad	Opciones para ampliación de Capacidad:	6	Subcontratación,Tiempo Extra,Re programación,Demanda Insatisfecha,Otra,Ninguna
Lugar	Seleccione el sitio donde el proveedor desarrollo la actividad:	3	Proveedor,Virtual,Cliente
Lugar de origen	La base del proveedor es:	2	Fija,Variable
Calidad	¿se puede aceptar entregas parciales?	2	No,Si
Lugar-Destino	¿Es un producto final?	2	No,Si
Disciplina	La disciplina en el proceso de atención es:	6	FIFO,LIFO,Aleatoria,Prioridades,Lotes,General
Acceso	¿se transfiere la propiedad al cliente?	2	Si,No
Tiempo	En caso de tener acceso a la propiedad: es de tiempo:	3	Limitada,Ilimitado,Sin acceso
Cantidad	En caso de tener acceso a la propiedad: es de uso:	3	Limitada,Ilimitado,Sin acceso
Posibilidad rechazo /Sin Posibilidad de rechazo	¿El cliente puede rechazar el producto?	2	Si,No
Simultaneidad	¿es necesaria la presencia del cliente para el desarrollo de la actividad?	2	Si,No
Agendado	¿se puede agendar el desarrollo de la actividad?	2	Si,No
Disciplina	La disciplina en el proceso de atención es:	6	FIFO,LIFO,Aleatoria,Prioridades,Lotes,General
Lotes	Seleccione el tipo de procesamiento:	3	Unitario,Lotes,Masivo
Personalización	¿el servicio recibido es personalizado?	2	No,Si

Variable	Pregunta	No. Salidas	Salidas
Elegibilidad Maquinas	¿es posible la selección del servidor para el cliente?	2	Si,No
Consumo de recursos	El tipo de recursos es:	2	Renovable,No renovable
Ruta	¿la ruta de procesamiento es Fija o Variable?	2	Fija,Variable
Recirculación	¿es posible reprocesar?	2	Si,No
No espera	¿el cliente puede esperar por el desarrollo de la actividad?	2	No,Si
Interrupción de actividades	¿es posible fraccionar el desarrollo de la actividad?	2	Si,No
Inventario	¿es posible acumular actividades pendientes?	2	Si,No
Agrupación de tareas	Seleccione el tipo de procesamiento en los servidores:	2	Clusteres,Ninguno
Sincronización de tareas	¿es necesaria la programación y sincronización de varios recursos?	2	Si,No
Sincronización de recursos	Es posible agrupar los servidores para el procesamiento /atención:	2	Si,No

Fuente: Elaboración propia.

Anexo I Base de conocimiento para el CPT

Este anexo presenta la base de conocimiento del CPT. Esta es una tabla de 13 columnas y 88.147 renglones. Las 13 columnas se describen a continuación:

- No: es un consecutivo del documento revisado.
- Año: referente a la publicación.
- Documento: título del documento.
- Campo0. Esta columna presenta de forma general los siguientes campos:
    - Data: correspondiente al tipo de información si es real o de instancias (benckmark).
    - Notation: este campo representa la notación propuesta para PTSS. Y tiene asociados en el Campo1 cada campo de la notación, en el Campo2 sus componentes y en Campo3 sus variables.
    - OTROS: presenta la relación de las técnicas de solución y sus intersecciones en cuanto a Optimización, Heurísticas, Metaheurísticas y Modelos estocásticos en el Campo 2. Y en el Campo3 se presentan las medidas de desempeño en cuanto a Cliente General, Multiple, Programación (Scheduling), Recursos, Ruteo (routing), y Scheduling-Routing.
    - PROBLEMS: en esta columna se asocian las áreas de problemas (en Campo2) y las sub-areas (en el Campo3).
    - Techniques: en esta columna se despliega la familia del grupo de técnicas (en el Campo2), y las técnicas específicas(en el Campo3).
    - Type of document: en este campo se relaciona si es Aplicación, formulación de problema o de revisión (en el Campo2).
- Campo1: aplica solo para la notación en cuanto a Cliente, Recurso, Control de Flujo y Medida de desempeño.
- Campo2: aplica según lo expuesto en el Campo0 y de forma jerárquica con Campo1.
- Campo3: aplica según lo expuesto en el Campo0 y de forma jerárquica con Campo1 y Campo2.
- Valor: esta columna indica la clasificación del documento según corresponda con Campo0, Campo1, Campo2 y Campo3. Puede tener el valor de "x" o "1".
- Tecnica_sol: esta columna sirve para clasificación en cuanto a Heurística, Metaheurísticas, Modelos Estocásticos y Optimización.
- Tipo_Prob_1: esta columna sirve para clasificación en cuanto a Rou, Sch&Rou y Sche.
- Tecnica_solv2: esta es una columna auxiliar en cuanto a la clasificación de la columna Tecnica_sol y las intersecciones entre ellas.
- MedidaDesempeño: esta columna sirve para la clasificación en cuanto al tipo de medida de desempeño: Cliente, Cliente-Recurso, General, Multiple, Programación (Scheduling), Recursos, Ruteo (routing), y Scheduling-Routing.
- File: presenta el nombre del archivo del documento con el fin de consultarlo.

Debido a tamaño de la tabla, este anexo se presenta de forma digital en la carpeta Anexos llamado **Anexo I**, y se puede consultar en el siguiente enlace:

https://www.dropbox.com/s/fh6d8410nmts9d8/Anexo%20I.xlsx?dl=0

Adicionalmente en la siguiente tabla se presenta la relación de los tipos de problemas considerados:

Tabla I.1 Relación de Tipos de problemas, Áreas y subáreas específicas.

Top	Áreas	Sub-Áreas
Scheduling	Programación (Scheduling)	Programación (Scheduling)
Routing	Enrutamiento (Routing)	Enrutamiento (Routing)
General	Programación de proyectos (Project scheduling)	Restricciones de precedencia y caminos críticos (Precedence Constraints and Critical Paths)
General	Programación de proyectos (Project scheduling)	Restricciones de recursos (Resource constraints)
General	Workforce sheduling (Workforce scheduling)	Programación de turno (Shift scheduling)
General	Workforce sheduling (Workforce scheduling)	Programación de la tripulación (Crew scheduling)
General	Workforce sheduling (Workforce scheduling)	Enrutamiento de la tripulación (Crew routing)
General	Asignación (Allocation)	Asignación (Allocation)
General	Asignación (Allocation)	Secuenciando (Sequencing)
General	Workforce sheduling (Workforce scheduling)	Programación de intervalos (Interval Scheduling)
General	Tienda de flujo (Flow shop)	Tienda de flujo (Flow shop)
General	Taller de trabajo (Job shop)	Taller de trabajo (Job shop)
General	Tienda abierta (Open shop)	Tienda abierta (Open shop)
Servicio	Hospitalidad y cuidado de la salud (Hospitality and health care)	Timetabling (Timetabling)
Servicio	Hospitalidad y cuidado de la salud (Hospitality and health care)	Reservas (Reservations)
Servicio	Hospitalidad y cuidado de la salud (Hospitality and health care)	Equipo (Appointments)
Servicio	Hospitalidad y cuidado de la salud (Hospitality and health care)	Servicios preventivos (Preventive services)
Servicio	Hospitalidad y cuidado de la salud (Hospitality and health care)	Salas de operaciones (Operations rooms)
Servicio	Hospitalidad y cuidado de la salud (Hospitality and health care)	Cuidado de salud en el hogar (Home health care)
Servicio	Hospitalidad y cuidado de la salud (Hospitality and health care)	Pacientes de admisión (Admission patients)
Servicio	Hospitalidad y cuidado de la salud (Hospitality and health care)	Servicio de Emergencias Médicas (Emergency medical service)
Servicio	Transporte (Transportation)	Programación de tránsito urbano (Urban transit scheduling)
Servicio	Transporte (Transportation)	Programación marítima (Maritime scheduling)
Servicio	Transporte (Transportation)	Programación de aviación (Aviation scheduling)
Servicio	Transporte (Transportation)	Programación de operaciones de emergencia (Emergency operations scheduling)
Servicio	Transporte (Transportation)	Train Timetabling (Train Timetabling)
Servicio	Transporte (Transportation)	Trenforma de Plata (Train Plataforming)
Servicio	Deportes profesionales y entretenimiento (Professional sports and entertainment)	Programación de torneos en deportes profesionales (Tournament scheduling in professional sports)
Servicio	Deportes profesionales y entretenimiento (Professional sports and entertainment)	Programación de transmisión de red (Network broadcast scheduling)
Servicio	Educación (Education)	Timetabling (Timetabling)
Servicio	Recogida y entrega (Pickup and delivery)	General (General)
Servicio	Recogida y entrega (Pickup and delivery)	Residuos (Waste)
Servicio	Recogida y entrega (Pickup and delivery)	Colegio (School)
Servicio	Recogida y entrega (Pickup and delivery)	Bienes (Goods)
Servicio	Recogida y entrega (Pickup and delivery)	Mensajería (Courier Services)

Top	Áreas	Sub-Áreas
Servicio	Recogida y entrega (Pickup and delivery)	Industria del automóvil (Automobile industry)
Servicio	Hospitalidad y cuidado de la salud (Hospitality and health care)	Medicamentos (Medicaments)
Servicio	Transporte (Transportation)	Refinería (Refinery)
Servicio	Transporte (Transportation)	Agencia de tránsito (Transit-agency)
Servicio	Programación de técnicos (Scheduling technicians)	General (General)
Servicio	Programación de técnicos (Scheduling technicians)	Mantenimiento (Maintenance)
Servicio	Programación de técnicos (Scheduling technicians)	Instalación (Installation)
Servicio	Programación de técnicos (Scheduling technicians)	Inspector de alimentos (Food inspector)
Servicio	Personal de seguridad (Security personnel)	Personal de seguridad (Security personnel)
Servicio	Asignación de personal (Manpower allocation)	General (General)
Servicio	Servicios financieros (Financial services)	Centros de llamadas (Call centers)
Servicio	Logística humanitaria (Humanitarian logistic)	Movilización y Evacuación (Mobilization and Evacuation)
General	Modelos de una sola máquina (Single Machine Models)	General (General)
General	Modelos de máquina paralela (Parallel Machine Models)	General (General)
Servicio	Informatica (Informatic)	Computación en la nube (Cloud Computing)
Servicio	Eléctrico (Electric)	General (General)
Servicio	Informática (Informatic)	Programación de red inalámbrica (Wireless network scheduling)
Servicio	Embalaje de stock (Packing stock)	General (General)
Servicio	Transporte (Transportation)	General (General)

Fuente: Elaboración propia.

Anexo J Base de conocimiento para el CPT: relación CIIU y área/sub-área de problemas

En este anexo se presenta la base de conocimiento empleada para el CPT en cuanto al área / sub-área de problemas y su relación con la clasificación de sistemas de servicios en cuanto a sector , sección y división.

Tabla J.1 Relación de la clasificación de CIIU y tipos de problemas

Sector	Sección	División	Tipo Problema Área	Tipo Sub-Área
Primario	SECCIÓN A	01	General	Todos
Primario	SECCIÓN A	02	General	Todos
Primario	SECCIÓN A	03	General	Todos
Primario	SECCIÓN B	05	General	Todos
Primario	SECCIÓN B	06	General	Todos
Primario	SECCIÓN B	07	General	Todos
Primario	SECCIÓN B	08	General	Todos
Primario	SECCIÓN B	09	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	10	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	11	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	12	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	13	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	14	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	15	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	16	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	17	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	18	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	19	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	20	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	21	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	22	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	23	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	24	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	25	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	26	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	27	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	28	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	29	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	30	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	31	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN C	32	General	Todos
Servicio	SECCIÓN C	33	Programación de técnicos (Scheduling technicians)	General (General)
Manufactura	SECCIÓN D	35	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN E	36	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN E	37	General	Todos
Manufactura	SECCIÓN E	38	Transporte (Transportation)	Todos
Servicio	SECCIÓN E	39	Todos	Asignación de personal (Manpower allocation)
Manufactura	SECCIÓN F	41	Programación de proyectos (Project scheduling)	Todos
Manufactura	SECCIÓN F	42	Programación de proyectos (Project scheduling)	Todos
Manufactura	SECCIÓN F	43	Programación de proyectos (Project scheduling)	Todos
Servicio	SECCIÓN G	45	Todos	Asignación de personal (Manpower allocation)
Servicio	SECCIÓN G	46	Todos	Asignación de personal (Manpower allocation)
Servicio	SECCIÓN G	47	Todos	Asignación de personal (Manpower allocation)
Servicio	SECCIÓN H	49	Transporte (Transportation)	Programación de tránsito urbano (Urban transit scheduling)

Sector	Sección	División	Tipo Problema Área	Tipo Sub-Área
Servicio	SECCIÓN H	50	Transporte (Transportation)	Programación marítima (Maritime scheduling)
Servicio	SECCIÓN H	51	Transporte (Transportation)	Programación de aviación (Aviation scheduling)
Servicio	SECCIÓN H	52	Todos	Asignación de personal (Manpower allocation)
Servicio	SECCIÓN H	53	Recogida y entrega (Pickup and delivery)	Mensajería (Courier Services)
Servicio	SECCIÓN I	55	Todos	Asignación (Allocation)
Servicio	SECCIÓN I	56	Todos	Asignación (Allocation)
Servicio	SECCIÓN J	58	Todos	Asignación (Allocation)
Manufactura	SECCIÓN J	59	Programación de proyectos (Project scheduling)	Todos
Servicio	SECCIÓN J	60	Todos	Asignación (Allocation)
Servicio	SECCIÓN J	61	Informatica (Informatic)	Programación de red inalámbrica (Wireless network scheduling)
Servicio	SECCIÓN J	62	Todos	Asignación (Allocation)
Servicio	SECCIÓN J	63	Todos	Asignación (Allocation)
Servicio	SECCIÓN K	64	Todos	Asignación (Allocation)
Servicio	SECCIÓN K	65	Todos	Asignación (Allocation)
Servicio	SECCIÓN K	66	Todos	Asignación (Allocation)
Servicio	SECCIÓN L	68	Todos	Asignación (Allocation)
Servicio	SECCIÓN M	69	Todos	Asignación (Allocation)
Servicio	SECCIÓN M	70	Todos	Asignación (Allocation)
Servicio	SECCIÓN M	71	Todos	Restricciones de recursos (Resource constraints)
Servicio	SECCIÓN M	72	Todos	Restricciones de recursos (Resource constraints)
Servicio	SECCIÓN M	73	Todos	Asignación (Allocation)
Servicio	SECCIÓN M	74	Todos	Asignación (Allocation)
Servicio	SECCIÓN M	75	Todos	Asignación (Allocation)
Servicio	SECCIÓN N	77	Todos	Asignación (Allocation)
Servicio	SECCIÓN N	78	Todos	Asignación (Allocation)
Servicio	SECCIÓN N	79	Todos	Asignación (Allocation)
Servicio	SECCIÓN N	80	Todos	Asignación de personal (Manpower allocation)
Servicio	SECCIÓN N	81	Todos	Asignación de personal (Manpower allocation)
Servicio	SECCIÓN N	82	Todos	Asignación de personal (Manpower allocation)
Servicio	SECCIÓN O	84	Todos	Asignación de personal (Manpower allocation)
Servicio	SECCIÓN P	85	Educación (Education)	Timetabling (Timetabling)
Servicio	SECCIÓN Q	86	Hospitalidad y cuidado de la salud (Hospitality and health care)	Todos
Servicio	SECCIÓN Q	87	Hospitalidad y cuidado de la salud (Hospitality and health care)	Cuidado de salud en el hogar (Home health care)
Servicio	SECCIÓN Q	88	Hospitalidad y cuidado de la salud (Hospitality and health care)	Todos
Servicio	SECCIÓN R	90	Deportes profesionales y entretenimiento (Professional sports and entertainment)	Todos
Servicio	SECCIÓN R	91	Todos	Asignación (Allocation)
Servicio	SECCIÓN R	92	Todos	Asignación (Allocation)
Servicio	SECCIÓN R	93	Todos	Asignación (Allocation)
Servicio	SECCIÓN S	94	Todos	Asignación (Allocation)
Servicio	SECCIÓN S	95	Programación de técnicos (Scheduling technicians)	Mantenimiento (Maintenance)

Sector	Sección	División	Tipo Problema Área	Tipo Sub-Área
Servicio	SECCIÓN S	96	Programación de técnicos (Scheduling technicians)	Asignación (Allocation)
Servicio	SECCIÓN T	97	General	Programación de turno (Shift scheduling)
Servicio	SECCIÓN T	98	General	Programación de turno (Shift scheduling)
Servicio	SECCIÓN U	99	Todos	Asignación (Allocation)

Fuente: Elaboración propia.

Anexo K Resultados de algoritmos de clasificación para el tipo de problema

Árbol de clasificación J48 para el tipo de problema en el CPT considerando la base de conocimiento parcial para el cliente.

```
CLI-Distribución Geográfica = G
|   CLI-Lugar de arribo = P
|   |   CLI-Tipo de necesidad = T
|   |   |   CLI-Expectativa del cliente = None
|   |   |   |   CLI-Ventana de Tiempo = None: Sch&Rou (13.0/3.0)
|   |   |   |   CLI-Ventana de Tiempo = [e,l]: Sch (2.0/1.0)
|   |   |   CLI-Expectativa del cliente = S: Rou (5.0/1.0)
|   |   |   CLI-Expectativa del cliente = Q: Sch&Rou (1.0)
|   |   |   CLI-Expectativa del cliente = C: Sch&Rou (0.0)
|   |   |   CLI-Expectativa del cliente = Q,S: Sch&Rou (2.0/1.0)
|   |   |   CLI-Expectativa del cliente = Q,S,C: Sch (1.0)
|   |   CLI-Tipo de necesidad = I
|   |   |   CLI-Expectativa del cliente = None
|   |   |   |   CLI-Flexibilidad = Ass
|   |   |   |   |   CLI-Agrupacion = None
|   |   |   |   |   |   CLI-Tamaño de Lote = B: Sch&Rou (2.0/1.0)
|   |   |   |   |   |   CLI-Tamaño de Lote = U
|   |   |   |   |   |   |   CLI-Multiples periodos = P: Rou (78.0/22.0)
|   |   |   |   |   |   |   CLI-Multiples periodos = NP
|   |   |   |   |   |   |   |   CLI-Tipo de tarea = S: Rou (18.0/7.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   CLI-Tipo de tarea = C: Sch&Rou (7.0/1.0)
|   |   |   |   |   |   CLI-Tamaño de Lote = M: Sch&Rou (4.0)
|   |   |   |   |   CLI-Agrupacion = C: Rou (10.0/4.0)
|   |   |   |   CLI-Flexibilidad = Au
|   |   |   |   |   CLI-Durabilidad = P: Sch (2.0/1.0)
|   |   |   |   |   CLI-Durabilidad = NP: Sch&Rou (4.0)
|   |   |   CLI-Expectativa del cliente = S
|   |   |   |   CLI-Precedencia = prec: Rou (3.0/1.0)
|   |   |   |   CLI-Precedencia = None
|   |   |   |   |   CLI-Ventana de Tiempo = None: Rou (3.0)
|   |   |   |   |   CLI-Ventana de Tiempo = [e,l]
|   |   |   |   |   |   CLI-Tamaño de Lote = B: Sch&Rou (0.0)
|   |   |   |   |   |   CLI-Tamaño de Lote = U
|   |   |   |   |   |   |   CLI-Disciplina = Rou
|   |   |   |   |   |   |   |   CLI-Nature = St: Rou (4.0/1.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   CLI-Nature = Dy: Sch&Rou (2.0)
|   |   |   |   |   |   |   CLI-Disciplina = G: Sch&Rou (4.0)
|   |   |   |   |   |   |   CLI-Disciplina = Rnd: Sch&Rou (0.0)
|   |   |   |   |   |   |   CLI-Disciplina = C: Sch&Rou (0.0)
|   |   |   |   |   |   CLI-Tamaño de Lote = M: Rou (2.0)
|   |   |   CLI-Expectativa del cliente = Q: Sch&Rou (14.0/6.0)
|   |   |   CLI-Expectativa del cliente = C: Sch&Rou (1.0)
|   |   |   CLI-Expectativa del cliente = Q,S: Sch&Rou (12.0/2.0)
|   |   |   CLI-Expectativa del cliente = Q,S,C: Rou (1.0)
|   |   CLI-Tipo de necesidad = I,T
|   |   |   CLI-Tiempo de liberación = None
|   |   |   |   CLI-Precedencia = prec: Sch&Rou (2.0)
|   |   |   |   CLI-Precedencia = None: Rou (7.0/1.0)
|   |   |   CLI-Tiempo de liberación = r_j: Sch&Rou (3.0/1.0)
|   CLI-Lugar de arribo = V
|   |   CLI-Tamaño de Lote = B
|   |   |   CLI-Tipo de tarea = S: Rou (2.0)
|   |   |   CLI-Tipo de tarea = C: Sch&Rou (2.0)
|   |   CLI-Tamaño de Lote = U: Sch&Rou (54.0/12.0)
|   |   CLI-Tamaño de Lote = M: Sch (3.0/1.0)
CLI-Distribución Geográfica = NG: Sch (232.0/27.0)

Size of the tree :      57
```

Árbol de clasificación REPTree para el tipo de problema en el CPT considerando la base de conocimiento parcial respecto a recurso.

```
REC-Lugar = C
|   REC-Recursos = Ren
|   |   REC-Competencias = None
|   |   |   REC-Tecnologia = A : Rou (14/6) [12/3]
|   |   |   REC-Tecnologia = M : Sch&Rou (36/9) [16/3]
|   |   |   REC-Tecnologia = M,A : Rou (2/0) [3/2]
|   |   REC-Competencias = k_hi : Sch&Rou (13/3) [6/1]
|   REC-Recursos = Nren
|   |   REC-Tecnologia = A : Rou (21/7) [12/2]
|   |   REC-Tecnologia = M
|   |   |   REC-Capacidad Servicio = C
|   |   |   |   REC-Disciplina Fila = B : Sch&Rou (0/0) [0/0]
|   |   |   |   REC-Disciplina Fila = G : Sch&Rou (14/8) [4/1]
|   |   |   |   REC-Disciplina Fila = P : Sch&Rou (2/2) [2/0]
|   |   |   |   REC-Disciplina Fila = FIFO : Sch&Rou (0/0) [0/0]
|   |   |   |   REC-Disciplina Fila = Rnd : Sch&Rou (0/0) [0/0]
|   |   |   |   REC-Disciplina Fila = LIFO : Sch&Rou (0/0) [0/0]
|   |   |   REC-Capacidad Servicio = V : Sche (3/1) [0/0]
|   |   REC-Tecnologia = M,A : Sche (4/1) [4/3]
REC-Lugar = P : Sche (207/80) [102/37]
REC-Lugar = V : Sche (17/1) [6/0]

Size of the tree : 22
```

Árbol de clasificación J48 para el tipo de problema en el CPT considerando la base de conocimiento parcial respecto a control de flujo.

```
CON-Ruta = F: Sche (219.0/54.0)
CON-Ruta = V
|   CON-Agendado = Y
|   |   CON-Simultaneidad = Off
|   |   |   CON-Disciplina = G
|   |   |   |   CON-Acceso = N
|   |   |   |   |   CON-Sincronización de tareas = Y
|   |   |   |   |   |   CON-Agrupacion de tareas = None
|   |   |   |   |   |   |   CON-Lotes = B
|   |   |   |   |   |   |   |   CON-Sincronización de recursos = None: Rou (2.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   CON-Sincronización de recursos = Teaming: Sch&Rou (5.0)
|   |   |   |   |   |   |   CON-Lotes = U
|   |   |   |   |   |   |   |   CON-Personalizacion = S: Rou (51.0/14.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   CON-Personalizacion = C
|   |   |   |   |   |   |   |   |   CON-Inventario = N
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   CON-Sincronización de recursos = None: Sch&Rou (11.0/5.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   CON-Sincronización de recursos = Teaming: Rou (8.0/2.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   |   CON-Inventario = Y: Sch&Rou (4.0/1.0)
|   |   |   |   |   |   |   CON-Lotes = M: Sche (2.0/1.0)
|   |   |   |   |   |   CON-Agrupacion de tareas = C: Sch&Rou (14.0/5.0)
|   |   |   |   |   CON-Sincronización de tareas = N
|   |   |   |   |   |   CON-Inventario = N
|   |   |   |   |   |   |   CON-Consumo de recursos = Ren: Rou (6.0/3.0)
|   |   |   |   |   |   |   CON-Consumo de recursos = NRen: Sche (6.0/1.0)
|   |   |   |   |   |   CON-Inventario = Y: Sch&Rou (2.0)
|   |   |   |   CON-Acceso = Y
|   |   |   |   |   CON-Lotes = B: Sch&Rou (2.0)
|   |   |   |   |   CON-Lotes = U
|   |   |   |   |   |   CON-Sincronización de recursos = None: Sche (4.0/1.0)
|   |   |   |   |   |   CON-Sincronización de recursos = Teaming
|   |   |   |   |   |   |   CON-Consumo de recursos = Ren: Sch&Rou (3.0/1.0)
|   |   |   |   |   |   |   CON-Consumo de recursos = NRen: Sche (9.0/4.0)
|   |   |   |   |   CON-Lotes = M: Sche (0.0)
```

```
|   |   |   CON-Disciplina = FIFO: Sche (1.0)
|   |   |   CON-Disciplina = P
|   |   |   |   CON-Personalizacion = S: Rou (3.0/1.0)
|   |   |   |   CON-Personalizacion = C: Sche (4.0/2.0)
|   |   |   CON-Disciplina = Rnd: Rou (0.0)
|   |   |   CON-Disciplina = LIFO: Sche&Rou (1.0)
|   |   |   CON-Disciplina = B: Sche&Rou (1.0)
|   |   CON-Simultaneidad = On
|   |   |   CON-Cantidad = None: Sche&Rou (84.0/29.0)
|   |   |   CON-Cantidad = UnL: Sche&Rou (3.0/1.0)
|   |   |   CON-Cantidad = L
|   |   |   |   CON-Sincronización de tareas = Y: Sche (4.0/1.0)
|   |   |   |   CON-Sincronización de tareas = N: Rou (2.0)
|   CON-Agendado = N
|   |   CON-Consumo de recursos = Ren: Sche (32.0/13.0)
|   |   CON-Consumo de recursos = NRen
|   |   |   CON-Personalizacion = S: Rou (15.0/4.0)
|   |   |   CON-Personalizacion = C: Sche (2.0)

Size of the tree :      52
```

Árbol de clasificación REPTree para el tipo de problema en el CPT considerando la base de conocimiento completa.

```
CLI-Distribución Geográfica = G
|   CLI-Expectativa del cliente = None
|   |   REC-Tecnologia = A
|   |   |   CLI-Tipo de necesidad = T : Sche&Rou (11/3) [4/2]
|   |   |   CLI-Tipo de necesidad = I : Rou (47/12) [32/8]
|   |   |   CLI-Tipo de necesidad = I,T : Sche&Rou (1/0) [0/0]
|   |   REC-Tecnologia = M
|   |   |   REC-Disciplina = B : Sche&Rou (0/0) [0/0]
|   |   |   REC-Disciplina = G
|   |   |   |   CLI-Multiples periodos = P
|   |   |   |   |   CLI-Tipo de tarea = S : Sche&Rou (16/1) [8/2]
|   |   |   |   |   CLI-Tipo de tarea = C
|   |   |   |   |   |   CLI-Tiempo de Entrega = None : Rou (2/0) [4/2]
|   |   |   |   |   |   CLI-Tiempo de Entrega = H : Sche&Rou (3/1) [3/0]
|   |   |   |   |   |   CLI-Tiempo de Entrega = S : Sche&Rou (5/2) [1/0]
|   |   |   |   |   |   CLI-Tiempo de Entrega = H,S : Sche&Rou (2/1) [1/1]
|   |   |   |   |   |   CLI-Tiempo de Entrega = d_j : Sche&Rou (0/0) [0/0]
|   |   |   |   CLI-Multiples periodos = NP : Sche&Rou (15/0) [6/2]
|   |   |   REC-Disciplina = P : Sche&Rou (4/1) [3/0]
|   |   |   REC-Disciplina = FIFO : Sche (1/0) [1/1]
|   |   |   REC-Disciplina = Rnd : Sche&Rou (0/0) [0/0]
|   |   |   REC-Disciplina = LIFO : Sche&Rou (0/0) [0/0]
|   |   REC-Tecnologia = M,A : Rou (9/4) [6/1]
|   CLI-Expectativa del cliente = S : Rou (21/9) [5/3]
|   CLI-Expectativa del cliente = Q : Sche&Rou (17/8) [8/1]
|   CLI-Expectativa del cliente = C : Sche&Rou (2/1) [0/0]
|   CLI-Expectativa del cliente = Q,S : Sche&Rou (17/8) [7/2]
|   CLI-Expectativa del cliente = Q,S,C
|   |   CLI-Tipo de tarea = S : Rou (2/0) [1/0]
|   |   CLI-Tipo de tarea = C : Sche (2/0) [1/1]
CLI-Distribución Geográfica = NG : Sche (156/19) [76/8]

Size of the tree : 32
```

Anexo L Resultados de algoritmos de clasificación para el número de criterios

Árbol de clasificación J48 para el número de criterios en el CPT considerando la base de conocimiento parcial respecto a cliente.

```
CLI-Número de Trabajos = n
|  CLI-Expectativa del cliente = None
|  |  CLI-Disciplina = Rou
|  |  |  CLI-Tamaño de Población = F: multi (7.0/2.0)
|  |  |  CLI-Tamaño de Población = I: 1 (2.0)
|  |  CLI-Disciplina = G
|  |  |  CLI-Lugar de arribo = P
|  |  |  |  CLI-Tipo de necesidad = T
|  |  |  |  |  CLI-Ventana de Tiempo = None: 1 (47.0/13.0)
|  |  |  |  |  CLI-Ventana de Tiempo = [e,l]
|  |  |  |  |  |  CLI-Flexibilidad = Ass
|  |  |  |  |  |  |  CLI-Nature = St: 1 (14.0/4.0)
|  |  |  |  |  |  |  CLI-Nature = Dy: multi (3.0)
|  |  |  |  |  |  CLI-Flexibilidad = Au: multi (4.0/1.0)
|  |  |  |  CLI-Tipo de necesidad = I
|  |  |  |  |  CLI-Tamaño de Lote = B
|  |  |  |  |  |  Problema = Sche&Rou: multi (3.0)
|  |  |  |  |  |  Problema = Sche: multi (2.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  Problema = Rou: 1 (3.0)
|  |  |  |  |  CLI-Tamaño de Lote = U
|  |  |  |  |  |  CLI-Tiempo de liberación = None
|  |  |  |  |  |  |  CLI-Requerimientos = S
|  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tiempo de Entrega = None
|  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Agrupacion = None: 1 (4.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Agrupacion = C
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tipo de tarea = S: multi (4.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tipo de tarea = C: 1 (4.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tiempo de Entrega = H: multi (2.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tiempo de Entrega = S: multi (0.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tiempo de Entrega = H,S: multi (5.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tiempo de Entrega = d_j: multi (0.0)
|  |  |  |  |  |  |  CLI-Requerimientos = None
|  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Multiples periodos = P
|  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tiempo de Entrega = None
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Precedencia = prec: 1 (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Precedencia = None
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  Problema = Sche&Rou: multi (8.0/2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  Problema = Sche
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Durabilidad = P
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tiempo de llegada = D: multi (7.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tiempo de llegada = S
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tamaño de Población = F: 1 (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tamaño de Población = I: multi (3.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Durabilidad = NP: 1 (11.0/3.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  Problema = Rou: 1 (28.0/9.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tiempo de Entrega = H: 1 (13.0/5.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tiempo de Entrega = S: 1 (6.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tiempo de Entrega = H,S
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Precedencia = prec: multi (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Precedencia = None
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tamaño de Población = F: 1 (8.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tamaño de Población = I
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Durabilidad = P: 1 (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Durabilidad = NP: multi (4.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tiempo de Entrega = d_j: multi (1.0)
|  |  |  |  |  |  |  CLI-Multiples periodos = NP: 1 (24.0/4.0)
|  |  |  |  |  |  |  CLI-Requerimientos = T
|  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tamaño de Población = F
|  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Nature = St: 1 (10.0/3.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Nature = Dy: multi (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tamaño de Población = I: multi (3.0)
|  |  |  |  |  |  CLI-Tiempo de liberación = r_j
|  |  |  |  |  |  |  CLI-Durabilidad = P
|  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tiempo de llegada = D
```

```
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   CLI-Precedencia = prec: 1 (5.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   CLI-Precedencia = None
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   CLI-Distribución Geográfica = G: 1 (2.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   CLI-Distribución Geográfica = NG: multi (2.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   |   CLI-Tiempo de llegada = S: multi (2.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   CLI-Durabilidad = NP: 1 (11.0)
|   |   |   |   |   |   CLI-Tamaño de Lote = M: multi (8.0/2.0)
|   |   |   |   |   CLI-Tipo de necesidad = I,T: multi (11.0/4.0)
|   |   |   |   CLI-Lugar de arribo = V
|   |   |   |   |   CLI-Tipo de necesidad = T: multi (2.0)
|   |   |   |   |   CLI-Tipo de necesidad = I: 1 (59.0/11.0)
|   |   |   |   |   CLI-Tipo de necesidad = I,T: multi (2.0)
|   |   CLI-Disciplina = Rnd: multi (3.0)
|   |   CLI-Disciplina = C: multi (4.0/1.0)
|   CLI-Expectativa del cliente = S
|   |   CLI-Lugar de arribo = P: 1 (42.0/6.0)
|   |   CLI-Lugar de arribo = V: multi (7.0/1.0)
|   CLI-Expectativa del cliente = Q
|   |   CLI-Nature = St
|   |   |   CLI-Tipo de necesidad = T: 1 (7.0)
|   |   |   CLI-Tipo de necesidad = I: multi (20.0/5.0)
|   |   |   CLI-Tipo de necesidad = I,T: multi (2.0/1.0)
|   |   CLI-Nature = Dy: 1 (18.0/3.0)
|   CLI-Expectativa del cliente = C: multi (3.0)
|   CLI-Expectativa del cliente = Q,S
|   |   CLI-Flexibilidad = Ass
|   |   |   CLI-Agrupacion = None
|   |   |   |   CLI-Tiempo de liberación = None
|   |   |   |   |   CLI-Tamaño de Población = F
|   |   |   |   |   |   CLI-Tiempo de llegada = D: 1 (13.0/4.0)
|   |   |   |   |   |   CLI-Tiempo de llegada = S: multi (2.0)
|   |   |   |   |   CLI-Tamaño de Población = I: multi (3.0)
|   |   |   |   CLI-Tiempo de liberación = r_j: 1 (7.0/1.0)
|   |   |   CLI-Agrupacion = C: multi (7.0/1.0)
|   |   CLI-Flexibilidad = Au: 1 (2.0)
|   CLI-Expectativa del cliente = Q,S,C
|   |   CLI-Número de Tareas a realizar = None: 1 (2.0)
|   |   CLI-Número de Tareas a realizar = n_j: multi (4.0/1.0)
CLI-Número de Trabajos = 1
|   Problema = Sch&Rou: multi (0.0)
|   Problema = Sche: multi (7.0/1.0)
|   Problema = Rou: 1 (3.0)

Number of Leaves  :     64

Size of the tree :      107
```

Árbol de clasificación J48 para el Número de criterios en el CPT considerando la base de conocimiento parcial respecto a recurso.

```
REC-Procesamiento en la fila = None
|   REC-Disciplina = B: multi (2.0/1.0)
|   REC-Disciplina = G
|   |   REC-Recursos = Ren: 1 (309.0/102.0)
|   |   REC-Recursos = Nren
|   |   |   REC-Paradas = None
|   |   |   |   REC-Tipo = Het
|   |   |   |   |   REC-Lugar = C: multi (18.0/3.0)
|   |   |   |   |   REC-Lugar = P
|   |   |   |   |   |   Problema = Sch&Rou: multi (3.0/1.0)
|   |   |   |   |   |   Problema = Sche
|   |   |   |   |   |   |   REC-Agrupación = None: multi (24.0/8.0)
|   |   |   |   |   |   |   REC-Agrupación = Teaming: 1 (2.0)
|   |   |   |   |   |   Problema = Rou: 1 (5.0/1.0)
|   |   |   |   |   REC-Lugar = V: multi (0.0)
|   |   |   |   REC-Tipo = Hom
|   |   |   |   |   REC-Agrupación = None
|   |   |   |   |   |   REC-Capacidad Servicio = C: 1 (56.0/16.0)
```

```
|   |   |   |   |   |   REC-Capacidad Servicio = V
|   |   |   |   |   |   |   REC-Lugar = C: multi (6.0/1.0)
|   |   |   |   |   |   |   REC-Lugar = P: 1 (2.0)
|   |   |   |   |   |   |   REC-Lugar = V: multi (0.0)
|   |   |   |   |   |   REC-Agrupación = Teaming: multi (4.0/1.0)
|   |   |   REC-Paradas = Prev: 1 (7.0/1.0)
|   |   |   REC-Paradas = Cor: 1 (3.0/1.0)
|   REC-Disciplina = P
|   |   REC-Número = m
|   |   |   REC-Tecnologia = A: 1 (9.0/1.0)
|   |   |   REC-Tecnologia = M
|   |   |   |   REC-Recursos = Ren
|   |   |   |   |   REC-Disponibilidad = None: multi (2.0)
|   |   |   |   |   REC-Disponibilidad = S: 1 (13.0/2.0)
|   |   |   |   REC-Recursos = Nren: multi (3.0)
|   |   |   REC-Tecnologia = M,A: multi (8.0/2.0)
|   |   REC-Número = 1: multi (2.0)
|   REC-Disciplina = FIFO
|   |   REC-Ampliacion de capacidad = U-D: 1 (1.0)
|   |   REC-Ampliacion de capacidad = R-Sch: multi (2.0/1.0)
|   |   REC-Ampliacion de capacidad = Ove: multi (3.0)
|   |   REC-Ampliacion de capacidad = None: 1 (6.0)
|   |   REC-Ampliacion de capacidad = Out: 1 (0.0)
|   |   REC-Ampliacion de capacidad = Oth: 1 (0.0)
|   REC-Disciplina = Rnd: multi (3.0/1.0)
|   REC-Disciplina = LIFO: multi (2.0)
REC-Procesamiento en la fila = P: multi (5.0/1.0)

Number of Leaves  :   30

Size of the tree :      46
```

Árbol de clasificación J48 para el número de criterios en el CPT considerando la base de conocimiento parcial respecto a control de flujo.

```
CON-Sincronización de recursos = None
|   CON-Disciplina = G
|   |   CON-Personalizacion = S: 1 (185.0/54.0)
|   |   CON-Personalizacion = C
|   |   |   CON-Cantidad = None
|   |   |   |   CON-Sincronización de tareas = Y
|   |   |   |   |   Problema = Sch&Rou: 1 (17.0/7.0)
|   |   |   |   |   Problema = Sche: 1 (30.0/6.0)
|   |   |   |   |   Problema = Rou
|   |   |   |   |   |   CON-Agendado = Y: 1 (7.0/2.0)
|   |   |   |   |   |   CON-Agendado = N: multi (4.0)
|   |   |   |   CON-Sincronización de tareas = N: multi (9.0/2.0)
|   |   |   CON-Cantidad = UnL: 1 (4.0)
|   |   |   CON-Cantidad = L
|   |   |   |   CON-Sincronización de tareas = Y: multi (3.0)
|   |   |   |   CON-Sincronización de tareas = N: 1 (2.0)
|   CON-Disciplina = FIFO: 1 (8.0/1.0)
|   CON-Disciplina = P
|   |   CON-Consumo de recursos = Ren: 1 (31.0/10.0)
|   |   CON-Consumo de recursos = NRen
|   |   |   CON-Agrupacion de tareas = None: multi (8.0/1.0)
|   |   |   CON-Agrupacion de tareas = C: 1 (2.0)
|   CON-Disciplina = Rnd: multi (2.0/1.0)
|   CON-Disciplina = LIFO: multi (1.0)
|   CON-Disciplina = B: multi (1.0)
CON-Sincronización de recursos = Teaming
|   Problema = Sch&Rou
|   |   CON-Agendado = Y
|   |   |   CON-Recirculacion = N
|   |   |   |   CON-Elegibilidad Maquinas = None
|   |   |   |   |   CON-Agrupacion de tareas = None
|   |   |   |   |   |   CON-Ruta = F: 1 (4.0/1.0)
```

```
|  |  |  |  |  |  |  CON-Ruta = V
|  |  |  |  |  |  |  |  CON-Sincronización de tareas = Y
|  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Simultaneidad = Off: multi (15.0/4.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Simultaneidad = On
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Consumo de recursos = Ren: multi (6.0/2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Consumo de recursos = NRen: 1 (3.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  CON-Sincronización de tareas = N: 1 (2.0)
|  |  |  |  |  |  CON-Agrupacion de tareas = C: 1 (4.0)
|  |  |  |  |  CON-Elegibilidad Maquinas = M: multi (2.0)
|  |  |  |  CON-Recirculacion = Y: multi (8.0/1.0)
|  |  |  CON-Agendado = N: multi (2.0)
|  |  Problema = Sche
|  |  |  CON-Elegibilidad Maquinas = None
|  |  |  |  CON-Consumo de recursos = Ren
|  |  |  |  |  CON-Cantidad = None
|  |  |  |  |  |  CON-Inventario = N
|  |  |  |  |  |  |  CON-Sincronización de tareas = Y: 1 (24.0/6.0)
|  |  |  |  |  |  |  CON-Sincronización de tareas = N
|  |  |  |  |  |  |  |  CON-Ruta = F
|  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Disciplina = G: 1 (7.0/2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Disciplina = FIFO: multi (3.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Disciplina = P: multi (1.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Disciplina = Rnd: 1 (0.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Disciplina = LIFO: 1 (0.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Disciplina = B: 1 (0.0)
|  |  |  |  |  |  |  CON-Ruta = V: multi (2.0)
|  |  |  |  |  |  CON-Inventario = Y: multi (3.0/1.0)
|  |  |  |  |  CON-Cantidad = UnL
|  |  |  |  |  |  CON-Personalizacion = S: multi (9.0/2.0)
|  |  |  |  |  |  CON-Personalizacion = C: 1 (5.0)
|  |  |  |  |  CON-Cantidad = L: multi (1.0)
|  |  |  |  CON-Consumo de recursos = NRen
|  |  |  |  |  CON-Disciplina = G
|  |  |  |  |  |  CON-Ruta = F
|  |  |  |  |  |  |  CON-Personalizacion = S
|  |  |  |  |  |  |  |  CON-Agrupacion de tareas = None: 1 (9.0/2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  CON-Agrupacion de tareas = C: multi (4.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  CON-Personalizacion = C
|  |  |  |  |  |  |  |  CON-Acceso = N: multi (8.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  CON-Acceso = Y: 1 (2.0)
|  |  |  |  |  |  CON-Ruta = V: multi (11.0)
|  |  |  |  |  CON-Disciplina = FIFO: multi (0.0)
|  |  |  |  |  CON-Disciplina = P: 1 (2.0)
|  |  |  |  |  CON-Disciplina = Rnd: multi (0.0)
|  |  |  |  |  CON-Disciplina = LIFO: multi (0.0)
|  |  |  |  |  CON-Disciplina = B: multi (0.0)
|  |  |  CON-Elegibilidad Maquinas = M: 1 (4.0)
|  |  Problema = Rou: 1 (45.0/13.0)

Number of Leaves  :     49

Size of the tree :      81
```

Árbol de clasificación J48 para el número de criterios en el CPT considerando la base de conocimiento completa.

```
REC-Procesamiento en la fila = None
|  CLI-Número de Trabajos = n
|  |  CON-No espera = None
|  |  |  REC-Ampliacion de capacidad = U-D
|  |  |  |  CLI-Tipo de tarea = S: multi (6.0)
|  |  |  |  CLI-Tipo de tarea = C: 1 (3.0)
|  |  |  REC-Ampliacion de capacidad = R-Sch
|  |  |  |  REC-Capacidad Servicio = C
|  |  |  |  |  CON-Recirculacion = N: 1 (29.0/4.0)
|  |  |  |  |  CON-Recirculacion = Y: multi (6.0/2.0)
|  |  |  |  REC-Capacidad Servicio = V: multi (4.0/1.0)
|  |  |  REC-Ampliacion de capacidad = Ove
|  |  |  |  CLI-Número de Tareas a realizar = None
```

```
|  |  |  |  |  REC-Número = m
|  |  |  |  |  |  CLI-Agrupacion = None
|  |  |  |  |  |  |  CON-Inventario = N
|  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tamaño de Población = F
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Ventana de Tiempo = None: 1 (4.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Ventana de Tiempo = [e,l]
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Nature = St: multi (3.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Nature = Dy: 1 (3.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tamaño de Población = I: multi (6.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  CON-Inventario = Y: multi (2.0)
|  |  |  |  |  |  CLI-Agrupacion = C: multi (3.0)
|  |  |  |  |  REC-Número = 1: 1 (2.0)
|  |  |  |  CLI-Número de Tareas a realizar = n_j: 1 (3.0)
|  |  |  REC-Ampliacion de capacidad = None
|  |  |  |  REC-Disciplina = B: 1 (1.0)
|  |  |  |  REC-Disciplina = G
|  |  |  |  |  CON-Disciplina = G
|  |  |  |  |  |  REC-Capacidad Fila = F
|  |  |  |  |  |  |  REC-Tipo = Het
|  |  |  |  |  |  |  |  REC-Incumplimiento = None
|  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Agendado = Y
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Recursos = Ren
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Lotes = B
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Multiples periodos = P: 1 (10.0/3.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Multiples periodos = NP: multi (4.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Lotes = U
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Inventario = N
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Demanda = I
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Ruta = F: 1 (24.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Ruta = V
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Multiples periodos = P
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Durabilidad = P
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tamaño de Población = F: 1 (7.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tamaño de Población = I: multi (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Durabilidad = NP: 1 (11.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Multiples periodos = NP
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Nature = St: 1 (3.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Nature = Dy: multi (4.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Demanda = D
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Tecnologia = A: multi (3.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Tecnologia = M: 1 (3.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Tecnologia = M,A: multi (0.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Inventario = Y: multi (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Lotes = M: multi (3.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Recursos = Nren
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Consumo de recursos = Ren: multi (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Consumo de recursos = NRen
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Número de Tareas a realizar = None
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Paradas = None
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Multiples periodos = P: multi (18.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Multiples periodos = NP
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Distribución Geográfica = G: multi (6.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Distribución Geográfica = NG: 1 (4.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Paradas = Prev: 1 (3.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Paradas = Cor: 1 (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Número de Tareas a realizar = n_j: 1 (8.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Agendado = N
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Agrupación = None
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tiempo de llegada = D
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Acceso = N
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Simultaneidad = Off: multi (7.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Simultaneidad = On: 1 (4.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Acceso = Y: multi (3.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tiempo de llegada = S: multi (10.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Agrupación = Teaming: 1 (5.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Incumplimiento = No-show: multi (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  REC-Tipo = Hom
|  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Cantidad = None
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Paradas = None
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Simultaneidad = Off
```

```
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Multiples periodos = P
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Sincronización de recursos = None: 1 (40.0/12.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Sincronización de recursos = Teaming
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Agrupacion = None
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tamaño de Población = F
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Distribución Geográfica = G: multi (10.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Distribución Geográfica = NG
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Lugar-Destino = Rout: 1 (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Lugar-Destino = Exi: multi (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tamaño de Población = I
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Durabilidad = P: multi (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Durabilidad = NP: 1 (6.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Agrupacion = C: 1 (3.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Multiples periodos = NP: 1 (21.0/2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Simultaneidad = On
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Inventario = N: 1 (66.0/8.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CON-Inventario = Y
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Lugar = C: 1 (3.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Lugar = P: multi (3.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Lugar = V: multi (0.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Paradas = Prev
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tipo de tarea = S: 1 (3.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tipo de tarea = C: multi (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Paradas = Cor: multi (1.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  CON-Cantidad = UnL
|  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Recursos = Ren
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Demanda = I
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tipo de necesidad = T: 1 (4.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tipo de necesidad = I: 1 (4.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Tipo de necesidad = I,T: multi (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Demanda = D: multi (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Recursos = Nren: multi (3.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  CON-Cantidad = L: 1 (4.0)
|  |  |  |  |  |  |  REC-Capacidad Fila = I: 1 (8.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  CON-Disciplina = FIFO: multi (3.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  CON-Disciplina = P
|  |  |  |  |  |  |  REC-Disponibilidad = None
|  |  |  |  |  |  |  |  REC-Tipo = Het
|  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Durabilidad = P: 1 (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  CLI-Durabilidad = NP: multi (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  REC-Tipo = Hom: multi (3.0)
|  |  |  |  |  |  |  REC-Disponibilidad = S: 1 (4.0)
|  |  |  |  |  |  CON-Disciplina = Rnd: 1 (0.0)
|  |  |  |  |  |  CON-Disciplina = LIFO: 1 (0.0)
|  |  |  |  |  |  CON-Disciplina = B: 1 (0.0)
|  |  |  |  |  REC-Disciplina = P
|  |  |  |  |  |  CLI-Lugar de arribo = P
|  |  |  |  |  |  |  CLI-Tiempo de liberación = None: multi (9.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  CLI-Tiempo de liberación = r_j: 1 (3.0)
|  |  |  |  |  |  CLI-Lugar de arribo = V: 1 (9.0/1.0)
|  |  |  |  |  REC-Disciplina = FIFO: 1 (5.0)
|  |  |  |  |  REC-Disciplina = Rnd: multi (2.0)
|  |  |  |  |  REC-Disciplina = LIFO: multi (2.0)
|  |  |  |  REC-Ampliacion de capacidad = Out
|  |  |  |  |  CLI-Nature = St: 1 (6.0)
|  |  |  |  |  CLI-Nature = Dy: multi (3.0/1.0)
|  |  |  |  REC-Ampliacion de capacidad = Oth: 1 (4.0)
|  |  |  CON-No espera = N-w
|  |  |  |  REC-Número = m
|  |  |  |  |  CLI-Tamaño de Población = F: 1 (4.0/1.0)
|  |  |  |  |  CLI-Tamaño de Población = I: multi (6.0/2.0)
|  |  |  |  REC-Número = 1: multi (2.0)
|  |  CLI-Número de Trabajos = 1
|  |  |  REC-Tiempo de proceso = D: 1 (3.0)
|  |  |  REC-Tiempo de proceso = S: multi (7.0/1.0)
REC-Procesamiento en la fila = P: multi (5.0/1.0)

Number of Leaves :     85

Size of the tree :          150
```

Anexo M Resultados de algoritmos de clasificación para el tipo de criterios

Árbol de clasificación REPTree para el tipo de criterio en el CPT considerando la base de conocimiento parcial respecto a cliente.

```
Problema = Sch&Rou
|   CLI-Tiempo de Entrega = None : Scheduling-Routing (30/15) [14/6]
|   CLI-Tiempo de Entrega = H : General (28/12) [14/5]
|   CLI-Tiempo de Entrega = S : Scheduling-Routing (14/7) [13/9]
|   CLI-Tiempo de Entrega = H,S : Scheduling-Routing (15/6) [6/3]
|   CLI-Tiempo de Entrega = d_j
|   |   CLI-Tipo de tarea = S : Scheduling-Routing (3/0) [0/0]
|   |   CLI-Tipo de tarea = C : General (2/1) [1/0]
Problema = Sch
|   CLI-Expectativa del cliente = None
|   |   CLI-Tiempo de Entrega = None : Programación (Scheduling) (69/43) [26/11]
|   |   CLI-Tiempo de Entrega = H
|   |   |   CLI-Tipo de necesidad = T : Cliente-Recurso (7/3) [1/1]
|   |   |   CLI-Tipo de necesidad = I
|   |   |   |   CLI-Requerimientos = S : Scheduling-Routing (1/0) [0/0]
|   |   |   |   CLI-Requerimientos = None : General (6/4) [4/1]
|   |   |   |   CLI-Requerimientos = T : Recursos (5/3) [0/0]
|   |   |   CLI-Tipo de necesidad = I,T : Programación (Scheduling) (1/0) [1/1]
|   |   CLI-Tiempo de Entrega = S : General (3/2) [5/2]
|   |   CLI-Tiempo de Entrega = H,S : General (16/10) [5/3]
|   |   CLI-Tiempo de Entrega = d_j : Programación (Scheduling) (6/3) [5/2]
|   CLI-Expectativa del cliente = S
|   |   CLI-Tiempo de llegada = D : General (13/2) [4/4]
|   |   CLI-Tiempo de llegada = S : Cliente-Recurso (6/3) [2/1]
|   CLI-Expectativa del cliente = Q
|   |   CLI-Requerimientos = S : Cliente-Recurso (3/0) [4/2]
|   |   CLI-Requerimientos = None
|   |   |   CLI-Tipo de tarea = S : Cliente-Recurso (3/0) [0/0]
|   |   |   CLI-Tipo de tarea = C : General (2/1) [2/0]
|   |   CLI-Requerimientos = T : General (8/2) [5/1]
|   CLI-Expectativa del cliente = C : General (3/0) [1/0]
|   CLI-Expectativa del cliente = Q,S : General (7/1) [4/0]
|   CLI-Expectativa del cliente = Q,S,C : General (2/1) [1/0]
Problema = Rou
|   CLI-Expectativa del cliente = None : Ruteo (routing) (62/39) [37/22]
|   CLI-Expectativa del cliente = S : General (5/2) [9/2]
|   CLI-Expectativa del cliente = Q : General (2/2) [2/1]
|   CLI-Expectativa del cliente = C : General (0/0) [0/0]
|   CLI-Expectativa del cliente = Q,S : General (8/4) [1/1]
|   CLI-Expectativa del cliente = Q,S,C : General (3/0) [0/0]

Size of the tree : 41
```

Árbol de clasificación J48 para el tipo de criterio en el CPT considerando la base de conocimiento parcial respecto a recurso.

```
Problema = Sch&Rou
|   REC-Disciplina Fila = B: General (1.0)
|   REC-Disciplina Fila = G
|   |   REC-Ampliacion de capacidad = U-D: Scheduling-Routing (2.0)
|   |   REC-Ampliacion de capacidad = R-Sch
|   |   |   REC-Lugar-Destino = Rout: General (4.0/2.0)
|   |   |   REC-Lugar-Destino = Exi: Scheduling-Routing (3.0)
|   |   REC-Ampliacion de capacidad = Ove
|   |   |   REC-Tipo = Het: General (3.0/1.0)
|   |   |   REC-Tipo = Hom: Scheduling-Routing (4.0/1.0)
|   |   REC-Ampliacion de capacidad = None
|   |   |   REC-Disciplina = B: Scheduling-Routing (0.0)
|   |   |   REC-Disciplina = G
|   |   |   |   REC-Paradas = None
```

```
|   |   |   |   |   REC-Competencias = None
|   |   |   |   |   |   REC-Disponibilidad = None
|   |   |   |   |   |   |   REC-Tecnologia = A
|   |   |   |   |   |   |   |   REC-Lugar = C
|   |   |   |   |   |   |   |   |   REC-Recursos = Ren: General (6.0/1.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   |   REC-Recursos = Nren: Scheduling-Routing (5.0/1.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   REC-Lugar = P: Scheduling-Routing (9.0/2.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   REC-Lugar = V: Scheduling-Routing (0.0)
|   |   |   |   |   |   |   REC-Tecnologia = M
|   |   |   |   |   |   |   |   REC-Lugar = C
|   |   |   |   |   |   |   |   |   REC-Capacidad Servicio = C: General (21.0/11.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   |   REC-Capacidad Servicio = V: Scheduling-Routing (3.0/1.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   REC-Lugar = P
|   |   |   |   |   |   |   |   |   REC-Tipo = Het: Scheduling-Routing (8.0/4.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   |   REC-Tipo = Hom: General (6.0/3.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   REC-Lugar = V: General (0.0)
|   |   |   |   |   |   |   REC-Tecnologia = M,A
|   |   |   |   |   |   |   |   REC-Tiempo de proceso = D: Scheduling-Routing (2.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   REC-Tiempo de proceso = S: General (2.0)
|   |   |   |   |   |   REC-Disponibilidad = S
|   |   |   |   |   |   |   REC-Lugar = C: Scheduling-Routing (11.0/4.0)
|   |   |   |   |   |   |   REC-Lugar = P
|   |   |   |   |   |   |   |   REC-Lugar-Destino = Rout: Scheduling-Routing (9.0/2.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   REC-Lugar-Destino = Exi: General (5.0)
|   |   |   |   |   |   |   REC-Lugar = V: Scheduling-Routing (0.0)
|   |   |   |   |   REC-Competencias = k_hi: General (15.0/6.0)
|   |   |   |   REC-Paradas = Prev: Scheduling-Routing (3.0/1.0)
|   |   |   |   REC-Paradas = Cor: General (1.0)
|   |   |   REC-Disciplina = P: Scheduling-Routing (5.0)
|   |   |   REC-Disciplina = FIFO: Scheduling-Routing (0.0)
|   |   |   REC-Disciplina = Rnd: Scheduling-Routing (0.0)
|   |   |   REC-Disciplina = LIFO: Scheduling-Routing (0.0)
|   |   REC-Ampliacion de capacidad = Out: Programación (Scheduling) (3.0/1.0)
|   |   REC-Ampliacion de capacidad = Oth: General (1.0)
|   REC-Disciplina Fila = P
|   |   REC-Agrupación = None: Cliente-Recurso (3.0/1.0)
|   |   REC-Agrupación = Teaming: General (2.0)
|   REC-Disciplina Fila = FIFO: Scheduling-Routing (0.0)
|   REC-Disciplina Fila = Rnd: Cliente-Recurso (1.0)
|   REC-Disciplina Fila = LIFO: Recursos (2.0)
Problema = Sche
|   REC-Lugar-Destino = Rout
|   |   REC-Lugar = C: General (9.0/2.0)
|   |   REC-Lugar = P
|   |   |   REC-Procesamiento en la fila = None: Programación (Scheduling) (81.0/44.0)
|   |   |   REC-Procesamiento en la fila = P: Cliente-Recurso (3.0/1.0)
|   |   REC-Lugar = V
|   |   |   REC-Tipo = Het: Scheduling-Routing (2.0/1.0)
|   |   |   REC-Tipo = Hom: General (3.0/2.0)
|   REC-Lugar-Destino = Exi
|   |   REC-Tecnologia = A
|   |   |   REC-Disciplina = B: Cliente-Recurso (1.0)
|   |   |   REC-Disciplina = G
|   |   |   |   REC-Disponibilidad = None
|   |   |   |   |   REC-Tipo = Het
|   |   |   |   |   |   REC-Lugar de origen = D: General (4.0/1.0)
|   |   |   |   |   |   REC-Lugar de origen = N: Programación (Scheduling) (9.0/1.0)
|   |   |   |   |   REC-Tipo = Hom: General (14.0/5.0)
|   |   |   |   REC-Disponibilidad = S: General (11.0/2.0)
|   |   |   REC-Disciplina = P
|   |   |   |   REC-Ampliacion de capacidad = U-D: General (2.0/1.0)
|   |   |   |   REC-Ampliacion de capacidad = R-Sch: General (1.0)
|   |   |   |   REC-Ampliacion de capacidad = Ove: General (0.0)
|   |   |   |   REC-Ampliacion de capacidad = None: Cliente-Recurso (2.0)
|   |   |   |   REC-Ampliacion de capacidad = Out: General (0.0)
|   |   |   |   REC-Ampliacion de capacidad = Oth: General (0.0)
```

```
|  |  |  REC-Disciplina = FIFO: Programación (Scheduling) (3.0/1.0)
|  |  |  REC-Disciplina = Rnd: General (0.0)
|  |  |  REC-Disciplina = LIFO: General (0.0)
|  |  REC-Tecnologia = M
|  |  |  REC-Número = m
|  |  |  |  REC-Capacidad Servicio = C
|  |  |  |  |  REC-Ampliacion de capacidad = U-D: Cliente-Recurso (1.0)
|  |  |  |  |  REC-Ampliacion de capacidad = R-Sch: Cliente-Recurso (5.0/1.0)
|  |  |  |  |  REC-Ampliacion de capacidad = Ove: Programación (Scheduling) (4.0/1.0)
|  |  |  |  |  REC-Ampliacion de capacidad = None
|  |  |  |  |  |  REC-Disciplina = B: General (0.0)
|  |  |  |  |  |  REC-Disciplina = G
|  |  |  |  |  |  |  REC-Paradas = None
|  |  |  |  |  |  |  |  REC-Tiempo de proceso = D
|  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Lugar de origen = D
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Recursos = Ren: Recursos (5.0/2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Recursos = Nren: General (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Lugar de origen = N
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Recursos = Ren: General (5.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Recursos = Nren
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Disponibilidad = None: Cliente-Recurso (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Disponibilidad = S: General (4.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  REC-Tiempo de proceso = S
|  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Disponibilidad = None: Programación (Scheduling) (3.0/2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Disponibilidad = S: General (4.0/2.0)
|  |  |  |  |  |  |  REC-Paradas = Prev: Programación (Scheduling) (4.0/2.0)
|  |  |  |  |  |  |  REC-Paradas = Cor: General (0.0)
|  |  |  |  |  |  REC-Disciplina = P: Cliente-Recurso (3.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  REC-Disciplina = FIFO: Programación (Scheduling) (1.0)
|  |  |  |  |  |  REC-Disciplina = Rnd: General (0.0)
|  |  |  |  |  |  REC-Disciplina = LIFO: General (0.0)
|  |  |  |  |  REC-Ampliacion de capacidad = Out: Cliente-Recurso (0.0)
|  |  |  |  |  REC-Ampliacion de capacidad = Oth: Cliente-Recurso (0.0)
|  |  |  |  REC-Capacidad Servicio = V
|  |  |  |  |  REC-Disciplina = B: General (0.0)
|  |  |  |  |  REC-Disciplina = G
|  |  |  |  |  |  REC-Tipo = Het
|  |  |  |  |  |  |  REC-Disponibilidad = None: General (5.0)
|  |  |  |  |  |  |  REC-Disponibilidad = S: Cliente-Recurso (3.0)
|  |  |  |  |  |  REC-Tipo = Hom: Cliente-Recurso (3.0/1.0)
|  |  |  |  |  REC-Disciplina = P: General (0.0)
|  |  |  |  |  REC-Disciplina = FIFO: General (3.0)
|  |  |  |  |  REC-Disciplina = Rnd: General (1.0)
|  |  |  |  |  REC-Disciplina = LIFO: General (0.0)
|  |  |  REC-Número = 1: General (4.0)
|  |  REC-Tecnologia = M,A
|  |  |  REC-Recursos = Ren: General (20.0/4.0)
|  |  |  REC-Recursos = Nren: Scheduling-Routing (4.0/1.0)
Problema = Rou
|  REC-Capacidad Servicio = C
|  |  REC-Lugar de origen = D
|  |  |  REC-Lugar-Destino = Rout
|  |  |  |  REC-Ampliacion de capacidad = U-D: Scheduling-Routing (1.0)
|  |  |  |  REC-Ampliacion de capacidad = R-Sch: General (3.0/2.0)
|  |  |  |  REC-Ampliacion de capacidad = Ove: Scheduling-Routing (3.0/1.0)
|  |  |  |  REC-Ampliacion de capacidad = None
|  |  |  |  |  REC-Paradas = None
|  |  |  |  |  |  REC-Tecnologia = A
|  |  |  |  |  |  |  REC-Disponibilidad = None
|  |  |  |  |  |  |  |  REC-Tipo = Het
|  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Lugar = C: General (6.0/2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Lugar = P: Scheduling-Routing (5.0/3.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Lugar = V: General (0.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  REC-Tipo = Hom: Ruteo (routing) (31.0/11.0)
|  |  |  |  |  |  |  REC-Disponibilidad = S: Scheduling-Routing (7.0/2.0)
|  |  |  |  |  |  REC-Tecnologia = M
```

```
|  |  |  |  |  |  |  |  REC-Lugar = C
|  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Tiempo de proceso = D: Ruteo (routing) (4.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Tiempo de proceso = S
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Recursos = Ren: Scheduling-Routing (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Recursos = Nren: General (2.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  REC-Lugar = P: General (8.0/3.0)
|  |  |  |  |  |  |  |  REC-Lugar = V: General (0.0)
|  |  |  |  |  |  |  REC-Tecnologia = M,A: Ruteo (routing) (4.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  REC-Paradas = Prev: General (2.0/1.0)
|  |  |  |  |  |  REC-Paradas = Cor: Scheduling-Routing (3.0/1.0)
|  |  |  |  |  REC-Ampliacion de capacidad = Out: Ruteo (routing) (1.0)
|  |  |  |  |  REC-Ampliacion de capacidad = Oth: Ruteo (routing) (1.0)
|  |  |  |  REC-Lugar-Destino = Exi: General (10.0/2.0)
|  |  |  REC-Lugar de origen = N
|  |  |  |  REC-Capacidad Fila = F
|  |  |  |  |  REC-Disciplina Fila = B: Programación (Scheduling) (0.0)
|  |  |  |  |  REC-Disciplina Fila = G: Programación (Scheduling) (15.0/7.0)
|  |  |  |  |  REC-Disciplina Fila = P: General (4.0/2.0)
|  |  |  |  |  REC-Disciplina Fila = FIFO: Programación (Scheduling) (0.0)
|  |  |  |  |  REC-Disciplina Fila = Rnd: Programación (Scheduling) (0.0)
|  |  |  |  |  REC-Disciplina Fila = LIFO: Programación (Scheduling) (0.0)
|  |  |  |  REC-Capacidad Fila = I: General (4.0)
|  |  REC-Capacidad Servicio = V
|  |  |  REC-Lugar-Destino = Rout
|  |  |  |  REC-Tiempo de proceso = D
|  |  |  |  |  REC-Recursos = Ren: Programación (Scheduling) (2.0/1.0)
|  |  |  |  |  REC-Recursos = Nren: Recursos (3.0/1.0)
|  |  |  |  REC-Tiempo de proceso = S: Scheduling-Routing (2.0)
|  |  REC-Lugar-Destino = Exi: Cliente-Recurso (6.0/2.0)

Number of Leaves :      115

Size of the tree :      176
```

Árbol de clasificación REPTree para el tipo de criterio en el CPT considerando la base de conocimiento parcial respecto a control de flujo.

```
Problema = Sch&Rou
|  CON-Disciplina = G
|  |  CON-Sincronización de tareas = Y
|  |  |  CON-Personalizacion = S
|  |  |  |  CON-Ruta = F : Scheduling-Routing (12/7) [6/2]
|  |  |  |  CON-Ruta = V
|  |  |  |  |  CON-Consumo de recursos = Ren
|  |  |  |  |  |  CON-Sincronización de recursos = None : General (21/11) [14/8]
|  |  |  |  |  |  CON-Sincronización de recursos = Teaming : Scheduling-Routing (12/5) [4/1]
|  |  |  |  |  CON-Consumo de recursos = NRen : Scheduling-Routing (6/1) [4/3]
|  |  |  CON-Personalizacion = C
|  |  |  |  CON-Simultaneidad = Off
|  |  |  |  |  CON-Lotes = B : General (2/0) [0/0]
|  |  |  |  |  CON-Lotes = U
|  |  |  |  |  |  CON-Agendado = Y : General (11/6) [5/4]
|  |  |  |  |  |  CON-Agendado = N : Scheduling-Routing (2/0) [1/0]
|  |  |  |  |  CON-Lotes = M : Scheduling-Routing (1/0) [0/0]
|  |  |  |  CON-Simultaneidad = On : Recursos (4/2) [3/2]
|  |  CON-Sincronización de tareas = N : Scheduling-Routing (9/3) [3/3]
|  CON-Disciplina = FIFO : General (1/0) [0/0]
|  CON-Disciplina = P : Scheduling-Routing (9/4) [8/3]
|  CON-Disciplina = Rnd : Scheduling-Routing (0/0) [0/0]
|  CON-Disciplina = LIFO : Recursos (1/0) [0/0]
|  CON-Disciplina = B : Recursos (1/0) [0/0]
Problema = Sche
|  CON-Cantidad = None : General (120/74) [52/29]
|  CON-Cantidad = UnL : Programación (Scheduling) (31/11) [17/5]
|  CON-Cantidad = L : General (10/2) [1/1]
```

```
Problema = Rou
|  CON-Ruta = F : General (14/10) [13/7]
|  CON-Ruta = V
|  |  CON-Tiempo = None
|  |  |  CON-Agendado = Y
|  |  |  |  CON-Sincronización de recursos = None
|  |  |  |  |  CON-Lotes = B : Scheduling-Routing (2/1) [0/0]
|  |  |  |  |  CON-Lotes = U
|  |  |  |  |  |  CON-Personalizacion = S
|  |  |  |  |  |  |  CON-Inventario = N : Ruteo (routing) (24/7) [11/5]
|  |  |  |  |  |  |  CON-Inventario = Y : Scheduling-Routing (3/1) [1/0]
|  |  |  |  |  |  CON-Personalizacion = C : Scheduling-Routing (5/2) [3/2]
|  |  |  |  |  CON-Lotes = M : General (2/0) [1/0]
|  |  |  |  CON-Sincronización de recursos = Teaming
|  |  |  |  |  CON-Simultaneidad = Off
|  |  |  |  |  |  CON-Personalizacion = S : Scheduling-Routing (6/2) [5/3]
|  |  |  |  |  |  CON-Personalizacion = C : General (5/2) [3/0]
|  |  |  |  |  CON-Simultaneidad = On : General (4/2) [3/3]
|  |  |  CON-Agendado = N : General (10/5) [6/4]
|  |  CON-Tiempo = UnL : General (4/3) [3/2]
|  |  CON-Tiempo = L : Scheduling-Routing (1/0) [0/0]

Size of the tree : 50
```

Árbol de clasificación REPTree para el tipo de criterio en el CPT considerando la base de conocimiento completa.

```
Problema = Sche&Rou
|  CLI-Tiempo de Entrega = None : Scheduling-Routing (30/15) [14/6]
|  CLI-Tiempo de Entrega = H : General (28/12) [14/5]
|  CLI-Tiempo de Entrega = S : Scheduling-Routing (14/7) [13/9]
|  CLI-Tiempo de Entrega = H,S : Scheduling-Routing (15/6) [6/3]
|  CLI-Tiempo de Entrega = d_j
|  |  CLI-Tipo de tarea = S : Scheduling-Routing (3/0) [0/0]
|  |  CLI-Tipo de tarea = C : General (2/1) [1/0]
Problema = Sche
|  CLI-Expectativa del cliente = None
|  |  CON-Cantidad = None
|  |  |  CLI-Tiempo de Entrega = None
|  |  |  |  CLI-Tipo de necesidad = T : General (5/3) [1/1]
|  |  |  |  CLI-Tipo de necesidad = I
|  |  |  |  |  CLI-Requerimientos = S : General (11/5) [0/0]
|  |  |  |  |  CLI-Requerimientos = None : Programación (Scheduling) (24/16) [12/6]
|  |  |  |  |  CLI-Requerimientos = T : General (5/3) [0/0]
|  |  |  |  CLI-Tipo de necesidad = I,T : Programación (Scheduling) (4/3) [3/1]
|  |  |  CLI-Tiempo de Entrega = H
|  |  |  |  CLI-Tipo de necesidad = T : Cliente-Recurso (5/1) [1/1]
|  |  |  |  CLI-Tipo de necesidad = I : General (10/7) [4/1]
|  |  |  |  CLI-Tipo de necesidad = I,T : Scheduling-Routing (0/0) [1/0]
|  |  |  CLI-Tiempo de Entrega = S : General (2/1) [4/1]
|  |  |  CLI-Tiempo de Entrega = H,S : General (14/9) [4/2]
|  |  |  CLI-Tiempo de Entrega = d_j : Programación (Scheduling) (3/1) [1/1]
|  |  CON-Cantidad = UnL : Programación (Scheduling) (27/7) [16/4]
|  |  CON-Cantidad = L : General (4/1) [0/0]
|  CLI-Expectativa del cliente = S
|  |  CLI-Tiempo de llegada = D : General (13/2) [4/4]
|  |  CLI-Tiempo de llegada = S : Cliente-Recurso (6/3) [2/1]
|  CLI-Expectativa del cliente = Q : General (16/9) [11/4]
|  CLI-Expectativa del cliente = C : General (3/0) [1/0]
|  CLI-Expectativa del cliente = Q,S : General (7/1) [4/0]
|  CLI-Expectativa del cliente = Q,S,C : General (2/1) [1/0]
Problema = Rou
|  CLI-Expectativa del cliente = None
|  |  REC-Lugar de origen = D : Ruteo (routing) (49/26) [25/13]
|  |  REC-Lugar de origen = N
```

| | | REC-Tecnologia = A : Programación (Scheduling) (4/0) [9/7]
| | | REC-Tecnologia = M
| | | | CLI-Tipo de tarea = S : Programación (Scheduling) (2/0) [0/0]
| | | | CLI-Tipo de tarea = C : General (2/1) [1/0]
| | | REC-Tecnologia = M,A : General (5/3) [2/1]
| CLI-Expectativa del cliente = S : General (5/2) [9/2]
| CLI-Expectativa del cliente = Q : General (2/2) [2/1]
| CLI-Expectativa del cliente = C : General (0/0) [0/0]
| CLI-Expectativa del cliente = Q,S : General (8/4) [1/1]
| CLI-Expectativa del cliente = Q,S,C : General (3/0) [0/0]

Size of the tree : 49

Anexo N Resultados de algoritmos de clasificación para el grupo de técnicas de solución

Árbol de clasificación REPTree para el grupo de técnicas de solución en el CPT considerando la base de conocimiento parcial respecto al cliente.

```
CLI-Tiempo de Entrega = None
|   CLI-Tiempo de llegada = D : Optimization (117/59) [62/21]
|   CLI-Tiempo de llegada = S : Stochastic (33/16) [21/11]
CLI-Tiempo de Entrega = H
|   CLI-Expectativa del cliente = None : Optimization (40/18) [23/7]
|   CLI-Expectativa del cliente = S : Optimization (8/0) [4/4]
|   CLI-Expectativa del cliente = Q : Optimization (17/6) [6/4]
|   CLI-Expectativa del cliente = C : Optimization (1/0) [0/0]
|   CLI-Expectativa del cliente = Q,S
|   |   CLI-Tipo de necesidad = T : Optimization (0/0) [1/0]
|   |   CLI-Tipo de necesidad = I : Optimization (4/1) [3/3]
|   |   CLI-Tipo de necesidad = I,T : Heuristic (2/0) [3/2]
|   CLI-Expectativa del cliente = Q,S,C : Optimization (0/0) [0/0]
CLI-Tiempo de Entrega = S
|   CLI-Expectativa del cliente = None : Optimization (25/7) [9/5]
|   CLI-Expectativa del cliente = S : Metaheuristics (5/2) [2/0]
|   CLI-Expectativa del cliente = Q : Optimization (2/1) [2/0]
|   CLI-Expectativa del cliente = C : Optimization (0/0) [0/0]
|   CLI-Expectativa del cliente = Q,S : Optimization (6/1) [4/2]
|   CLI-Expectativa del cliente = Q,S,C : Optimization (0/0) [0/0]
CLI-Tiempo de Entrega = H,S : Optimization (56/25) [21/9]
CLI-Tiempo de Entrega = d_j
|   Med-Eficiencia = General : Optimization (5/1) [0/0]
|   Med-Eficiencia = Recursos : Metaheuristics (1/0) [0/0]
|   Med-Eficiencia = Programación (Scheduling)
|   |   CLI-Tamaño de Lote = B : Optimization (2/0) [1/0]
|   |   CLI-Tamaño de Lote = U : Optimization (2/1) [1/1]
|   |   CLI-Tamaño de Lote = M : Metaheuristics (1/0) [1/0]
|   Med-Eficiencia = Scheduling-Routing : Optimization (3/1) [3/1]
|   Med-Eficiencia = Cliente-Recurso : Optimization (3/0) [0/0]
|   Med-Eficiencia = Ruteo (routing) : Optimization (0/0) [0/0]
|   Med-Eficiencia = Cliente : Optimization (0/0) [0/0]

Size of the tree : 33
```

Árbol de clasificación REPTree para el grupo de técnicas de solución en el CPT considerando la base de conocimiento parcial respecto al recurso.

```
REC-Disciplina Fila = B : Optimization (1/0) [0/0]
REC-Disciplina Fila = G
|   REC-Ampliacion de capacidad = U-D : Optimization (3/0) [2/2]
|   REC-Ampliacion de capacidad = R-Sch : Optimization (25/11) [8/5]
|   REC-Ampliacion de capacidad = Ove : Optimization (15/4) [8/3]
|   REC-Ampliacion de capacidad = None
|   |   REC-Competencias = None
|   |   |   Med-Eficiencia = General
|   |   |   |   REC-Capacidad Fila = F
|   |   |   |   |   REC-Recursos = Ren
|   |   |   |   |   |   REC-Tipo = Het : Optimization (16/8) [9/4]
|   |   |   |   |   |   REC-Tipo = Hom
|   |   |   |   |   |   |   Problema = Sche&Rou
|   |   |   |   |   |   |   |   REC-Lugar = C : Metaheuristics (9/3) [2/2]
|   |   |   |   |   |   |   |   REC-Lugar = P : Heuristic (5/2) [2/1]
|   |   |   |   |   |   |   |   REC-Lugar = V : Heuristic (0/0) [0/0]
|   |   |   |   |   |   |   Problema = Sche : Optimization (5/3) [5/2]
|   |   |   |   |   |   |   Problema = Rou
|   |   |   |   |   |   |   |   REC-Lugar-Destino = Rout : Optimization (7/2) [3/2]
```

```
|  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Lugar-Destino = Exi : Heuristic (3/1) [1/0]
|  |  |  |  |  |  |  |  REC-Recursos = Nren
|  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Disponibilidad = None
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Tecnologia = A : Metaheuristics (5/2) [4/2]
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Tecnologia = M : Heuristic (4/2) [2/1]
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Tecnologia = M,A : Optimization (4/1) [1/1]
|  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Disponibilidad = S : Optimization (6/0) [9/7]
|  |  |  |  |  |  |  |  REC-Capacidad Fila = I : Stochastic (2/1) [0/0]
|  |  |  |  |  |  |  Med-Eficiencia = Recursos : Optimization (8/5) [8/2]
|  |  |  |  |  |  |  Med-Eficiencia = Programación (Scheduling)
|  |  |  |  |  |  |  |  REC-Tiempo de proceso = D : Optimization (27/13) [12/6]
|  |  |  |  |  |  |  |  REC-Tiempo de proceso = S : Stochastic (10/5) [3/0]
|  |  |  |  |  |  |  Med-Eficiencia = Scheduling-Routing : Optimization (51/23) [20/5]
|  |  |  |  |  |  |  Med-Eficiencia = Cliente-Recurso : Optimization (22/9) [7/2]
|  |  |  |  |  |  |  Med-Eficiencia = Ruteo (routing)
|  |  |  |  |  |  |  |  Problema = Sche&Rou : Optimization (6/1) [4/0]
|  |  |  |  |  |  |  |  Problema = Sche : Stochastic (2/1) [0/0]
|  |  |  |  |  |  |  |  Problema = Rou
|  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Tipo = Het : Optimization (4/0) [4/3]
|  |  |  |  |  |  |  |  |  REC-Tipo = Hom
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  Med-Número de criterios = multi : Metaheuristics (3/1) [1/0]
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  Med-Número de criterios = 1 : Optimization (13/7) [10/4]
|  |  |  |  |  |  |  Med-Eficiencia = Cliente : Optimization (1/0) [1/1]
|  |  |  REC-Competencias = k_hi : Optimization (37/13) [18/8]
|  |  REC-Ampliacion de capacidad = Out : Optimization (6/2) [1/0]
|  |  REC-Ampliacion de capacidad = Oth : Metaheuristics (1/0) [3/2]
REC-Disciplina Fila = P : Optimization (20/8) [15/4]
REC-Disciplina Fila = FIFO
|  Med-Eficiencia = General : Stochastic (3/0) [1/0]
|  Med-Eficiencia = Recursos : Optimization (0/0) [1/0]
|  Med-Eficiencia = Programación (Scheduling) : Optimization (2/1) [1/0]
|  Med-Eficiencia = Scheduling-Routing : Optimization (2/0) [0/0]
|  Med-Eficiencia = Cliente-Recurso : Stochastic (3/1) [0/0]
|  Med-Eficiencia = Ruteo (routing) : Stochastic (0/0) [0/0]
|  Med-Eficiencia = Cliente : Stochastic (0/0) [0/0]
REC-Disciplina Fila = Rnd : Optimization (1/0) [0/0]
REC-Disciplina Fila = LIFO : Optimization (1/0) [1/0]

Size of the tree : 57
```

Árbol de clasificación REPTree para el grupo de técnicas de solución en el CPT considerando la base de conocimiento parcial respecto al control de flujo.

```
CON-Disciplina = G
|  Med-Eficiencia = General : Optimization (101/54) [48/29]
|  Med-Eficiencia = Recursos : Optimization (10/6) [12/4]
|  Med-Eficiencia = Programación (Scheduling) : Optimization (47/22) [21/11]
|  Med-Eficiencia = Scheduling-Routing : Optimization (67/27) [26/10]
|  Med-Eficiencia = Cliente-Recurso : Optimization (33/11) [14/5]
|  Med-Eficiencia = Ruteo (routing)
|  |  Problema = Sche&Rou : Optimization (6/1) [4/0]
|  |  Problema = Sche : Stochastic (2/1) [0/0]
|  |  Problema = Rou
|  |  |  Med-Número de criterios = multi : Metaheuristics (3/1) [3/1]
|  |  |  Med-Número de criterios = 1 : Optimization (19/9) [13/5]
|  Med-Eficiencia = Cliente : Optimization (1/0) [1/1]
CON-Disciplina = FIFO
|  CON-Personalizacion = S : Optimization (7/2) [4/2]
|  CON-Personalizacion = C : Stochastic (2/0) [1/0]
CON-Disciplina = P : Optimization (33/13) [18/5]
CON-Disciplina = Rnd : Heuristic (1/1) [1/0]
CON-Disciplina = LIFO : Optimization (0/0) [1/0]
CON-Disciplina = B : Optimization (1/0) [0/0]

Size of the tree : 21
```

Árbol de clasificación REPTree para el grupo de técnicas de solución en el CPT considerando la base de conocimiento completa.

REC-Disciplina Fila = B : Optimization (1/0) [0/0]
REC-Disciplina Fila = G
| CLI-Tiempo de Entrega = None : Optimization (131/74) [76/33]
| CLI-Tiempo de Entrega = H : Optimization (65/23) [34/18]
| CLI-Tiempo de Entrega = S
| | CLI-Expectativa del cliente = None : Optimization (25/7) [9/5]
| | CLI-Expectativa del cliente = S : Metaheuristics (5/2) [2/0]
| | CLI-Expectativa del cliente = Q : Stochastic (1/0) [0/0]
| | CLI-Expectativa del cliente = C : Optimization (0/0) [0/0]
| | CLI-Expectativa del cliente = Q,S : Optimization (6/1) [3/2]
| | CLI-Expectativa del cliente = Q,S,C : Optimization (0/0) [0/0]
| CLI-Tiempo de Entrega = H,S
| | CLI-Nature = St
| | | CON-Lotes = B : Optimization (2/1) [2/0]
| | | CON-Lotes = U
| | | | Problema = Sch&Rou : Optimization (9/4) [3/0]
| | | | Problema = Sche : Optimization (15/3) [4/2]
| | | | Problema = Rou : Heuristic (10/5) [7/4]
| | | CON-Lotes = M : Heuristic (2/0) [0/0]
| | CLI-Nature = Dy : Optimization (13/8) [4/2]
| CLI-Tiempo de Entrega = d_j
| | Med-Eficiencia = General : Optimization (5/1) [0/0]
| | Med-Eficiencia = Recursos : Metaheuristics (1/0) [0/0]
| | Med-Eficiencia = Programación (Scheduling)
| | | CLI-Tamaño de Lote = B : Optimization (2/0) [1/0]
| | | CLI-Tamaño de Lote = U : Optimization (2/1) [1/1]
| | | CLI-Tamaño de Lote = M : Metaheuristics (1/0) [1/0]
| | Med-Eficiencia = Scheduling-Routing : Optimization (3/1) [1/0]
| | Med-Eficiencia = Cliente-Recurso : Optimization (2/0) [0/0]
| | Med-Eficiencia = Ruteo (routing) : Optimization (0/0) [0/0]
| | Med-Eficiencia = Cliente : Optimization (0/0) [0/0]
REC-Disciplina Fila = P : Optimization (20/8) [15/4]
REC-Disciplina Fila = FIFO
| CLI-Tiempo de llegada = D : Optimization (5/1) [1/0]
| CLI-Tiempo de llegada = S : Stochastic (5/0) [2/1]
REC-Disciplina Fila = Rnd : Optimization (1/0) [0/0]
REC-Disciplina Fila = LIFO : Optimization (1/0) [1/0]

Size of the tree : 38

Anexo O Filtros de SQL aplicados a la base de conocimiento para el CPT

En este anexo se presentan los filtros aplicados a la base de conocimiento descrita en el Anexo I, teniendo en cuenta la definición de las columnas en esta base de datos.

El siguiente filtro se aplica para determinar la base de información en cuanto al tipo de problema (problemaDT), el área (TipoTOP) y la subárea (TipoAreaProblemaDT) y la frecuencia (# de documentos) mediante el comando "Count(Valor)".

```
String SQL = "select  Campo1,Campo2,Campo3,Count(Valor) from dbo.BDRESUMEN$ "
                  + "where Campo0='PROBLEMS' "
                  + "and Tipo_Prob_1="+
                  "'"+problemaDT+"'"+
                  "and Campo1="+
                  "'"+TipoTOP+"'"+
                  "and Campo2 ="+
                  "'"+TipoAreaProblemaDT+"'"+

                  "group by Campo1,Campo2,Campo3 Order by count(Valor) desc";
```

El siguiente filtro se aplica para la selección de la medida de desempeño especifico (método seleccionMedidaDesmpeñoEspecifico) según los campos definidos en el anterior filtro anterior y teniendo en cuenta el valor de resp2 en cuanto a la selección del tipo de problema especifico Se observa que se aplican algunas reglas dependiendo de los valores tomados por las variables TipoTop y TipoAreaProblemaDT correspondientes a las áreas y subáreas de los problemas específicos.

```
String SQL="";
if (TipoTOP.equals("Todas")||TipoAreaProblemaDT.equals("Todas")) {
         if (TipoTOP.equals("Todas")&&TipoAreaProblemaDT.equals("Todas")) {
                  SQL = "select MedidaDesempeño,Count(Valor) from dbo.BDRESUMEN$ "
                           + "where Campo0='PROBLEMS'"
                           + " and Tipo_Prob_1="+
                           "'"+problemaDT+"'"+
                           "and Campo3 ="+
                           "'"+resp2+"'"+
                           "group by Campo1,Campo2,Campo3,MedidaDesempeño Order by
count(Valor) desc";

         }else {
         if (TipoTOP.equals("Todas")) {
                  SQL = "select MedidaDesempeño,Count(Valor) from dbo.BDRESUMEN$ "
                           + "where Campo0='PROBLEMS'"
                           + " and Tipo_Prob_1="+
                           "'"+problemaDT+"'"+
                           "and Campo2 ="+
                           "'"+TipoAreaProblemaDT+"'"+
                           "and Campo3 ="+
                           "'"+resp2+"'"+
                           "group by Campo1,Campo2,Campo3,MedidaDesempeño Order by
count(Valor) desc";

         }else {
                  SQL = "select MedidaDesempeño,Count(Valor) from dbo.BDRESUMEN$ "
                           + "where Campo0='PROBLEMS'"
                           + " and Tipo_Prob_1="+
                           "'"+problemaDT+"'"+
                           "and Campo1="+
                           "'"+TipoTOP+"'"+
                           "and Campo3 ="+
                           "'"+resp2+"'"+
                           "group by Campo1,Campo2,Campo3,MedidaDesempeño Order by
count(Valor) desc";

                  }

         }

         }else {
                  SQL = "select MedidaDesempeño,Count(Valor) from dbo.BDRESUMEN$ "
```

```
                        + "where Campo0='PROBLEMS'"
                        + " and Tipo_Prob_1="+
                        "'"+problemaDT+"'"+
                        "and Campo1="+
                        "'"+TipoTOP+"'"+
                        "and Campo2 ="+
                        "'"+TipoAreaProblemaDT+"'"+
                        "and Campo3 ="+
                        "'"+resp2+"'"+
                        "group by Campo1,Campo2,Campo3,MedidaDesempeño Order by
count(Valor) desc";

                }
```

El siguiente filtro se aplica para obtener el grupo de técnica de solución (método seleccionGrupoTecnicaSolucion). En este filtro, se toma en cuenta el resultado de la medida de desempeño en la variable *MedidaDesempeño*. Se observa que este filtro esta anidado con otro filtro correspondiente a la relación del tipo de problema dado por `select No from dbo.BDRESUMEN$ where Campo0='PROBLEMS' and Tipo_Prob_1='"+problemaDT+"'and Campo3='"+resp2+"'.` De la misma manera que el anterior filtro, se aplican unas reglas dependiendo de los valores tomados por las variables TipoTop y TipoAreaProblemaDT correspondientes a las áreas y subáreas de los problemas específicos.

```
String SQL ="";
if(TipoTOP.equals("Todas")||TipoAreaProblemaDT.equals("Todas")) {
        if(TipoTOP.equals("Todas")&&TipoAreaProblemaDT.equals("Todas")) {
                SQL ="select  Campo2,COUNT(Valor) from dbo.BDRESUMEN$"
                        +" where Campo0='Techniques'"
                        +"and Campo1='Techniques'"
                        +"and Campo2 in ('Heurística','Optimización','Mod.
Estocásticos','Metaheurísticas')"
                        +"and MedidaDesempeño='"+MedidaDesempeño+"'"
                        +"and No in (select No from dbo.BDRESUMEN$ where
Campo0='PROBLEMS' and Tipo_Prob_1='"+problemaDT+"'and Campo3='"+resp2+"')"
                        +"group by Campo2 Order by count(Valor) desc"
                                ;
        }else {
        if (TipoAreaProblemaDT.equals("Todas")) {
                SQL ="select  Campo2,COUNT(Valor) from dbo.BDRESUMEN$"
                        +" where Campo0='Techniques'"
                        +"and Campo1='Techniques'"
                        +"and Campo2 in ('Heurística','Optimización','Mod.
Estocásticos','Metaheurísticas')"
                        +"and MedidaDesempeño='"+MedidaDesempeño+"'"
                        +"and No in (select No from dbo.BDRESUMEN$ where
Campo0='PROBLEMS' and Tipo_Prob_1='"+problemaDT+"'and Campo1='"+TipoTOP+"'and
Campo3='"+resp2+"')"
                        +"group by Campo2 Order by count(Valor) desc"
                                ;
        }else {
                SQL ="select  Campo2,COUNT(Valor) from dbo.BDRESUMEN$"
                        +" where Campo0='Techniques'"
                        +"and Campo1='Techniques'"
                        +"and Campo2 in ('Heurística','Optimización','Mod.
Estocásticos','Metaheurísticas')"
                        +"and MedidaDesempeño='"+MedidaDesempeño+"'"
                        +"and No in (select No from dbo.BDRESUMEN$ where
Campo0='PROBLEMS' and Tipo_Prob_1='"+problemaDT+"'and Campo2 ='"+TipoAreaProblemaDT+"' and
Campo3='"+resp2+"')"
                        +"group by Campo2 Order by count(Valor) desc"
                        ;
                                        }
                                }
        } else {
                SQL ="select  Campo2,COUNT(Valor) from dbo.BDRESUMEN$"
                        +" where Campo0='Techniques'"
                        +"and Campo1='Techniques'"
                        +"and Campo2 in ('Heurística','Optimización','Mod.
Estocásticos','Metaheurísticas')"
                        +"and MedidaDesempeño='"+MedidaDesempeño+"'"
```

```
                        +"and No in (select No from dbo.BDRESUMEN$ where
Campo0='PROBLEMS' and Tipo_Prob_1='"+problemaDT+"'and Campo1='"+TipoTOP+"'and Campo2
='"+TipoAreaProblemaDT+"' and Campo3='"+resp2+"')"
                        +"group by Campo2 Order by count(Valor) desc"
                                ;

                }
```

El siguiente filtro se aplica para la selección de la técnica específica (método llamado seleccionTecnicaSolucionEspecifica). En este caso se tiene en cuenta el resultado del grupo de técnica seleccionado en la variable *grupoTecnica*. Al igual que los anteriores filtros se aplican reglas dependiendo de los valores de las variables TipoTop y TipoAreaProblemaDT correspondientes a las áreas y subáreas de los problemas específicos.

```
String SQL="";
if(TipoTOP.equals("Todas")||TipoAreaProblemaDT.equals("Todas")) {
        if(TipoTOP.equals("Todas")&&TipoAreaProblemaDT.equals("Todas")) {
                SQL ="select  Campo3,COUNT(Valor) from dbo.BDRESUMEN$"
                        +" where Campo0='Techniques'"
                        +"and Campo1='Techniques'"
                        +"and Campo2 in ('Heurística','Optimización','Mod.
Estocásticos','Metaheurísticas')"
                        +"and MedidaDesempeño='"+MedidaDesempeño+"'"
                        +"and No in (select No from dbo.BDRESUMEN$ where
Campo0='PROBLEMS' and Tipo_Prob_1='"+problemaDT+"' and Campo3='"+resp2+"')"
                        +"and Campo2='"+grupoTecnica+"'"
                        +"group by Campo3 Order by count(Valor) desc"
                                ;
        }else {
        if (TipoAreaProblemaDT.equals("Todas")) {
                SQL ="select  Campo3,COUNT(Valor) from dbo.BDRESUMEN$"
                        +" where Campo0='Techniques'"
                        +"and Campo1='Techniques'"
                        +"and Campo2 in ('Heurística','Optimización','Mod.
Estocásticos','Metaheurísticas')"
                        +"and MedidaDesempeño='"+MedidaDesempeño+"'"
                        +"and No in (select No from dbo.BDRESUMEN$ where
Campo0='PROBLEMS' and Tipo_Prob_1='"+problemaDT+"'and Campo1='"+TipoTOP+"' and
Campo3='"+resp2+"')"
                        +"and Campo2='"+grupoTecnica+"'"
                        +"group by Campo3 Order by count(Valor) desc"
                        ;
        }else {
                SQL ="select  Campo3,COUNT(Valor) from dbo.BDRESUMEN$"
                        +" where Campo0='Techniques'"
                        +"and Campo1='Techniques'"
                        +"and Campo2 in ('Heurística','Optimización','Mod.
Estocásticos','Metaheurísticas')"
                        +"and MedidaDesempeño='"+MedidaDesempeño+"'"
                        +"and No in (select No from dbo.BDRESUMEN$ where
Campo0='PROBLEMS' and Tipo_Prob_1='"+problemaDT+"' and Campo2 ='"+TipoAreaProblemaDT+"' and
Campo3='"+resp2+"')"
                        +"and Campo2='"+grupoTecnica+"'"
                        +"group by Campo3 Order by count(Valor) desc"
                        ;
        }
        }
        } else {
                SQL ="select  Campo3,COUNT(Valor) from dbo.BDRESUMEN$"
                        +" where Campo0='Techniques'"
                        +"and Campo1='Techniques'"
                        +"and Campo2 in ('Heurística','Optimización','Mod.
Estocásticos','Metaheurísticas')"
                        +"and MedidaDesempeño='"+MedidaDesempeño+"'"
                        +"and No in (select No from dbo.BDRESUMEN$ where
Campo0='PROBLEMS' and Tipo_Prob_1='"+problemaDT+"'and Campo1='"+TipoTOP+"'and Campo2
='"+TipoAreaProblemaDT+"' and Campo3='"+resp2+"')"
                        +"and Campo2='"+grupoTecnica+"'"
                        +"group by Campo3 Order by count(Valor) desc"
                ;
```

}

Por último, está el filtro correspondiente a la visualización de las referencias después de haber seleccionado el problema, la medida de desempeño y la técnica de solución de forma específica (método llamado verReferencias). La técnica específica se tiene en cuenta en la variable *tecnicaEspecifica*. Al igual que los anteriores filtros se aplican reglas dependiendo de los valores de las variables TipoTop y TipoAreaProblemaDT correspondientes a las áreas y subáreas de los problemas específicos.

```
String SQL="";
if(TipoTOP.equals("Todas")||TipoAreaProblemaDT.equals("Todas")) {
         if(TipoTOP.equals("Todas")&&TipoAreaProblemaDT.equals("Todas")) {
                  SQL =("select  No,Año,Documento,[File] from dbo.BDRESUMEN$\r\n" +
                           "  where Campo0='Techniques'and Campo1='Techniques'and Campo2 in
('Heurística','Optimización','Mod. Estocásticos','Metaheurísticas') "
                           + "and MedidaDesempeño='"+ MedidaDesempeño +"' "
                           + "and No in (select No from dbo.BDRESUMEN$ where
Campo0='PROBLEMS' "
                           + "and Tipo_Prob_1='"+problemaDT+"'"
                           + "and Campo3='"+resp2+"') "
                           + "and Campo2='"+grupoTecnica+"' " +
                           "  and Campo3= '"+tecnicaEspecifica+"'"
                           + " and Valor='1' group by No,Año,Documento,[File]");
         }else {
         if (TipoAreaProblemaDT.equals("Todas")) {
                  SQL =("select  No,Año,Documento,[File] from dbo.BDRESUMEN$\r\n" +
                           "  where Campo0='Techniques'and Campo1='Techniques'and Campo2 in
('Heurística','Optimización','Mod. Estocásticos','Metaheurísticas') "
                           + "and MedidaDesempeño='"+ MedidaDesempeño +"' "
                           + "and No in (select No from dbo.BDRESUMEN$ where
Campo0='PROBLEMS' "
                           + "and Tipo_Prob_1='"+problemaDT+"'"
                           + "and Campo1='"+TipoTOP+"'"
                           + "and Campo3='"+resp2+"') "
                           + "and Campo2='"+grupoTecnica+"' " +
                           "  and Campo3= '"+tecnicaEspecifica+"'"
                           + " and Valor='1' group by No,Año,Documento,[File]");
         }else {
                  SQL =("select  No,Año,Documento,[File] from dbo.BDRESUMEN$\r\n" +
                           "  where Campo0='Techniques'and Campo1='Techniques'and Campo2 in
('Heurística','Optimización','Mod. Estocásticos','Metaheurísticas') "
                           + "and MedidaDesempeño='"+ MedidaDesempeño +"' "
                           + "and No in (select No from dbo.BDRESUMEN$ where
Campo0='PROBLEMS' "
                           + "and Tipo_Prob_1='"+problemaDT+"'"
                           + "and Campo2 ='"+TipoAreaProblemaDT+"' "
                           + "and Campo3='"+resp2+"') "
                           + "and Campo2='"+grupoTecnica+"' " +
                           "  and Campo3= '"+tecnicaEspecifica+"'"
                           + " and Valor='1' group by No,Año,Documento,[File]");
                  }
                  }
         } else {
                   SQL =("select  No,Año,Documento,[File] from dbo.BDRESUMEN$\r\n" +
                           "  where Campo0='Techniques'and Campo1='Techniques'and Campo2 in
('Heurística','Optimización','Mod. Estocásticos','Metaheurísticas') "
                           + "and MedidaDesempeño='"+ MedidaDesempeño +"' "
                           + "and No in (select No from dbo.BDRESUMEN$ where
Campo0='PROBLEMS' "
                           + "and Tipo_Prob_1='"+problemaDT+"'"
                           + "and Campo1='"+TipoTOP+"'"
                           + "and Campo2 ='"+TipoAreaProblemaDT+"' "
                           + "and Campo3='"+resp2+"') "
                           + "and Campo2='"+grupoTecnica+"' " +
                           "  and Campo3= '"+tecnicaEspecifica+"'"
                           + " and Valor='1' group by No,Año,Documento,[File]");
}
```

Anexo P Manual de usuario para SchES

En este anexo se presenta el manual de usuario diseñado para SchES. Este anexo tiene dos apartados, el primero presenta el oficio de registro del software que se encuentra en proceso ante la dirección nacional de derechos de autor del ministerio del interior y de justicia, y el segundo apartado contiene el manual de usuario.

Anexo P.1 Registro de software para SchES

MINISTERIO DEL INTERIOR
DIRECCION NACIONAL DE DERECHO DE AUTOR
UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL
OFICINA DE REGISTRO

CERTIFICADO DE REGISTRO DE SOPORTE LOGICO - SOFTWARE

Libro - Tomo - Partida
13-69-234
Fecha Registro
05-oct-2018

Página 1 de 2

1. DATOS DE LAS PERSONAS

AUTOR

Nombres y Apellidos	GERMAN ANDRES MENDEZ GIRALDO	**No de identificación** CC	79297396
Nacional de	COLOMBIA		
Dirección	CALLE 22 B 59 -31 APT 109	**Ciudad:**	BOGOTA D.C.

AUTOR

Nombres y Apellidos	JOSÉ IGNACIO RODRÍGUEZ MOLANO	**No de identificación** CC	79671115
Nacional de	COLOMBIA	**F. De Defunción**	
	DIAGONAL 5G BIS A # 42 A 17	**Ciudad:**	BOGOTA D.C.

AUTOR

Nombres y Apellidos	EDUYN RAMIRO LOPEZ SANTANA	**No de identificación** CC	1033687596
Nacional de	COLOMBIA		
Dirección	TV 68C 23 -46 SUR, B1-402	**Ciudad:**	BOGOTA D.C.

PRODUCTOR

Nombres y Apellidos	EDUYN RAMIRO LOPEZ SANTANA	**No de identificación** CC	1033687596
Nacional de	COLOMBIA		
Dirección	TV 68C 23 -46 SUR, B1-402	**Ciudad:**	BOGOTA D.C.

2. DATOS DE LA OBRA

Título Original SCHES

Año de Creación	2018	**País de Origen**	COLOMBIA	**Año Edición**

CLASE DE OBRA	INEDITA
CARACTER DE LA OBRA	OBRA ORIGINARIA
CARACTER DE LA OBRA	OBRA EN COLABORACION
ELEMENTOS APORTADOS DE SOPORTE LOGICO	PROGRAMA DE COMPUTADOR
ELEMENTOS APORTADOS DE SOPORTE LOGICO	DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA
ELEMENTOS APORTADOS DE SOPORTE LOGICO	MATERIAL AUXILIAR

3. DESCRICIPCIÓN DE LA OBRA

SCHES ES UN PROTOTIPO DE UN SISTEMA EXPERTO DISEÑADO PARA DAR SOLUCIÓN A UN PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE TAREAS EN SISTEMAS DE SERVICIOS. EL PROPÓSITO DE SCHES ES QUE EL USUARIO PUEDA IDENTIFICAR LA ACTIVIDAD ECONÓMICA EN CUANTO A SERVICIO, MANUFACTURA Y PRIMARIO, Y ADEMÁS PODER CLASIFICAR SU ACTIVIDAD DE ACUERDO CON EL CÓDIGO CIIU, Y SUGERIR AL USUARIO UNA CLASIFICACIÓN DEL PROBLEMA DE PROGRAMACIÓN DE TAREAS, MEDIDA DE DESEMPEÑO, Y UNA TÉCNICA DE SOLUCIÓN QUE PERMITA RESOLVER EL PROBLEMA.

4. OBSERVACIONES GENERALES DE LA OBRA

5. DATOS DEL SOLICITANTE

Nombres y Apellidos	EDUYN RAMIRO LOPEZ SANTANA	No de Identificación	1033687596
Nacional de	COLOMBIA	Medio Radicación	REGISTRO EN LINEA
Dirección	TV 68C 23 -46 SUR, B1-402	Ciudad	BOGOTA D.C.
		Teléfono	3124697088
Correo electrónico	ERLOPEZS@UDISTRITAL.EDU.CO	Radicación de entrada	1-2018-83013
En representación de	EN NOMBRE PROPIO		

MINISTERIO DEL INTERIOR

DIRECCION NACIONAL DE DERECHO DE AUTOR

UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL

OFICINA DE REGISTRO

CERTIFICADO DE REGISTRO DE SOPORTE LOGICO - SOFTWARE

Libro - Tomo - Partida
13-69-234
Fecha Registro
05-oct-2018

MANUEL ANTONIO MORA CUELLAR

JEFE OFICINA DE REGISTRO

SSS

Nota: El derecho de autor protege exclusivamente la forma mediante la cual las ideas del autor son descritas, explicadas, ilustradas o incorporadas a las obras . No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias y artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas, ni su aprovechamiento industrial o comercial (artículo 7o. de la Decisión 351 de 1993).

MANUAL DE USUARIO:

SchES

Scheduling with Expert Systems

Autores: Eduyn López-Santana, German Mendez-Giraldo, José Ignacio Rodriguez.
Institución: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.

Introducción

SchES es un prototipo de un Sistema Experto diseñado para dar solución a un problema de programación de tareas en sistemas de servicios. El primer propósito de SchES es que el usuario pueda identificar la actividad económica en cuanto a Servicio, Manufactura y Primario, y además poder clasificar su actividad de acuerdo con el código CIIU. En segundo objetivo de SchES es sugerir al usuario una clasificación de problema de programación de tareas y de medida de desempeño, para posteriormente identificar una técnica de solución que permita resolver el problema.

Este manual plantea una guía para el uso de SchES, en su contenido se podrá encontrar las principales funcionalidades para usar de forma correcta el prototipo. Es importante aclarar que este manual está sujeto a actualizaciones según se presenten variaciones en el contenido y/o ejecución en el prototipo.

Descripción General

SchES proviene de **Sch**eduling with **E**xpert **S**ystems y fue desarrollada en tres módulos: Principal, Clasificador Servicios y Clasificador Scheduling. Los principales modelos y algoritmo que emplea SchES para realizar sus cálculos están publicados en (E. López-Santana & Méndez-Giraldo, 2015; E. López-Santana, Méndez-Giraldo, & Rodriguez-Molano, 2018b; E. R. López-Santana & Méndez-Giraldo, 2016b, 2016a).

A continuación, se describen las funcionalidades de cada uno de ellos.

Módulo Principal

En el módulo de configuración inicial llamado Principal se presenta la ventana de inicio de SchES como se muestra a continuación.

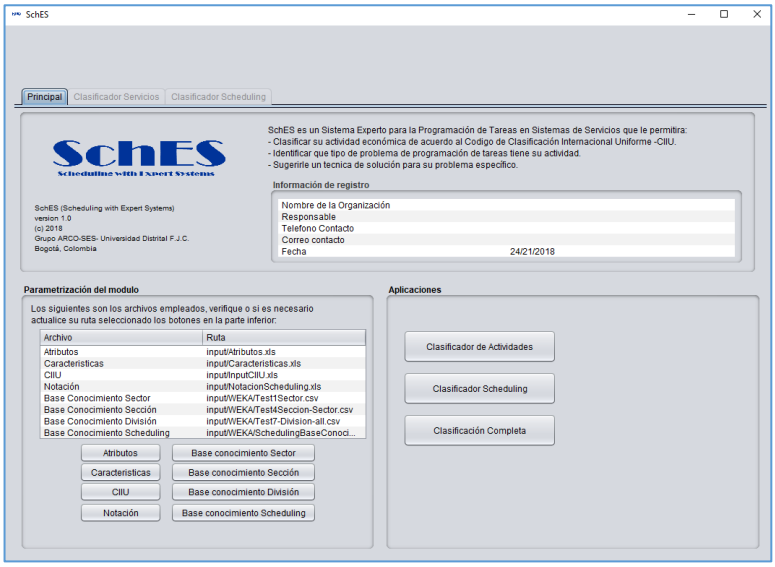


Figura P.1. Ventana del módulo Principal de SchES.
Fuente: Elaboración propia.

En este primer módulo se da una descripción general del programa y el usuario encuentra una sección donde debe ingresar unos datos básicos como: el nombre de la organización, el responsable, el teléfono de contacto, el correo, y fecha. Estos datos sirven de repositorio de información y serán tratados de acuerdo con las leyes correspondientes de protección de datos. A continuación, se presenta un ejemplo de este paso.

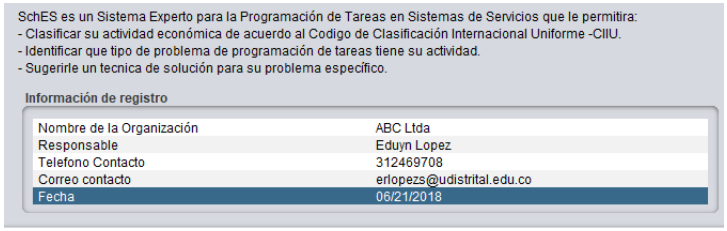


Figura P.2. Ejemplo de información personal para SchES.
Fuente: Elaboración propia.

Seguido aparece una ventana denominada Parametrización del módulo, en esta se encuentran unos archivos que SchES necesita para le ejecución de lo SE propuestos. Aquí el usuario, encuentra la dirección de cada uno de los archivos y en los botones la opción de seleccionar el archivo si lo considera pertinente indicando ubicación de este, como se muestra a continuación:

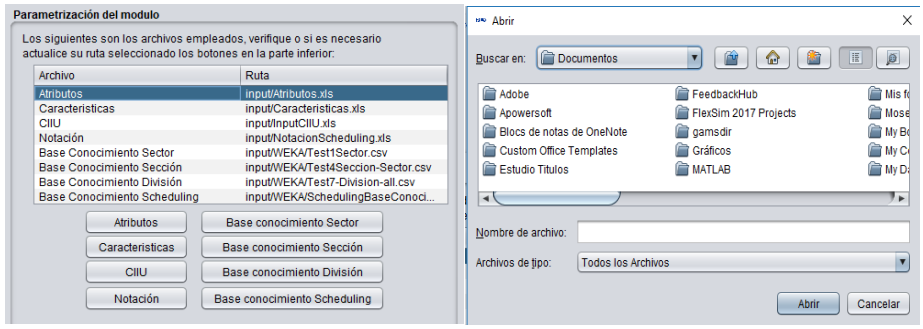


Figura P.3. Ejemplo ventana de parametrización del módulo SchES.
Fuente: Elaboración propia.

La ventana llamada Aplicaciones funciona para que el usuario selección de los tres botones el modo de operación de SchES. El botón *Clasificador de Actividades* ejecuta el SE propuesto para el CCSS y se le preguntara al usuario la opción de operación indicando si desea ingresar las características y atributos (Op. 1) o los atributos directamente (Op. 2). En la siguiente figura aparece la selección del primer modo de operación como ejemplo, donde el usuario podrá seleccionar de acuerdo con su conveniencia.

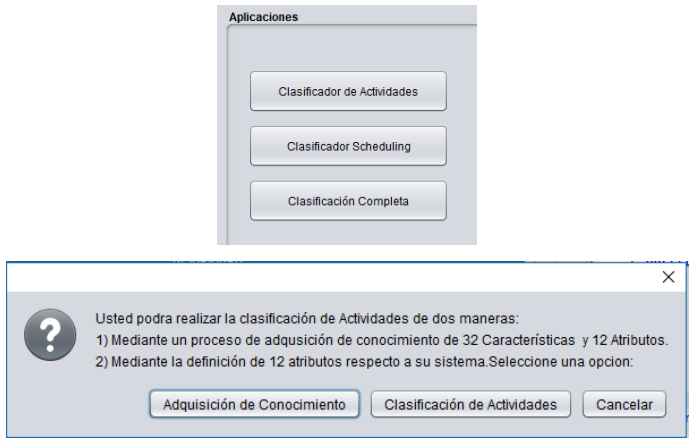


Figura P.4. Ejemplo de selección del Clasificador de Actividades de SchES.
Fuente: Elaboración propia.

El botón *Clasificador Scheduling* activa la ejecución del SE propuesto para el CPT y se lo indicara al usuario que debe ingresar toda la información correspondiente a los campos de la notación de PTSS., como se muestra a continuación. Por último, el botón *Clasificación Completa* ejecutara el SE propuesto para PTSS completo ejecutando primero el CCSS y luego el CPT, y se muestra en la siguiente figura.

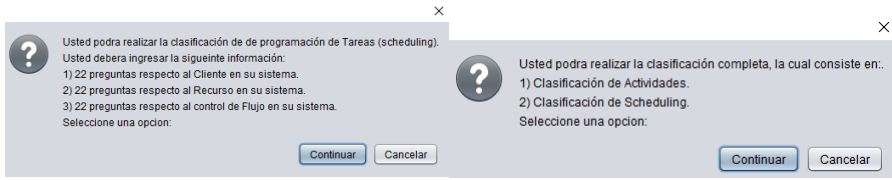


Figura P.5. Ejemplo ventana de selección del módulo SchES.
Fuente: Elaboración propia.

En esta ventana principal finaliza con estas dos opciones y se dirección según el caso al Módulo Clasificador Servicios o Módulo Scheduling.

Módulo Clasificador Servicios

El módulo Clasificador Servicios se presenta en la siguiente figura. Este se compone de dos ventanas de ejecución: Adquisición de conocimiento y Clasificador Actividades.

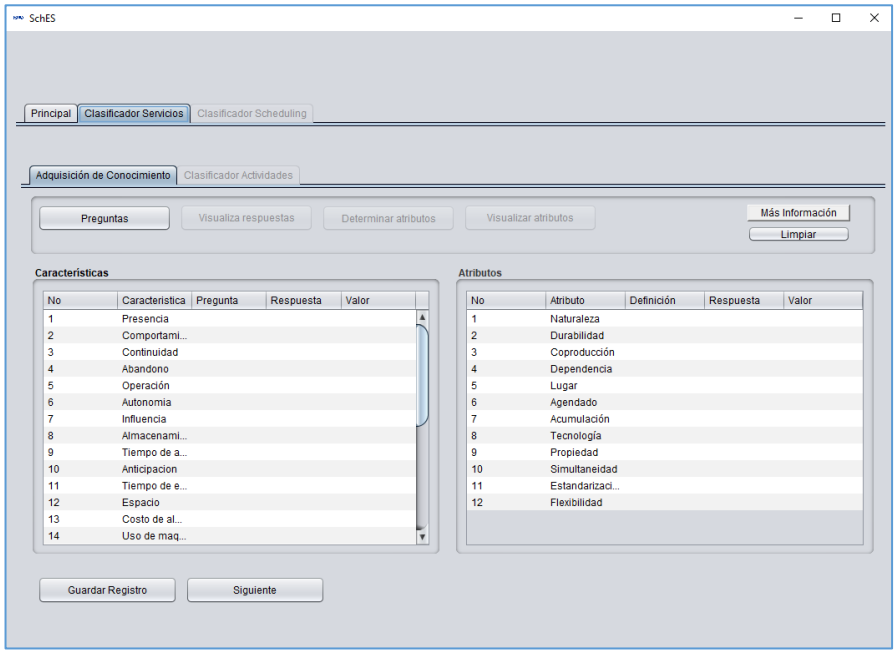


Figura P.6 Ventana de adquisición de conocimiento del módulo Clasificador Servicios de SchES.

Fuente: Elaboración propia.

Cada ventana en SchES tiene un botón de *Más Información* que permite acceder a documentación de ayuda al usuario en cada módulo. En la siguiente figura se observa el ejemplo del módulo de características. Adicionalmente, también cuenta con un botón *Limpiar* que permite borrar los resultados obtenidos para volver a ejecutar los comandos.

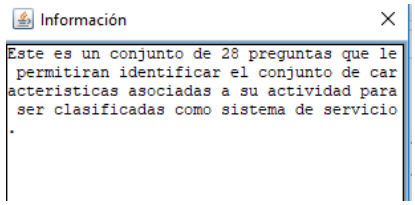


Figura P.7. Ejemplo menú de ayuda en cada ventana en SchES.

Fuente: Elaboración propia.

En la primera ventana de Adquisición de Conocimiento se ejecutan las tareas necesarias para la determinación de los 12 atributos. En esta ventana se presenta un botón *Preguntas* donde se activa una ventana para ingresar las respuestas a las 31 características y se puede visualizar las respuestas de estas (*Visualizar respuestas*). En la figura correspondiente se observa el resultado con el nombre de la característica, la pregunta, la respuesta y el valor numérico.

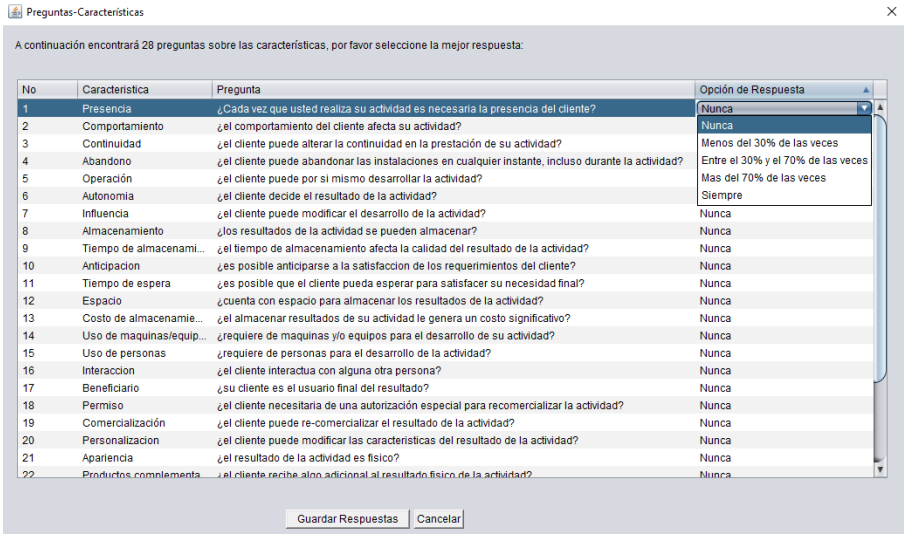


Figura P.8. Ejemplo ventana de preguntas sobre Características en SchES.
Fuente: Elaboración propia.

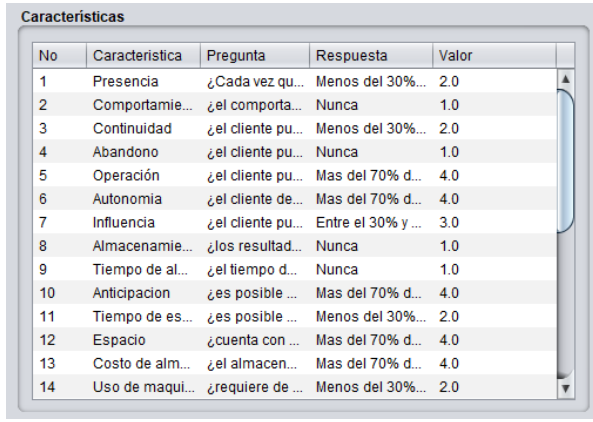


Figura P.9. Ejemplo ventana de resultados de Características en SchES.
Fuente: Elaboración propia.

El botón *Determinar atributos* permite ejecutar el sistema de inferencia difuso obtenido por el método ANFIS para cada atributo y las respuestas se pueden observar en el botón *Visualizar atributos* en la ventana que así lo indica. En la siguiente figura se observa un ejemplo de esta pantalla donde se observa cada atributo, su definición, la respuesta obtenida y el valor numérico correspondiente.



Figura P.10 Ejemplo ventana de resultado de Atributos en SchES.
Fuente: Elaboración propia.

Aquí el usuario puede guardar el registro si así lo desea y ejecutar el botón *Siguiente* para continuar con la ventana Clasificador Actividades que se presenta en la siguiente figura.

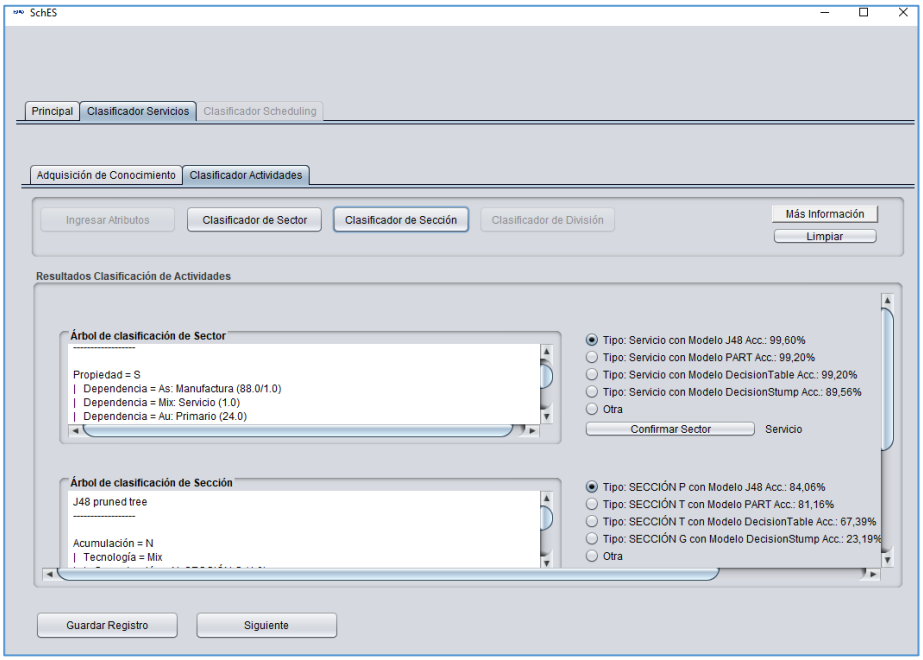


Figura P.11 Ventana de clasificador de actividades del módulo Clasificador Servicios de SchES.
Fuente: Elaboración propia.

En la ventana de clasificación de actividades el usuario tendrá la opción de ingresar los atributos mediante una lista desplegable si selecciono esta opción desde el Módulo Principal. En la siguiente figura se observa el ejemplo de esta ventana.

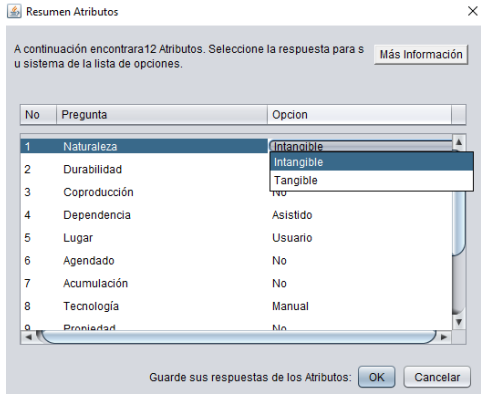


Figura P.12 Ejemplo de ventana de ingreso de atributos en SchES.
Fuente: Elaboración propia.

Ahora, con el valor de los atributos se inicia con el proceso de clasificación del sector, luego sección, y finalmente división. Estos tres ejecutados de forma secuencial. Se presentan los resultados obtenidos en cada uno por los cuatro métodos propuestos con su porcentaje de instancias clasificadas correctamente y también la opción "otra" en la cual se puede seleccionar directamente la respuesta a cada salida. En las siguientes figuras se observa la forma de ejecución, para poder avanzar el usuario debe confirmar primero el sector, para luego ejecutar el clasificador de la sección y confirmarlo, y finalmente la división.

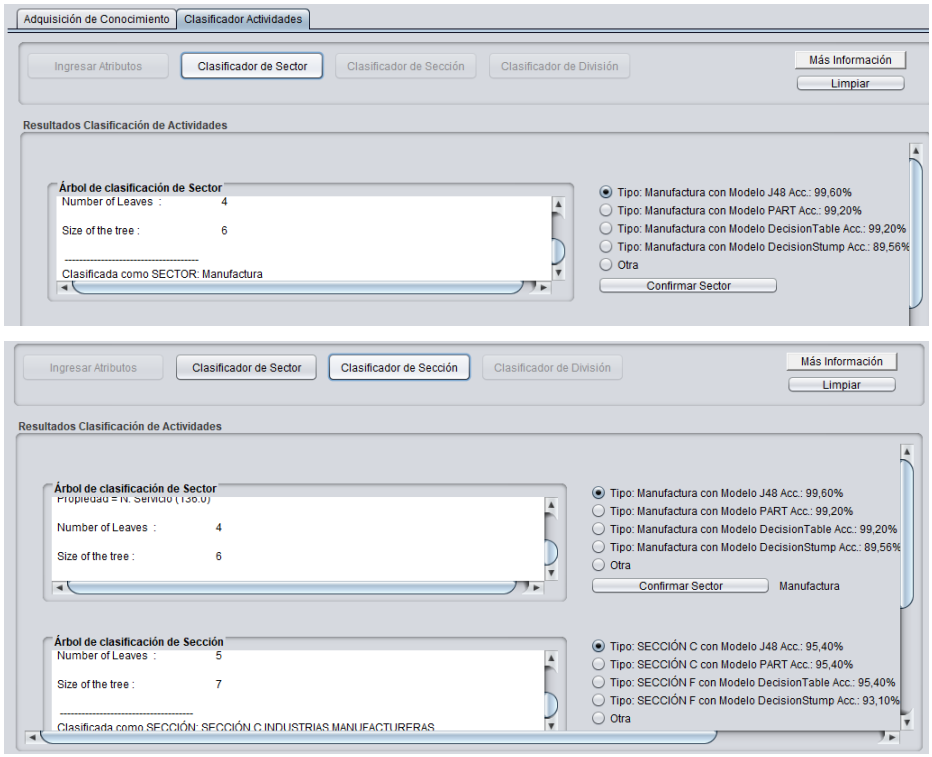


Figura P.13. Ejemplo de ejecución del Clasificador de Sector y Sección en SchES.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el resultado obtenido se presenta en una ventana de la siguiente manera.

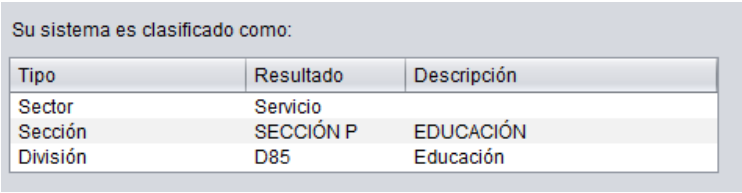


Figura P.14. Ejemplo de ejecución del Clasificador de Sector en SchES.
Fuente: Elaboración propia.

El usuario puede guardar el registro y continuar con el segundo módulo de CPT. En cada ventana se encuentra un botón *Más información* donde el usuario puede consultar un manual de ayuda sobre la ventana que está ejecutando y también un botón *Limpiar* para borrar los resultados y volver a ejecutar.

Módulo Clasificador Scheduling

En este módulo se ejecuta el CPT, y su ventana correspondiente es presentada en la siguiente figura.

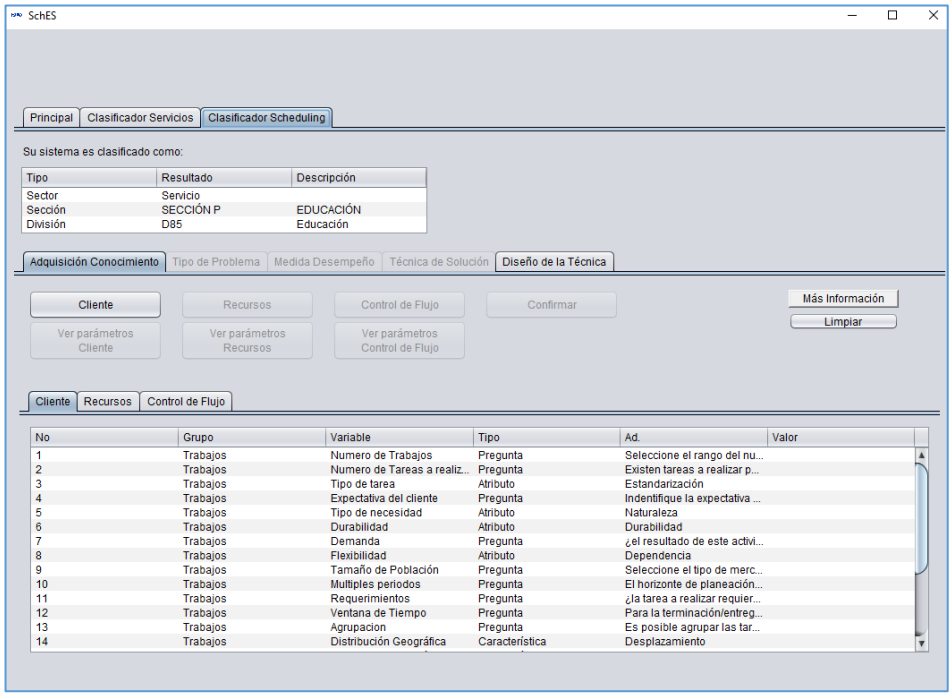


Figura P.15 Ventana de Clasificador Scheduling de SchES.
Fuente: Elaboración propia.

El CPT tiene una primera etapa de adquisición de conocimiento en la cual toma información de los atributos, las características y otra información adicional para transformarlo en las variables asociadas a cada parámetro de la notación $C|R|F$. Para esto se emplea un listado de preguntas, en el cual para cada variable se indica la pregunta o la fuente de información que puede ser atributos o característica. En total son 62 variables que corresponden al mismo número de interrogantes. En la siguiente figura se presenta el ejemplo del campo cliente, y funciona de forma similar para los demás campos.

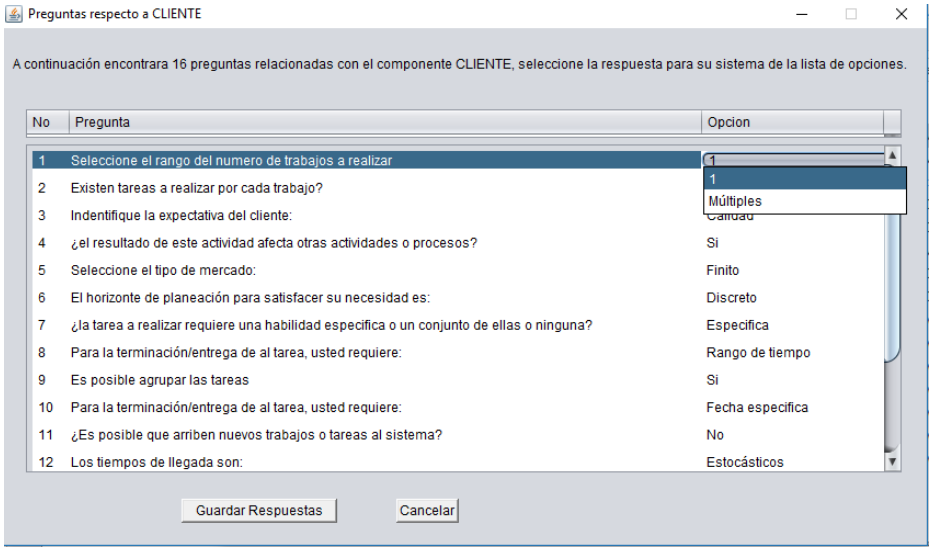


Figura P.16 Ventana de adquisición de conocimiento respecto a cliente en el Módulo Scheduling de SchES.
Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura se presentan el ejemplo de los resultados para el campo cliente al ejecutar el botón *Ver Parámetros Cliente*. Los demás funcionan de forma similar.



Figura P.17 Ejemplo de ventana de resultados de variables campo Cliente del Módulo Clasificador Scheduling de SchES.
Fuente: Elaboración propia.

Luego se presenta las tres pestañas que indican las ventanas para tipo de problema, medida de desempeño y técnica de solución, las cuales son el resultado de la ejecución del SE para CPT por medio de los SBR en forma de cascada. En la siguiente figura se presentan un ejemplo de las ventanas de tipo de problema, medida de desempeño y técnica de solución. Aquí el usuario ejecuta el clasificador de tipo de problema para los tres campos de la notación y se presentan los resultados en la tabla de acuerdo con el mejor porcentaje de clasificación, sin embargo, se puede seleccionar otra respuesta por cada componente y el usuario debe confirmar con un botón su selección para continuar con la medida de desempeño y el grupo de técnicas de solución. Cada pestaña funciona con los botones presentados de manera similar.

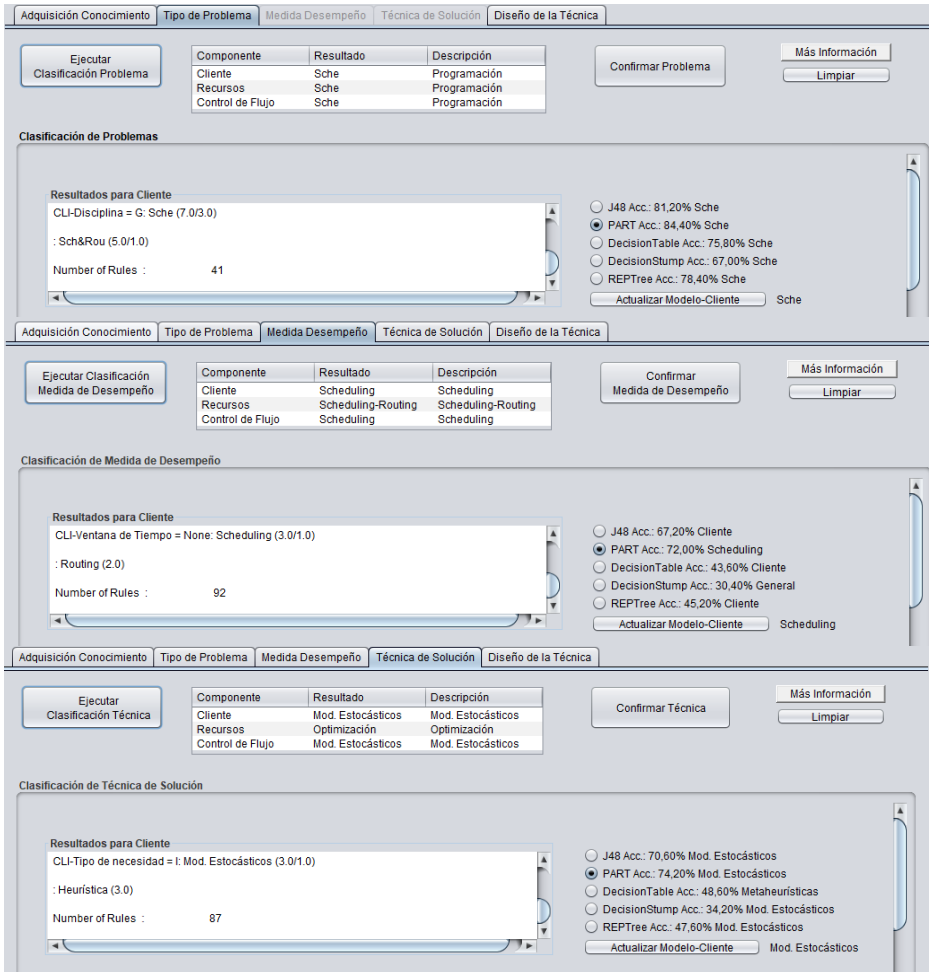


Figura P.18 Ventana de tipo de problema del Clasificador de Scheduling de SchES.
Fuente: Elaboración propia.

Por último, está la pestaña del diseño de la técnica. Un ejemplo de esta pestaña se presenta en la siguiente figura, en la cual se muestra el encabezado con los resultados alcanzados hasta el momento y los botones para la ejecución.

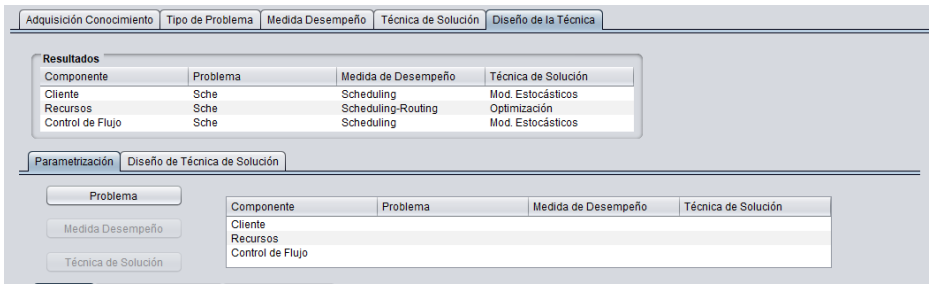


Figura P.19 Ventana de Diseño de la Técnica del Clasificador de Scheduling de SchES.
Fuente: Elaboración propia.

El proceso empieza con problema específico, luego medida desempeño y finalmente técnica de solución específica. En cada una de estas ventanas se encuentran diferentes opciones que

el usuario debe parametrizar. El flujo empieza cuando el usuario selecciona el componente como Conjunto o específicamente el campo de la notación de PTSS, luego está el área y la sub-área del problema. En las tablas aparece la información consultada (queries) de la base de conocimiento del CPT correspondientes indicando la frecuencia en la base de conocimiento y ordenando de la mayor a menor frecuencia. En la siguiente figura se presentan las ventanas que aparecen al ejecutar el botón *Problema*, primero debe seleccionar entre Conjunto o Separado y luego el problema en caso de ser Conjunto. Sin embargo, en la ventana inferior en las listas desplegables el usuario puede seleccionar los campos y ejecutar los filtros correspondientes.

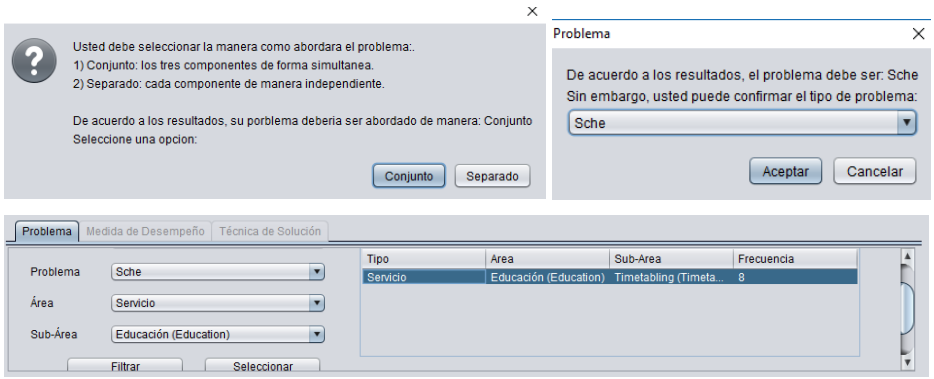


Figura P.20 Ventanas asociadas a la selección del problema específico del Diseño de la Técnica del Clasificador de Scheduling de SchES.
Fuente: Elaboración propia.

Para seleccionar el problema específico en caso de que aparezcan más de un problema, el usuario debe seleccionar el renglón y ejecutar el botón *Seleccionar*. De esta manera se habilitará el siguiente paso para la Medida de desempeño. En la siguiente figura se observa las ventanas asociadas al ejecutar el botón *Medida Desempeño*.

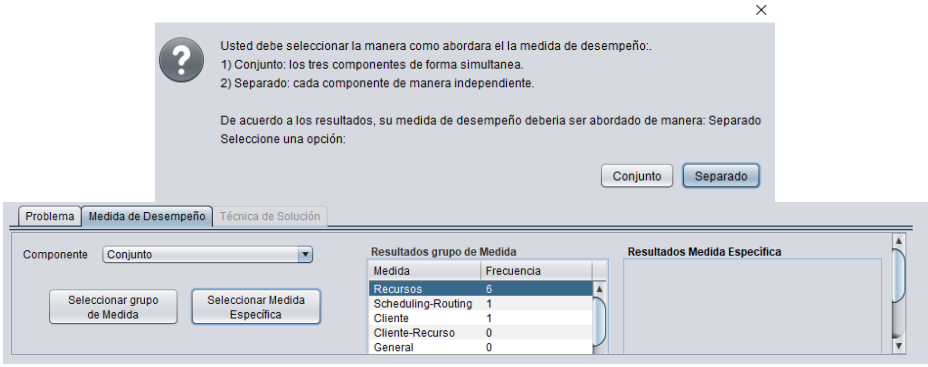


Figura P.21 Ventanas asociadas a la selección de la medida de desempeño específica del Diseño de la Técnica del Clasificador de Scheduling de SchES.
Fuente: Elaboración propia.

Una vez ejecutados los filtros que el usuario desee, para seleccionar el grupo de medida debe seleccionar un renglón de la tabla y ejecutar el botón *Seleccionar grupo de Medida*. Posteriormente, en caso de tener medida de desempeño específica, la manera de seleccionar es similar a la descrita para el grupo.

De manera similar trabaja la medida de desempeño: seleccionado grupo de medida y medida de específica con el botón correspondiente; y para la técnica de solución: seleccionando grupo

de técnica y técnica específica. En la siguiente figura se presentan las ventanas asociadas a la selección de la técnica de solución específica.

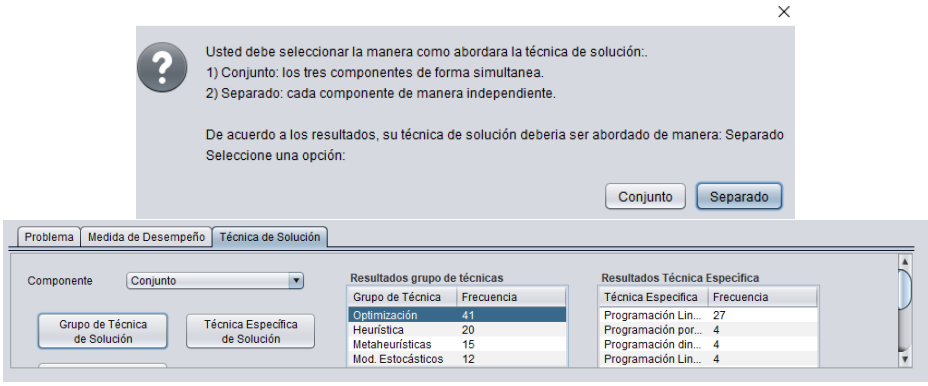


Figura P.22 Ventanas asociadas a la selección de la técnica de solución específica del Diseño de la Técnica del Clasificador de Scheduling de SchES.
Fuente: Elaboración propia.

En la ventana principal aparece una tabla de resumen de la selección realizada por el usuario como se muestra en la siguiente figura.

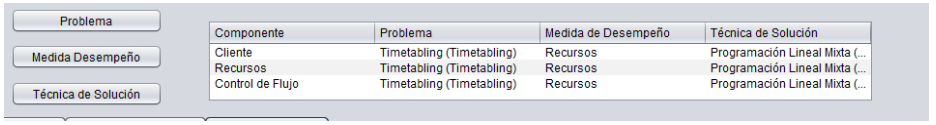


Figura P.23 Ejemplo de ventana de resumen de resultados del Diseño de la Técnica del Clasificador de Scheduling de SchES.
Fuente: Elaboración propia.

Una opción adicional en los resultados de la selección de técnica de solución específica es que el usuario puede consultar los documentos que corresponden a su selección, mediante un botón que le indicada al final del proceso de técnica específica y una nueva ventana se mostrara con los títulos, el año y la opción de abrir cada documento.

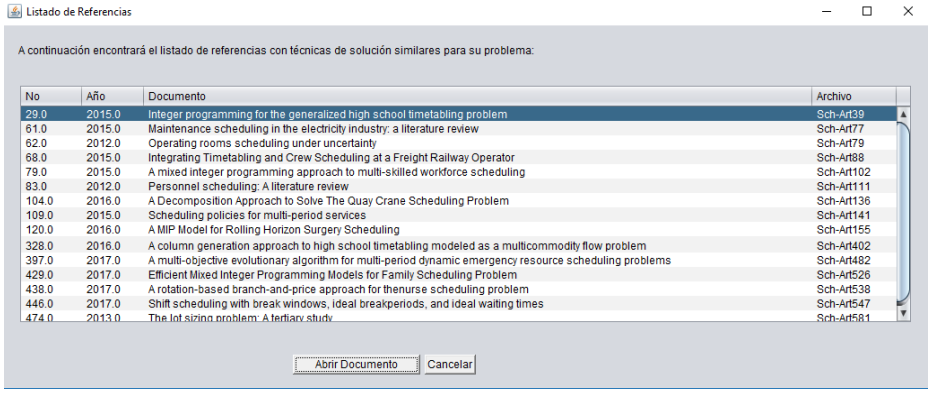


Figura P.24 Ejemplo de ventana de resumen de documentos de la técnica específica del Diseño de la Técnica del Clasificador de Scheduling de SchES.
Fuente: Elaboración propia.

Para consultar el documento, el usuario lo debe seleccionar como se muestra en la figura anterior y oprimir el botón *Abrir Documento*. En la siguiente figura se observa un ejemplo de documento consultado.



Figura P.25 Ejemplo de un documento consultado del Diseño de la Técnica del Clasificador de Scheduling de SchES.
Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se tiene la opción de grabar el resultado obtenido para alimentar con nueva información la base de conocimiento correspondiente al CPT.

Requerimiento de Lenguajes y librerías

El lenguaje de programación empleado para implementar SchES fue Java. Este es un lenguaje de propósito general, concurrente y orientado a objetos, que tiene como ventaja permitir la ejecución de las implementaciones desarrolladas sin la dependencia de la plataforma. Se seleccionó como entorno de desarrollo integrado (IDE) Eclipse ®, el cual es de código abierto para el desarrollo Java, con las tareas básicas como compilación de código y depuración, además cuenta con el entorno *Windows Builder* para el desarrollo de interfaz de usuario de un manera rápida y eficiente.

Por otro lado, se empleó software adicional para el desarrollo de los modelos de adquisición de conocimiento como Matlab 2018 ® (https://la.mathworks.com), para el motor de inferencia como WEKA ® (https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/), Microsoft SQL (https://docs.microsoft.com/en-us/sql/?view=sql-server-2017) para el manejo de bases de datos, y librerías específicas para la manipulación de datos y conexión entre las interfaces.

Matlab es una herramienta de software matemático con un IDE basado en un lenguaje de programación propio (lenguaje M), disponible para Windows y otras plataformas como IOS y Linux. Matlab permite la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario y la comunicación con programas en otros lenguajes (como Java). Adicionalmente, tiene unas cajas de herramientas (toolboxes) que permiten el desarrollo de aplicaciones específicas, como el de optimización, el de redes neuronales y lógica difusa y el de sistema de inferencia difusos.

WEKA (Waikato Environment for Knowledge Analysis, en español "entorno para análisis del conocimiento de la Universidad de Waikato") es un software para el aprendizaje de máquina y minería de datos desarrollado en Java por la Universidad de Waikato (Hall et al., 2009). Weka es software libre distribuido bajo la licencia GNU-GPL. Weka tiene una serie de tareas de minería de datos enfocadas principalmente en el preprocesamiento de datos, clustering, clasificación, regresión, visualización, y selección. Su principal ventaja es la

portabilidad y la interfaz de usuario que permite realizar experimentaciones de una forma rápida y sencilla. Adicionalmente, su conexión con Java es directa y permite el traspaso de información de una manera rápida y sencilla.

Microsoft SQL es un sistema de manejo de bases de datos del modelo relacional, desarrollado por Microsoft. SQL emplea un lenguaje de desarrollo mediante líneas de comandos o mediante la interfaz gráfica de Management Studio conocido como Transact-SQL (TSQL), una implementación del estándar ANSI del lenguaje SQL, utilizado para manipular y recuperar datos (DML), crear tablas y definir relaciones entre ellas (DDL). Este permite crear un servidor y manipulas bases de datos, además su conexión con el IDE de java es sencilla de implementar. Este software se empleó para el manejo de las bases de conocimiento que por su tamaño fueron difíciles de manejar en Excel y objetos directos de Java.

Las librerías empleadas fueron las proporcionadas dentro del IDE de Eclipse para el manejo de datos, importar y exportar información. Adicionalmente, se empleó un paquete externo llamado jfuzzylite 6.0 desarrollado por (Rada-Vilela, 2017), el cual consiste en una librería de java que permite la manipulación de conjuntos difusos y sistemas de inferencia difusos. Este paquete se utilizó para el manejo en Java de los modelos basados en ANFIS para el sistema de adquisición de conocimiento del CCSS.

Finalmente, todos los paquetes empleados se utilizaron bajo el licenciamiento académico para el desarrollo del prototipo computacional SchES.

Referencias

Hall, M., Frank, E., Holmes, G., Pfahringer, B., Reutemann, P., & Witten, I. H. (2009). The WEKA data mining software. ACM SIGKDD Explorations, 11(1), 10–18. https://doi.org/10.1145/1656274.1656278

López-Santana, E., & Méndez-Giraldo, G. (2015). Proposal for a rule-based classification system for service systems. In Proceedings of Fifth International Conference on Computing Mexico-Colombia and XV Academic Conference on Artificial Intelligence (pp. 1–8). Cartagena.

López-Santana, E., Méndez-Giraldo, G., & Rodriguez-Molano, J. ignacio. (2018). A Rule-Based System to Classify Scheduling Problems and Solution Techniques for Service Systems. In Y. Tan, Y. Shi, & Qirong Tang (Eds.), Data Mining and Big Data (Vol. 10943, pp. 445–455). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93803-5_42

López-Santana, E. R., & Méndez-Giraldo, G. A. (2016a). A Knowledge-Based Expert System for Scheduling in Services Systems. In J. C. Figueroa-García, E. R. López-Santana, & R. Ferro-Escobar (Eds.), Applied Computer Sciences in Engineering WEA 2016 (Vol. 657, pp. 212–224). Springer International Publishing AG. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50880-1_19

López-Santana, E. R., & Méndez-Giraldo, G. A. (2016b). A Non-linear Optimization Model and ANFIS-Based Approach to Knowledge Acquisition to Classify Service Systems. In D.-S. Huang, V. Bevilacqua, & P. Premaratne (Eds.), Intelligent Computing Methodologies (Vol. 9773, pp. 789–801). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42297-8_73

Rada-Vilela, J. (2017). fuzzylite: a fuzzy logic control library. Retrieved from http://www.fuzzylite.com/

Anexo Q Información complementaria Caso 1: servicios de mensajería

Este anexo este compuesto de cuatro apartados con información complementaria para el Caso 1. El primer apartado presenta los resultados de las muestras aplicadas para el CCSS. El segundo apartado muestra la información empleada para el CPT. El tercero apartado describe los modelos y algoritmos desarrollados de forma específica para el Caso 1 y en el cuarto apartado la información complementaria para los resultados obtenidos.

Anexo Q.1 Información de características de muestras para el CCSS del Caso 1

A continuación, se presentan los resultados de las encuestas a 6 muestras:

Tabla Q.1 Información de características de muestras para el CCSS del Caso 1

Características	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Presencia	Mas del 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Nunca	Nunca
Comportamiento	Mas del 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Nunca	Nunca
Continuidad	Mas del 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Nunca	Nunca
Abandono	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Nunca	Nunca
Operación	Nunca	Nunca	Nunca	Nunca	Nunca	Nunca
Autonomía	Entre el 30% y el 70% de las veces	Menos del 30% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Nunca	Nunca	Nunca
Influencia	Entre el 30% y el 70% de las veces	Menos del 30% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Nunca	Nunca
Almacenamiento	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces
Tiempo de almacenamiento	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces
Anticipación	Menos del 30% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces
Tiempo de espera	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces
Espacio	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces
Costo de almacenamiento	Mas del 70% de las veces	Siempre	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces
Uso de máquinas/equipos	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Siempre	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces
Uso de personas	Siempre	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces
Interacción	Entre el 30% y el 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces
Beneficiario	Siempre	Siempre	Siempre	Mas del 70% de las veces	Siempre	Siempre
Permiso	Siempre	Mas del 70% de las veces	Siempre	Siempre	Siempre	Siempre
Comercialización	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces
Personalización	Mas del 70% de las veces	Siempre	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces
Apariencia	Nunca	Nunca	Nunca	Nunca	Nunca	Nunca
Productos complementarios	Siempre	Siempre	Mas del 70% de las veces	Siempre	Siempre	Siempre
Consumo	Mas del 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces

Características	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Lugar	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Nunca	Nunca
Desplazamiento	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	siempre	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces
Programación de actividades	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces
Programación de recursos	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces
Estandarización	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces

Fuente: Elaboración propia.

Anexo Q.2 Información del CPT del Caso 1

A continuación, se presenta las respuestas obtenidas para cada campo de la notación en el CPT:

Tabla Q.2 Información de las respuestas de la notación para el CPT del Caso1

Campo	N	Componente	Parámetro	Tipo	Descripción	Valor obtenido
Cliente	1	Trabajos	Número de Trabajos	Pregunta	Seleccione el rango del número de trabajos a realizar	n
	2		Número de Tareas a realizar	Pregunta	¿Existen tareas a realizar por cada trabajo?	None
	3		Tipo de tarea	Atributo	Estandarización	C
	4		Expectativa del cliente	Pregunta	Identifique la expectativa del cliente:	S
	5		Tipo de necesidad	Atributo	Naturaleza	I
	6		Durabilidad	Atributo	Durabilidad	NP
	7		Demanda	Pregunta	¿el resultado de esta actividad afecta otras actividades o procesos?	I
	8		Flexibilidad	Atributo	Dependencia	Ass
	9		Tamaño de Población	Pregunta	Seleccione el tipo de mercado:	I
	10		Múltiples periodos	Pregunta	El horizonte de planeación para satisfacer su necesidad es:	P
	11		Requerimientos	Pregunta	¿la tarea a realizar requiere una habilidad especifica o un conjunto de ellas o ninguna?	None
	12		Ventana de Tiempo	Pregunta	Para la terminación/entrega de la tarea, usted requiere:	[e,l]
	13		Agrupación	Pregunta	Es posible agrupar las tareas	C
	14		Distribución Geográfica	Característica	Desplazamiento	G
	15	Proceso de Llegada - Arribos	Tiempo de liberación	Característica	Anticipación	r_j
	16		Tiempo de Entrega	Pregunta	Para la terminación/entrega de la tarea, usted requiere:	H
	17		Naturaleza	Pregunta	¿Es posible que arriben nuevos trabajos o tareas al sistema?	St
	18		Tiempo de llegada	Pregunta	Los tiempos de llegada son:	S
	19		Tamaño de Lote	Pregunta	Las llegadas son:	M
	20		Lugar de arribo	Pregunta	Los trabajos arriban a:	P
	21		Precedencia	Pregunta	Existe relación de precedencia entre los trabajos	None
	22		Disciplina	Pregunta	La disciplina de llegada de los trabajos es:	Rnd
Recurso	23	Fila - Cola	Capacidad Fila	Pregunta	¿El sistema tiene un máximo de clientes para recibir?	F
	24		Disciplina Fila	Pregunta	La disciplina en la fila de atención/espera es:	G
	25		Incumplimiento	Pregunta	¿Es posible que el cliente no se presente?	None
	26		Abandono	Característica	Abandono	None
	27		Procesamiento en la fila	Pregunta	¿Es posible realizar un procesamiento en la fila?	None
	28	Servidor	Número	Pregunta	Seleccione el número de servidores/recursos:	m
	29		Tipo	Pregunta	Seleccione el tipo de recursos:	Hom

Campo	N	Componente	Parámetro	Tipo	Descripción	Valor obtenido
	30		Agrupación	Pregunta	Es posible agrupar los servidores para el procesamiento /atención:	None
	31		Capacidad Servicio	Pregunta	Seleccione el tipo de capacidad:	C
	32		Tiempo de proceso	Pregunta	Los tiempos de proceso son:	S
	33		Competencias	Pregunta	¿los recursos tienen competencias específicas?	None
	34		Recursos	Pregunta	El tipo de recursos es:	Ren
	35		Disponibilidad	Pregunta	¿Posee turnos para el desarrollo de la actividad?	S
	36		Paradas	Pregunta	Tipos de Paradas de Mantenimiento:	None
	37		Tecnología	Característica	Uso de personas	A
	38		Ampliación de capacidad	Pregunta	Opciones para ampliación de Capacidad:	U-D
	39		Lugar	Pregunta	Seleccione el sitio donde el proveedor desarrollo la actividad:	C
	40		Lugar de origen	Pregunta	La base del proveedor es:	D
	41	Atenci ón-	Calidad	Característica	Tiempo de espera	C
	42		Lugar-Destino	Pregunta	¿Es un producto final?	Exi
	43		Disciplina	Pregunta	La disciplina en el proceso de atención es:	G
Control de Flujo	44	Propiedad	Acceso	Atributo	Propiedad	N
	45		Tiempo	Pregunta	En caso de tener acceso a la propiedad: es de tiempo:	None
	46		Cantidad	Pregunta	En caso de tener acceso a la propiedad: es de uso:	None
	47		Posibilidad rechazo /Sin Posibilidad de rechazo	Pregunta	¿El cliente puede rechazar el producto?	Rej
	48	Tipo de atención	Simultaneidad	Atributo	Simultaneidad	Off
	49		Agendado	Atributo	Agendado	Y
	50		Disciplina	Pregunta	La disciplina en el proceso de atención es:	G
	51		Lotes	Pregunta	Seleccione el tipo de procesamiento:	U
	52		Personalización	Característica	Influencia	C
	53		Elegibilidad Maquinas	Característica	Influencia	M
	54		Consumo de recursos	Pregunta	El tipo de recursos es:	Ren
	55	Movimiento	Ruta	Atributo	Estandarización	V
	56		Recirculación	Pregunta	¿es posible reprocesar?	N
	57		No espera	Característica	Tiempo de espera	N-w
	58		Interrupción de actividades	Pregunta	¿es posible fraccionar el desarrollo de la actividad?	None
	59		Inventario	Atributo	Acumulación	N
	60		Agrupación de tareas	Pregunta	Seleccione el tipo de procesamiento en los servidores:	C
	61		Sincronización de tareas	Característica	Programación de recursos	Y
	62		Sincronización de recursos	Pregunta	Es posible agrupar los servidores para el procesamiento /atención:	None

Fuente: Elaboración propia.

Anexo Q.3 Modelos desarrollados para solución del caso 2

En este anexo se presenta un resumen de la solución desarrollada para el caso 2 de servicios de mensajería presenta en (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018). Se considera un conjunto de clientes $V_c = \{1,2,\dots,N\}$ $\mathrm{V_c} = \{1,2,\dots,\mathrm{N}\}$geográficamente distribuidos, en donde cada cliente está esperando un producto. Los vehículos que visitan los clientes son idénticos $K = \{1,2,\dots,m\}$ y pertenecen a un depósito central $\{0\}$ el cual se considera el punto de inicio y fin de todos los vehículos. Todos los clientes deben ser visitados una única vez por un solo vehículo durante el periodo de planeación de p días. El problema se puede definir como un grafo completo dirigido $G = \{V, A\}$ en donde $V = V_c\ U\ \{0\}$ es el conjunto de vértices y $A = \{(i,j): i,j \in V, i \neq j\}$ es el conjunto de arcos. Cada arco (i,j) tiene un valor no negativo asociado $\mathrm{c_{ij}}$ el cual representa la distancia desde i hasta j. El objetivo es establecer el conjunto de rutas a seguir por los vehículos de forma tal que se minimice la

distancia total recorrida por todos los vehículos y se visiten todos los clientes. Los supuestos para la formulación del problema analizado se enlistan a continuación:

- El tiempo de visita es igual para todos los clientes y todos los vehículos.
- Los clientes tienen asociada una ventana de tiempo dura.
- Los clientes tienen una fecha límite de gestión para ser visitados (Due Date).
- Todos los vehículos son homogéneos y tienen la misma capacidad de carga.
- Cada vehículo tiene un tiempo máximo disponible para los desplazamientos y tiempos de visita, delimitado por un horario.
- Todos los vehículos empiezan y terminan en el depósito central.
- Los tiempos de viaje son determinísticos y cumplen la desigualdad del triángulo.

En la Tabla Q.3 se resumen conjuntos, parámetros y variables que se utilizaran para formular el modelo matemático de cada una de las etapas descritas en la sección anterior.

Tabla Q.3 Notación del problema

Conjuntos	V_c: conjunto de clientes V:conjunto de vertices A:conjunto de arcos P:conjunto de días que componen el horizonte de planeación V_p:conjunto de vértices a visitar por día A_p:conjunto de arcos que unen los vertices a visitar por dia V_{pk}:conjunro de vértices a visitar por día por el vehículo k A_{pk}:conjunro de arcos que unen los vértices a visitar por día por el vehículo k K:conjunto de vehiculos
Parámetros	N:número de clientes m:número de vehículos Tv:tiempo estandar de visita Q:capacidad de carga de los vehículos CH:costo por hora de los vehículos d_j.demanda del cliente j e_j: límite inferior ventana de tiempo cliente j l_j: límite superior ventana de tiempo cliente j n_k: limite inferior horario disponible vehículo k p_k: límite superior horario disponible vehículo k R_k: tiempo de recorrido máximo para el vehículo k c_{ij}: distancia entre los arcos en km $(i,j) \in A$ VP: velocidad promedio en km/hora t_{ij}:tiempo de desplazamiento en horas para los arcos $(i,j) \in A$ F_k:costo fijo asociado al vehiculo k h_j:fecha cita del cliente j G_j:fecha límite de visita del cliente j D:capacidad de visitas promedio por hora de los vehículos HD:Horas disponibles totales de todos los vehiculos
Variables Binarias	z_{jp}:si el cliente j es visitado en el periodo p y_{jk}: si el cliente j es visitado por el vehiculo k x_{ij}:si el arco (i,j)es utilizado para la solución optima y_k:si el vehiculo k es utilizado
Variables Enteras	N_p:cantidad de clientes a visitar el dia p
Variables Continuas	S_j:inicio de visita en el cliente j u_j:carga acumulada entregada hasta el cliente j

Fuente: (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018)

En esta sección se resumen los supuestos sobre los cuales está construida la propuesta, los cuales se enlistan a continuación:

- No todos los clientes serán visitados en el horizonte de planeación, se priorizan los clientes más importantes hasta utilizar la máxima capacidad disponible.

- Los tiempos de visita y los tiempos de desplazamiento se consideran determinísticos.
- Los vehículos están asociados a un depósito central.
- En la etapa de programación se deben cumplir las fechas de citas de los clientes, es decir, siempre un documento debe ser programado a ruta en la fecha de su cita.
- No todos los clientes tienen cita y pueden ser visitados en cualquier día, preferiblemente antes de su fecha de vencimiento.
- Las fechas de vencimiento no son estrictas, sin embargo, los clientes que envían los paquetes o documentos exigen que la gran mayoría sea visitada en tiempo.
- El nivel de servicio en cada día se mide como el cumplimiento las ventanas de tiempo de los clientes que tenían cita, es decir, la cantidad de clientes con una ventana de tiempo y fueron efectivamente visitados sobre el total de clientes con una ventana de tiempo asociada.

Etapa de programación:

Se realiza para todos los clientes que deben ser visitados en el horizonte de planeación. Esta se puede representar como el siguiente modelo de programación matemática:

$$Min \quad \frac{\sum_{p\in H}\sum_{\substack{i\in V\\ i\neq j}}\sum_{j\in V} c_{ij} z_{jp}}{N} \qquad \text{(Q-1)}$$

Sujeto a:

$$z_{jp} = f(h_j, G_j, c_{ij}, Q, m, HD, D) \qquad \forall\, j \in V, p \in P \qquad \text{(Q-2)}$$

$$\sum_{p\in P} z_{jp} = 1 \qquad \forall\, j \in V \qquad \text{(Q-3)}$$

$$\sum_{j\in V} z_{jp} \leq HD \cdot D \qquad \forall\, p \in H \qquad \text{(Q-4)}$$

$$z_{jp} \in \{0,1\} \qquad \forall\, j \in V, p \in H \qquad \text{(Q-5)}$$

La función objetivo (Q-1) busca minimizar la distancia promedio entre todos los clientes a visitar en cada día del horizonte de planeación, logrando así maximizar la concentración de las zonas a visitar. La restricción (Q-2) representa la relación que existe entre la asignación de un cliente a un día en función de las fechas de citas de los clientes, las fechas límites de visita de los clientes, la capacidad máxima de carga de los vehículos, la cantidad de vehículos disponibles, la capacidad promedio de visitas por hora de los vehículos y las horas disponibles totales de los vehículos. En esta etapa de programación, esta relación se representa bajo un conjunto de reglas que componen un sistema experto, las cuales incluyen reglas básicas para cumplir las restricciones, un ejemplo es la fecha de cita y también reglas de prioridad, algunos ejemplos son, priorizar clientes que están muy cerca de su fecha límite de visita, priorizar clientes que no tienen una cita y se encuentran cerca de otro que si tiene para ser programados en la misma fecha. La restricción (Q-3) asegura que cada cliente tenga asignada una fecha de visita en el horizonte de planeación. La restricción (Q-4) controla la cantidad máxima de documentos que se pueden programar para ser visitados cada día de acuerdo a la capacidad disponible. Por último, la restricción (Q-5) define la variable binaria utilizada.

En el caso de los servicios de mensajería la programación es desempeñada por trabajadores que utilizan principalmente su experiencia para determinar qué día del horizonte de planeación debe ser visitado cada cliente, teniendo en cuenta las variables, tales como, las fechas de citas de los clientes, las fechas límites de visita de los clientes, la capacidad máxima de carga de los vehículos, etc. Esta experiencia de los trabajadores requiere ser representada en un modelo que permita cumplir eficazmente la programación y evite la posibilidad de errores humanos, por lo cual, proponemos sintetizar esta experiencia en un sistema experto,

el cual en términos generales emplea conocimiento humano capturado en una computadora para resolver problemas que normalmente requieran de expertos humanos.

Las reglas que se diseñaran a partir de la experiencia de los trabajadores, el sistema experto utilizara como función de desempeño, la ecuación establecida en (Q-1), es decir, la minimización de la distancia promedio entre todos los clientes a visitar en cada día del horizonte de planeación. Los principales componentes que harán parte del sistema experto son la base de conocimiento y el motor de inferencia, en las siguientes secciones se describen cada uno de estos.

Base de conocimiento: A través de un proceso de revisión documental de los procedimientos internos, los acuerdos de servicio y también mediante entrevistas a los empleados que desarrollan las actividades de programación, los cuales se pueden considerar pseudo-expertos, se formularan las reglas del tipo Si (condición) entonces (acción), la cuales en su conjunto crean la base de conocimiento.

Motor de Inferencia: De acuerdo con Chen (2004) el motor de inferencia es un interpretador de reglas que decide cuando aplicar las reglas. A partir de esta definición, se agruparán las reglas de la base de conocimiento en tres módulos, para ser aplicadas en forma ordenada y secuencial.

- *Módulo 1 Reglas estáticas***:** El primer módulo está compuesto reglas que se denominan estáticas porque se aplican a todos los paquetes de los clientes a visitar del inventario disponible. Estas reglas se basan en los procedimientos internos y en los acuerdos de servicio con los clientes. El resultado es la modulo es la modificación de un atributo denominado estado de ruta, este atributo puede asumir tres valores: pendiente, descartado y programado. Si se cumpla alguna regla el atributo cambia a "descartado". Si no se cumple ninguna de las reglas del módulo el atributo queda con valor "pendiente".
- *Módulo 2 Citas*: El segundo módulo contiene una sola regla, sin embargo, es la más importante y la base de aplicación del siguiente modulo. La regla consiste en evaluar si el cliente tiene una cita asignada dentro del horizonte de planeación, si es así, cambia el estado de ruta a programado y hace igual la fecha de ruta a la fecha de cita.
- Módulo 3 Reglas dinámicas: El tercer módulo contiene un conjunto de reglas que se activan solo si se requieren. Estas reglas fueron diseñadas para aprovechar la ventaja de los sistemas expertos, que consiste en búsquedas intensivas, es decir, en lugar realizar esfuerzos computacionales aplicando repetidamente diferentes reglas a los mismos hechos, los esfuerzos se encaminan en buscar en una base grande hechos, aquellos que activen las reglas. Estas reglas se construyen a partir de la experiencia y conocimiento de los pseudo-expertos que programan las rutas.

Etapa de zonificación:

Se realiza por cada día del horizonte de planeación. El modelo matemático se presenta a continuación:

$$Min \ \frac{\sum_{k\in K}\sum_{i\in Vp} c_{ij}y_{jk}}{N_p} \qquad \text{(Q-6)}$$

Sujeto a:

$$e_j - n_k y_{jk} \geq 0 \qquad \forall\, j \in V_p, k \in K \qquad \text{(Q-7)}$$

$$\sum_{j\in V_p} d_j y_{jk} \leq Q \qquad \forall\, k \in K \qquad \text{(Q-8)}$$

$$y_{jk} \in \{0,1\} \qquad \forall\, j \in Vp \qquad \text{(Q-9)}$$

La función objetivo (Q-6) busca minimizar la distancia promedio entre todos los clientes a visitar por el vehículo k. La restricción (Q-7) asegura que los clientes con ventanas de tiempo

sean asignados a vehículos que su horario empiece antes de dicha ventana. La restricción (Q-8) controla que no se sobrepase la capacidad máxima de carga de los vehículos. La restricción (Q-9) define la variable binaria utilizada.

Para la solución de esta etapa existen diferentes métodos que permiten agrupar los clientes, para este proyecto se probaron las siguientes opciones que se utilizaron en el artículo de (Patiño Chirva et al., 2016), con el fin de modificarlas para que consideren las ventanas de tiempo que tienen los clientes y los horarios disponibles de los vehículos.

Heurística de asignación basada en centros geométrico: Esta heurística parte de la geometría de los centros geométricos, alrededor de los cuales se genera el entorno del clúster. Este método se divide en dos fases (Shin & Han, 2012).

En la primera fase, se inicia seleccionando el nodo más distante del origen, dentro de los nodos que no han sido previamente asignados, y se genera un clúster; después se debe calcular el centro geométrico (Q-10) entre estos nodos, donde w_i^x y w_i^y son las coordenadas en x, y de los nodos que pertenecen al clúster.

$$CG(l_i) = \left(\sum_{i=0}^{m} w_i^x / m \ , \sum_{i=0}^{m} w_i^y / m \right) \qquad \text{(Q-10)}$$

Los nodos más cercanos al centro geométrico se van adicionando teniendo en cuenta la capacidad definida de cada clúster, la cual corresponde a la capacidad de un vehículo, las ventanas de tiempo asociadas a los clientes y los horarios disponibles de los vehículos. En la Tabla Q.4 se muestra el procedimiento de la primera fase, en negrilla y subrayado se encuentran las modificaciones realizadas con respecto a la heurística original para considerar las ventanas de tiempo.

Tabla Q.4 Heurística de asignación basada en centros geométricos Fase 1

Inicialización Fase 1
Sea $\mathbf{i = 0}$ y **Q = Capacidad de cada vehículo**
Mientras (exista un paquete sin clúster)
$\mathbf{v_j}$: El cliente más lejano al origen entre todos los paquetes sin clúster
Si la ventana de tiempo del cliente $\mathbf{v_j}$ está en contenida en el horario del clúster $\mathbf{l_i}$ o viceversa
Generar el clúster $\mathbf{l_i}$ con el cliente $\mathbf{v_j}$
Establecer la capacidad del clúster $\mathbf{l_i}$ = **Q**
Mientras (La demanda de los clientes $\mathbf{v_j}$ no excedan la capacidad de $\mathbf{l_i}$)
Adicionar el cliente $\mathbf{v_j}$ al clúster $\mathbf{l_i}$
Reducir la capacidad disponible de $\mathbf{l_i}$ tanto como la demanda del cliente $\mathbf{v_j}$
Calcular $\mathbf{CG(q_i)}$
Si la ventana de tiempo del cliente $\mathbf{v_j}$ está en contenida en el horario del clúster $\mathbf{l_i}$ o viceversa
$\mathbf{v_j}$: Nodo más cercano al $\mathbf{CG(l_i)}$
Fin si
Fin Mientras
$\mathbf{i = i + 1}$
Fin Si
Fin Mientras
Fin Fase 1

Fuente: Tomado de (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018).

Después de generar los clústeres, se deben ajustar en una segunda fase mediante el procedimiento mostrado en la Tabla Q.5.

Tabla Q.5 Heurística de asignación basada en centros geométricos Fase 2

Inicialización Fase 2
Establecer $\boldsymbol{L = \{l_0, l_1, \dots, l_m\}}$, el cual es el conjunto de clúster generados en la fase
Para $\mathbf{i = 0}$ hasta $\mathbf{m}$ se debe repetir
Para cada paquete $\mathbf{v_k}$ del clúster $\mathbf{l_i}$ y
Para cada clúster $\mathbf{l_i}$ en **L**.
Si la ventana de tiempo del cliente $\mathbf{v_j}$ está en contenida en el horario del clúster $\mathbf{l_i}$ o viceversa
Si ($\mathbf{i \neq j}$ y $\mathbf{v_k}$ es más cercano a $\mathbf{CG(l_j)}$ que a $\mathbf{CG(l_i)}$ y la demanda del cliente $\mathbf{v_k}$ es menor o igual que la capacidad disponible del clúster $\mathbf{l_i}$)
Mover el cliente $\mathbf{v_k}$ de $\mathbf{l_i}$ a $\mathbf{l_j}$
Recalcular $\mathbf{CG(l_j)}$ y $\mathbf{CG(l_i)}$
Fin si
Fin si
Fin Para
Fin Para
Fin Para
Fin Fase 2

Fuente: Tomado de (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018).

Heurística de barrido: La heurística de barrido forma los clústeres a partir de un punto de origen desde el cual despliega una semirrecta y la rota en la zona en donde se encuentran los diferentes nodos a asignar. El área abordada en el proceso de barrido constituye el clúster, siempre que cumpla con la restricción de capacidad indicada para cada uno de éstos (Olivera, 2004). Al igual que la heurística basada en centros geométricos, se modificó la heurística de barrido para que tenga en cuenta las ventanas de tiempo asociadas a los clientes y los horarios disponibles de los vehículos. En la Tabla Q.5 se muestra el procedimiento del algoritmo, también en negrilla y subrayado se resaltan las modificaciones realizadas.

Tabla Q.5 Heurística de barrido

Inicialización Fase 1
Sea $\boldsymbol{i = 0}$ y $\boldsymbol{Q = Capacidad\ de\ cada\ vehículo}$
Calcular coordenadas polares de los clientes $(\boldsymbol{\rho_i, \theta_i})$
Ordenar los clúster $\boldsymbol{C_k}$ por horario
Ordenar a los clientes según en valor de $\boldsymbol{\theta_i}$
Si $(\boldsymbol{\theta_i = \theta_{i+1}})$
Organizar a los clientes en orden ascendente según el valor de $\boldsymbol{\rho_i}$
Fin si
Fin Fase 1
Generación de clúster Fase 2
Para $\boldsymbol{k}$ desde primer hasta el último clúster en $\boldsymbol{C_k}$
Seleccionar un cliente inicial $\boldsymbol{v_j}$
Hacer $\boldsymbol{k = 1}$ y $\boldsymbol{C_k = \{v_j\}}$
Mientras (exista un cliente sin clúster)
Seleccionar el siguiente cliente $\boldsymbol{v_{j+1}}$
Si la ventana de tiempo de $\boldsymbol{v_j}$ está en contenida en el horario del clúster $\boldsymbol{C_k}$ o viceversa
Si (La demanda del cliente $\boldsymbol{v_{j+1}}$ respetan la restricción de capacidad del vehículo)
Hacer
$\boldsymbol{C_k = C_k \cup \{v_j\}}$
Si no
Salir del para
Fin si
Fin si
Fin mientras
Fin para
Fin Fase 2

Fuente: Tomado de (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018).

Etapa diseño de rutas:

Se realiza por cada vehículo y por cada día del horizonte de planeación. Para considerar las ventanas de tiempo se calcula el tiempo de desplazamiento $t_{ij} = c_{ij}/VP$. El modelo matemático se describe a continuación:

$$Min \sum_{i \in V} \sum_{\substack{j \in V \\ j \neq i}} t_{ij} CH x_{ij} \qquad \text{(Q-11)}$$

Sujeto a:

$$\sum_{\substack{j \in V_k \\ j \neq i}} x_{ij} = 1 \qquad \forall\, i, j \in V_k \qquad \text{(Q-12)}$$

$$\sum_{\substack{i \in V_k \\ i \neq j}} x_{ij} - \sum_{\substack{i \in V_k \\ i \neq j}} x_{ji} = 0 \qquad \forall\, j \in V_k \qquad \text{(Q-13)}$$

$$(u_i + d_j - u_j) \leq M(1 - x_{ij}) \qquad \forall\, i \in V_k, j \in V_k, i \neq j \qquad \text{(Q-14)}$$

$$(u_i + d_j - u_j) \geq -M(1 - x_{ij}) \qquad \forall\, i \in V_k, j \in V_k, i \neq j \qquad \text{(Q-15)}$$

$$u_i \leq Q \qquad \forall\, i \in V_k \qquad \text{(Q-16)}$$

$$s_i + t_{ij} + Tv - M(1 - x_{ij}) \leq s_j \qquad \forall\, (i, j) \in A' \qquad \text{(Q-17)}$$

$$e_j \sum_{i \in V_k} x_{ji} \leq s_j \leq l_j \sum_{i \in V_k} x_{ji} \qquad \forall\, j \in V_k \qquad \text{(Q-18)}$$

$$n_k \leq s_j \leq p_k \qquad \forall\, j \in \{0, n+1\} \qquad \text{(Q-19)}$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall\, i, j \in V_k, i \neq j \qquad \text{(Q-20)}$$

$$u_j \geq 0 \qquad \forall\, j \in V_k \qquad \text{(Q-21)}$$

La función objetivo (Q-11) busca minimizar los costos de visitar los clientes multiplicando los tiempos de desplazamientos de todas las rutas por el costo de una hora trabajada de un vehículo. La restricción (Q-12) asegura que cada cliente sea visitado una vez. La restricción (Q-13) permite la conservación del flujo regulando que cada vehículo después de visitar un cliente salga a visitar otro punto. Las restricciones (Q-14) y (Q-15) asignan los valores a las variables de carga acumulada y previenen que se formen sub-rutas. La restricción (Q-16) asegura que la capacidad de carga de los vehículos no se exceda. La restricción (Q-17) asegura que se cumplan las ventanas de tiempo de los clientes. Las restricciones (Q-18) y (Q-19) controlan que las rutas a realizar por parte de los vehículos estén dentro de sus horarios disponibles. Las restricciones (Q-20) corresponden a la definición de la variable binaria. Por último, la restricción (Q-21) asegura que los tiempos de inicio de las visitas no pueden ser negativos.

Finalmente, después de lograr asignar para cada día del horizonte de planeación un conjunto de clientes a visitar por cada vehículo, se obtiene como resultado poder simplificar el problema de ruteo de vehículos hasta un TSP con ventanas de tiempo y restricciones de distancia y horario en la capacidad.

Para la solución de este problema se propone utilizar la metaheurística de colonia de hormigas porque el TSP con ventanas de tiempo (TSPTW) se considera un NP-completo, es decir, pertenece a los problemas de optimización combinatoria que son difíciles de resolver y de acuerdo con (Glover & Kochenberger, 2003), la colonia de hormigas ha tenido numerosas implementaciones exitosas en una amplia gama de diferentes problemas de optimización combinatoria. Según (Glover & Kochenberger, 2003) para estos problemas muy a menudo los algoritmos de ACO son acoplados con capacidades adicionales, tales como optimizadores locales para problemas específicos, que toman las soluciones de las hormigas a los óptimos locales. Algunos ejemplos recientes de estas exitosas aplicaciones de ACO para el TSPTW las

podemos encontrar en los artículos de (Kara & Derya, 2015), (López-Ibáñez & Blum, 2010), (C.-B. Cheng & Mao, 2007) y (Favaretto et al., 2004).

Además, si se toma en cuenta que la colonia de hormiga también se ha utilizado para el VRPTW más propuestas se pueden encontrar tales como (Ding et al., 2012), (Pureza et al., 2012) y (Yu et al., 2011).

Metaheurística para la etapa de Diseño de rutas :con el fin de determinar el orden de visita de los clientes asignados a cada vehículo en la etapa de zonificación (clustering), considerando las ventanas de tiempo de los clientes y el horario de los vehículos. Se seleccionó el estudio realizado por (C.-B. Cheng & Mao, 2007) porque contiene una detallado paso a paso del funcionamiento del algoritmo que propusieron, lo cual facilita su implementación en un lenguaje de programación y por ende la solución consecutiva de un gran número de rutas.

En su estudio Cheng & Mao (2007) desarrollaron un algoritmo de hormigas modificado, llamado ACS-TSPTW (Ant Colony System-TSPTW), basado en la técnica ACO para resolver el TSPTW. Dos heurísticas locales están integradas en el algoritmo ACS-TSPTW para gestionar las limitaciones de ventana de tiempo del problema. A continuación, se describirán los principales componentes del ACS-TSPTW.

1. ACS (Ant Colony System)

El algoritmo ACS define la cantidad de feromona depositada para cada camino $(\mathrm{i},\mathrm{j}), \forall\ (\mathrm{i},\mathrm{j}) \in \mathrm{A}$ con actualización global y local. La actualización local se define por la ecuación (Q-22).

$$\tau_{ij}(t) = (1 - \varpi)\tau_{ij}(t-1) + \varpi\Delta\tau_{ij}(t) \qquad \text{(Q-22)}$$

Donde $\tau_{ij}(t)$ es la cantidad de feromona en el camino i, j para el tiempo t, $0 < \varpi < 1$ es la taza de evaporación local y $\Delta\tau_{ij}(t)$ es el incremento de feromona en el camino i, j dado por la función (Q-23).

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \begin{cases} L^*, Si\ (i,j) \in T^* \\ 0,\ en\ otro\ caso \end{cases} \qquad \text{(Q-23)}$$

Donde L* es la distancia recorrida por el mejor camino T*. Y la actualización global va dada por la ecuación (Q-24).

$$\tau_{ij}(t) = (1 - \theta)\tau_{ij}(t-1) + \theta\ \Delta\tau_{ij}(t) \qquad \text{(Q-24)}$$

Donde $0 < \theta < 1$es la taza de evaporación global

Regla de transición de nodo. La decisión de moverse al siguiente nodo j se toma con la función (Q-25).

$$j = \begin{cases} \arg\max_{z \in N_i} \tau_{ij}(t)(g_{ij})^{\beta}(h_{ij})^{\gamma}, if\ q \le q_0 \\ S\ ,\ \ en\ otro\ caso \end{cases} \qquad \text{(Q-25)}$$

2. Heurísticas locales

$\mathrm{g_{ij}}$ y $\mathrm{h_{ij}}$ son heurísticas que se definirán a continuación y (β, γ) son parámetros definidos por el usuario que determinan la importancia de $\mathrm{g_{ij}}$ y $\mathrm{h_{ij}}$. S es el resultado de la función probabilística (Q-26).

$$P_{ij} = \begin{cases} \dfrac{\tau_{ij}(t)(g_{ij})^{\beta}(h_{ij})^{\gamma}}{\sum_{z \in N_i}\tau_{iz}(t)(g_{iz})^{\beta}(h_{iz})^{\gamma}}, para\ j \in N_i \\ 0, en\ otro\ caso \end{cases} \qquad \text{(Q-26)}$$

Donde $\mathrm{N_i}$ Es el conjunto de nodos que la hormiga no ha visitado en este recorrido.

La heurística local $\mathrm{g_{ij}}$ aumenta la importancia de los nodos cercanos a su hora de cierre y se define con la función (Q-27).

$$g_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{1+\exp\left(\delta(G_{ij}-\mu)\right)}, si\ G_{ij} \geq 0 \\ 0, en\ otro\ caso \end{cases} \quad \text{(Q-27)}$$

Donde G_{ij} Es el tiempo restante para que el nodo j cierre y se define como $G_{ij} = b_j - t_j$ siendo b_j el tiempo para que el nodo j cierre y t_j el tiempo actual, δ controla la curva de probabilidad y μ se define como el promedio de $G_{ij} \geq 0$.

La heurística local h_{ij} aumenta la importancia de los nodos cercanos a su hora de entrada y se define con la función (Q-28).

$$h_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{1+\exp\left(\lambda(H_{ij} - v)\right)}, si\ H_{ij} \geq 0 \\ 1, en\ otro\ caso \end{cases} \quad \text{(Q-28)}$$

Donde H_{ij} Es el tiempo restante para que el nodo j abra y se define como $H_{ij} = a_j - t_j$ siendo a_j el tiempo para que el nodo j abra y t_j el tiempo actual, λ controla la curva de probabilidad y v se define como el promedio de $H_{ij} \geq 0$. Notese que $h_{ij} = 1$ Cuando H_{ij} es negativo, es decir que les da máxima prioridad a los nodos abiertos.

3. Notación del algoritmo

En la Tabla Q.6 se resume la notación principal utilizada para el ACS-TSPTW.

Tabla Q.6 Notación ACS-TSPTW

$\tau_{ij}(t)$: Feromona del nodo i al j durante la iteración t
$\Delta\tau_{ij}(t)$: Actualización de feromona del nodo i al j durante la iteración t
A: Conjunto de caminos entre nodos, Matriz de tamaño n*n
N_i: Caminos que faltan por recorrer por la hormiga actual
g_{ij}: Heurística que aumenta la importancia de los nodos cercanos a su hora de cierre
h_{ij}: Heurística que aumenta la importancia de los nodos que no requieren de tiempo de espera
T*: Mejor camino actual
L*: Tiempo de recorrido del mejor camino actual

Fuente: Tomado de (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018).

4. Procesamiento del ACS-TSPTW

Los pasos básicos de procesamiento en ACS-TSPTW se encuentran a continuación:

Tabla Q.7 Procesamiento ACS-TSPTW

Paso 0	Fijar t = 0, o t = tiempo de inicio de ruta. Fijar valores iniciales $\tau_{ij}(t)$ Para todo $(i,j) \in A$ Poner m hormigas en el depósito, o en un nodo aleatorio. Fijar $\Delta\tau_{ij}(t) = 0$ Para todo $(i,j) \in A$
Paso 1	Construcción de ruta: Para i=0 hasta n: (Con n siendo el número de nodos) Para cada k = 1 hasta m: Si N_i No está vacío Paso 1.1 Heurísticas locales: Calcular g_{ij} y h_{ij} Para todo $j \in N_i$ siguiendo las ecuaciones (Q-27) y (Q-28) Si $g_{ij} = 0\ \forall\ j \in N_i$ Continuar con el siguiente K (no más caminos factibles) Paso 1.2 Movimiento: Elegir el siguiente nodo j siguiendo las reglas dadas en las ecuaciones (Q-25) y (Q-26) Eliminar j de N_i
Paso 2	Memorizar el mejor camino encontrado hasta ahora T* y su tiempo de viaje L*
Paso 3	Restaurar $N_i = \mathcal{N}$ para cada hormiga
Paso 4	Actualización local: Para todo $(i,j) \in A$: Actualizar la feromona de acuerdo a la ecuación (Q-22)
Paso 5	Actualización local: Para todo $(i,j) \in$ T*:

	Actualizar la feromona de acuerdo a la ecuación (Q-24)
Paso 6	Criterio de parada: Si el criterio de parada se cumple entonces detenerse, de otra forma: Ir al paso 1

Fuente: Tomado de (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018).

Anexo Q.4 Información de resultados para el Caso 1 servicios de mensajería

La capacidad total es de 2.700 visitas diarias y está compuesta por 75 vehículos con sus respectivos horarios y capacidades, lo cuales se resumen en la siguiente tabla:

Tabla Q.8 Horarios y capacidad de los Vehículos para el caso 1

k	Q_k	n_k	p_k	k	Q_k	n_k	p_k	k	Q_k	n_k	p_k
1	60	8:00:00	18:00:00	26	30	10:30:00	16:00:00	51	38	8:00:00	13:30:00
2	40	8:00:00	15:00:00	27	25	8:00:00	12:00:00	52	38	8:00:00	14:00:00
3	25	9:00:00	14:00:00	28	35	10:00:00	17:00:00	53	38	8:00:00	14:00:00
4	20	9:30:00	14:00:00	29	35	10:30:00	17:00:00	54	38	8:00:00	14:00:00
5	30	10:00:00	16:00:00	30	25	8:00:00	12:00:00	55	41	8:00:00	14:30:00
6	30	10:00:00	16:00:00	31	25	8:00:00	12:00:00	56	41	8:00:00	14:00:00
7	30	8:00:00	14:00:00	32	35	10:00:00	17:00:00	57	41	8:00:00	14:30:00
8	30	8:00:00	14:00:00	33	30	10:00:00	16:00:00	58	41	8:00:00	14:30:00
9	30	10:00:00	16:00:00	34	35	10:00:00	17:00:00	59	44	8:00:00	14:30:00
10	30	10:00:00	16:00:00	35	25	8:00:00	12:00:00	60	44	8:00:00	15:30:00
11	30	11:30:00	16:00:00	36	25	8:00:00	12:00:00	61	50	8:00:00	16:00:00
12	40	8:00:00	14:30:00	37	35	10:30:00	17:00:00	62	60	8:00:00	18:00:00
13	30	10:30:00	16:00:00	38	35	10:00:00	17:00:00	63	60	8:00:00	18:00:00
14	40	8:00:00	15:00:00	39	35	10:30:00	17:00:00	64	60	8:00:00	18:00:00
15	30	10:00:00	16:00:00	40	25	9:30:00	13:30:00	65	60	8:00:00	17:00:00
16	30	10:00:00	16:00:00	41	25	8:30:00	12:30:00	66	60	8:00:00	17:00:00
17	30	10:00:00	16:00:00	42	25	9:30:00	13:30:00	67	60	8:00:00	17:00:00
18	30	10:00:00	16:00:00	43	29	10:00:00	14:30:00	68	60	8:00:00	18:00:00
19	30	10:30:00	16:00:00	44	32	8:00:00	12:00:00	69	60	8:00:00	18:00:00
20	30	10:30:00	16:00:00	45	32	8:00:00	13:00:00	70	60	8:00:00	18:00:00
21	30	10:30:00	16:00:00	46	32	8:00:00	13:00:00	71	60	8:00:00	18:00:00
22	30	10:30:00	16:00:00	47	32	9:30:00	14:30:00	72	60	8:00:00	18:00:00
23	30	10:00:00	16:00:00	48	32	8:00:00	13:00:00	73	60	8:00:00	17:30:00
24	30	10:30:00	16:00:00	49	35	8:00:00	13:30:00	74	60	8:00:00	17:30:00
25	30	10:30:00	16:00:00	50	35	9:30:00	15:00:00	75	60	8:00:00	17:30:00

Fuente: Tomado de (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018).

Para la etapa de programación se consultaron los procedimientos internos y los acuerdos de servicio para construir las reglas del Módulo 1 Reglas estáticas. En el caso de estudio los atributos que permiten descartar los paquetes que no deben salir a ruta se describen a continuación:

- Cita: Fecha de la próxima cita
- Estado Real: Estado de proceso en el que se encuentra el paquete
- Stock gestionable: calificación interna
- Motivo real: calificación de la última visita que se realizo
- Calificación gestión telefónica: Calificación de la última llamada realizada

Las reglas del Módulo 1 se enlistan en la Tabla Q.9.

Tabla Q.9 Reglas estáticas para el caso 1

Sí tiene Fecha Cita Posterior al horizonte planeación entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Estado real Asignado a ruta entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Estado real Cargue y verificación entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Estado real Empaque entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Estado real Entregado a ruta entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Estado real Remitido a ciudades entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Stock gestionable No entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Motivo real Ciudad de no cubrimiento entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Motivo real Cliente no tiene documentos listos entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Motivo real Dirección incompleta 2 entonces cambiar de pendiente a descartado

Sí tiene Motivo real Dirección incompleta entrega entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Motivo real Dirección no existe 2 entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Motivo real Dirección no existe entrega entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Motivo real Gestión completa entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Motivo real Identificación deficiente usuario final entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Motivo real Ilocalizado dirección de entrega entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Motivo real Mudado entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Motivo real Por solicitud de la entidad entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Motivo real Por solicitud usuario final entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Motivo real Rechazado entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Motivo real Rechazado por no solicitado entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Motivo real Rechazo a stock entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Motivo real Rechazo destruido entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Motivo real Rechazo telefónico entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Motivo real Rehusado entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Motivo real Salida por tiempo indeterminado entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Motivo real Sin datos del tenedor entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Motivo real Zonas de no cubrimiento entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Calificación gestión telefónica Cliente llamara a entidad entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Calificación gestión telefónica Cliente no tiene documentos listos entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Calificación gestión telefónica Cliente nombres errados entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Calificación gestión telefónica Devuelto a entidad entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Calificación gestión telefónica No tiene documento Identidad entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Calificación gestión telefónica Rechazado entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Calificación gestión telefónica Rechazo no necesita entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Calificación gestión telefónica Salida tiempo indeterminado entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Calificación gestión telefónica Solicitud devolución entonces cambiar de pendiente a descartado
Sí tiene Calificación gestión telefónica Titular menor edad entonces cambiar de pendiente a descartado

Fuente: Tomado de (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018).

Para el Módulo 2 Citas solo se aplica la siguiente regla:

"Sí la fecha de cita está contenida en el horizonte de planeación entonces cambiar estado de ruta a programado y hacer fecha de ruta igual a fecha de cita."

Las reglas Modulo 3 que esta construidas a partir de la experiencia de los pseudo-expertos utilizan el concepto de encadenamiento hacia adelante (Forwad Chaining), por lo cual se ordenaron desde la regla con condiciones por cumplir más estrictas hasta la más flexible, esto con el fin de priorizar los paquetes más importantes y urgentes por gestionar En la se presentan las reglas del módulo 3.

Tabla Q.10 Reglas dinámicas para el caso 1

Sí hay capacidad disponible y el cliente es cercano a 5 clientes con cita o más y el paquete esta vencido y tiene 0 visitas o menos y tiene más de 5 llamadas entonces cambiar de pendiente a programado
Sí hay capacidad disponible y el cliente es cercano a 4 clientes con cita o más y el paquete esta vencido y tiene 0 visitas o menos y tiene más de 4 llamadas entonces cambiar de pendiente a programado
Sí hay capacidad disponible y el cliente es cercano a 3 clientes con cita o más y el paquete esta vencido y tiene 1 visitas o menos y tiene más de 3 llamadas entonces cambiar de pendiente a programado
Sí hay capacidad disponible y el cliente es cercano a 2 clientes con cita o más y el paquete está en tiempo y tiene 1 visitas o menos y tiene más de 2 llamadas entonces cambiar de pendiente a programado
Sí hay capacidad disponible y el cliente es cercano a 1 clientes con cita o más y el paquete está en tiempo y tiene 2 visitas o menos y tiene más de 1 llamadas entonces cambiar de pendiente a programado
Sí hay capacidad disponible y el cliente es cercano a 0 clientes con cita o más y el paquete está en tiempo y tiene 2 visitas o menos y tiene más de 0 llamadas entonces cambiar de pendiente a programado

Fuente: Tomado de (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018).

El sistema experto fue programado en Java, utilizando el motor de reglas Jess y también un software de base de datos denominado MongoDB. En la Figura Q.1 se muestra el diagrama de clase del programa desarrollado en Java, para así mostrar las clases utilizadas, sus atributos, las operaciones y las relaciones entre los objetos.

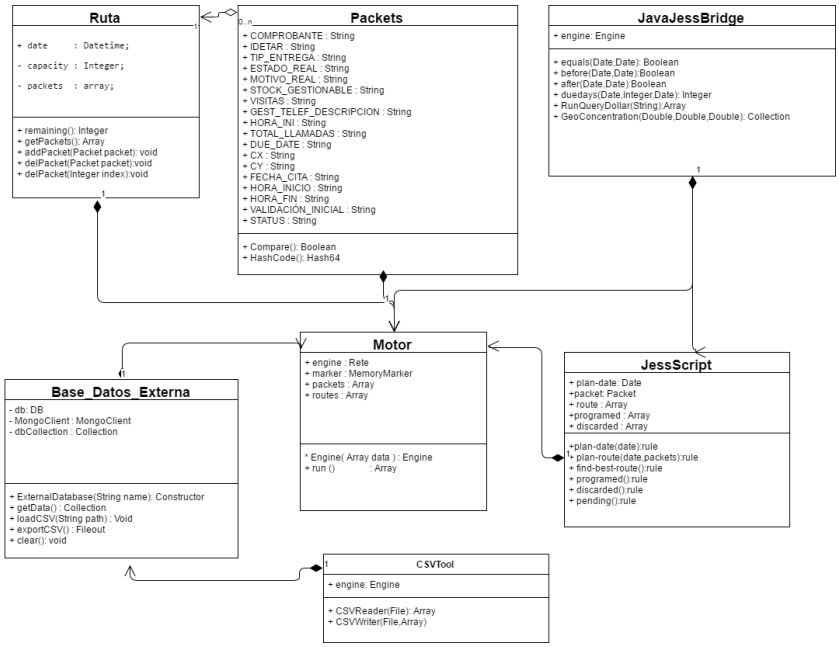


Figura Q.1 Diagrama de clases del sistema experto para el caso 1

Fuente: Tomado de (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018).

Como ejemplo de los resultados detallados, en la Tabla Q.11 se presenta en detalle los resultados por clúster geométricos.

Tabla Q.11 Resultados por clúster Centro Geométrico para el caso 1

Clúster	Distancia Promedio en km	Clúster	Distancia Promedio en km	Clúster	Distancia Promedio en km
1	3.95	26	0.87	51	1.39
2	1.60	27	1.40	52	1.24
3	1.21	28	1.22	53	1.05
4	1.34	29	1.12	54	1.39
5	1.36	30	1.47	55	0.74
6	1.63	31	0.68	56	0.88
7	1.34	32	1.29	57	1.36
8	1.50	33	1.18	58	1.33
9	1.12	34	1.20	59	1.24
10	1.62	35	0.76	60	0.91
11	1.41	36	1.23	61	1.51
12	1.80	37	1.71	62	1.57
13	1.50	38	1.06	63	0.78
14	1.42	39	1.42	64	1.16
15	1.48	40	0.63	65	1.05
16	1.43	41	0.71	66	0.95
17	1.23	42	1.00	67	1.01
18	1.32	43	1.51	68	0.80
19	1.25	44	1.15	69	1.44
20	1.05	45	0.88	70	1.10
21	1.11	46	1.12	71	0.46
22	0.94	47	0.46	72	0.73
23	1.13	48	0.85	73	0.73
24	1.21	49	1.04		
25	0.69	50	1.30		

Fuente: Tomado de (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018).

En la Tabla Q.12 se presenta el resultado de las rutas para el día 1 en cuanto al distancia recorrida y el número de clientes visitados.

Tabla Q.12Resultados diseño de rutas para el día 1 para el caso 1

Vehículo	Distancia Total Recorrida	Clientes Visitados	Distancia promedio entre clientes	Vehículo	Distancia Total Recorrida	Clientes Visitados	Distancia promedio entre clientes
1	0.00	0	Infactible	38	20.19	35	0.58
2	75.18	40	1.88	39	23.59	35	0.67
3	10.67	25	0.43	40	5.34	25	0.21
4	13.30	20	0.67	41	7.97	25	0.32
5	45.21	30	1.51	42	8.75	25	0.35
6	18.50	30	0.62	43	50.92	29	1.76
7	18.29	30	0.61	44	19.62	32	0.61
8	16.54	30	0.55	45	10.89	32	0.34
9	35.05	30	1.17	46	13.60	32	0.43
10	25.14	30	0.84	47	16.92	32	0.53
11	35.67	30	1.19	48	11.76	32	0.37
12	36.06	40	0.90	49	17.66	35	0.50
13	48.75	30	1.63	50	52.07	35	1.49
14	27.35	40	0.68	51	18.90	38	0.50
15	52.78	30	1.76	52	24.23	38	0.64
16	22.01	30	0.73	53	16.25	38	0.43
17	45.82	30	1.53	54	25.17	38	0.66
18	46.45	30	1.55	55	33.33	41	0.81
19	40.38	30	1.35	56	19.61	41	0.48
20	18.32	30	0.61	57	67.15	41	1.64
21	15.93	30	0.53	58	18.44	41	0.45
22	34.39	30	1.15	59	61.89	44	1.41
23	27.25	30	0.91	60	43.23	44	0.98
24	42.52	30	1.42	61	82.77	50	1.66
25	7.83	30	0.26	62	111.54	60	1.86
26	13.76	30	0.46	63	57.84	60	0.96
27	30.77	25	1.23	64	82.65	60	1.38
28	53.58	35	1.53	65	82.97	60	1.38
29	18.63	35	0.53	66	68.23	60	1.14
30	13.15	25	0.53	67	72.80	60	1.21
31	6.68	25	0.27	68	60.51	60	1.01
32	49.14	35	1.40	69	41.89	60	0.70
33	43.17	30	1.44	70	52.51	60	0.88
34	52.70	35	1.51	71	27.25	60	0.45
35	17.26	25	0.69	72	53.70	60	0.90
36	12.83	25	0.51	73	23.92	27	0.89
37	58.32	35	1.67				

Fuente: Tomado de (E. López-Santana, Rodríguez-Vásquez, et al., 2018).

Anexo R Información complementaria Caso 2: servicio de cuidado a la salud domiciliaria

Este anexo este compuesto de cuatro apartados con información complementaria para el Caso 2. El primer apartado muestra los resultados de las encuestas aplicadas para el CCSS. El segundo apartado muestra la información final empleada para el CPT. El tercer apartado describe los modelos de programación entera desarrollados de forma específica para el Caso 2. Finalmente, el cuarto apartado presenta la información de la instancia resuelta en el Caso 2.

Anexo R.1 Información de Características de muestras para el CCSS del Caso 2

A continuación, se presentan los resultados de las encuestas a 6 muestras:

Tabla R.1 Información de Características de muestras para el CCSS del Caso 2

Características	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Presencia	Siempre	Siempre	Siempre	Siempre	Siempre	Siempre
Comportamiento	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces
Continuidad	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Siempre	Entre el 30% y el 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Siempre
Abandono	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Menos del 30% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Menos del 30% de las veces
Operación	Nunca	Nunca	Entre el 30% y el 70% de las veces	Nunca	Nunca	Nunca
Autonomía	Siempre	Siempre	Siempre	Siempre	Mas del 70% de las veces	Siempre
Influencia	Entre el 30% y el 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces
Almacenamiento	Nunca	Menos del 30% de las veces	Nunca	Nunca	Nunca	Nunca
Tiempo de almacenamiento	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces
Anticipación	Menos del 30% de las veces	Mas del 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Menos del 30% de las veces
Tiempo de espera	Nunca	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Nunca	Nunca	Menos del 30% de las veces
Espacio	Nunca	Menos del 30% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Menos del 30% de las veces
Costo de almacenamiento	Mas del 70% de las veces	Siempre	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces
Uso de máquinas/equipos	Menos del 30% de las veces	Nunca	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Nunca
Uso de personas	Mas del 70% de las veces	Siempre	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Siempre
Interacción	Menos del 30% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces
Beneficiario	Siempre	Siempre	Siempre	Siempre	Siempre	Siempre
Permiso	Mas del 70% de las veces	Siempre	Siempre	Mas del 70% de las veces	Siempre	Siempre
Comercialización	Nunca	Nunca	Menos del 30% de las veces	Nunca	Nunca	Nunca
Personalización	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces
Apariencia	Nunca	Nunca	Nunca	Nunca	Nunca	Nunca
Productos complementarios	Siempre	Siempre	Siempre	Siempre	Siempre	Mas del 70% de las veces

Características	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6
Consumo	Mas del 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces
Lugar	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces	Menos del 30% de las veces
Desplazamiento	Siempre	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces
Programación de actividades	Menos del 30% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Menos del 30% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Menos del 30% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces
Programación de recursos	Mas del 70% de las veces	Siempre	Entre el 30% y el 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces	Mas del 70% de las veces
Estandarización	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces	Entre el 30% y el 70% de las veces

Anexo R.2 Información de las respuestas de la notación para el CPT del Caso 2

A continuación, se presenta las respuestas obtenidas para cada campo de la notación en el CPT:

Tabla R.2 Información de las respuestas de la notación para el CPT del Caso 2

Campo	N	Componente	Parámetro	Tipo	Descripción	Valor obtenido
Cliente	1	Trabajos	Número de Trabajos	Pregunta	Seleccione el rango del número de trabajos a realizar	n
	2		Número de Tareas a realizar	Pregunta	¿Existen tareas a realizar por cada trabajo?	n_j
	3		Tipo de tarea	Atributo	Estandarización	C
	4		Expectativa del cliente	Pregunta	Identifique la expectativa del cliente:	Q
	5		Tipo de necesidad	Atributo	Naturaleza	I
	6		Durabilidad	Atributo	Durabilidad	P
	7		Demanda	Pregunta	¿el resultado de esta actividad afecta otras actividades o procesos?	I
	8		Flexibilidad	Atributo	Dependencia	Ass
	9		Tamaño de Población	Pregunta	Seleccione el tipo de mercado:	F
	10		Múltiples periodos	Pregunta	El horizonte de planeación para satisfacer su necesidad es:	P
	11		Requerimientos	Pregunta	¿la tarea a realizar requiere una habilidad específica o un conjunto de ellas o ninguna?	S
	12		Ventana de Tiempo	Pregunta	Para la terminación/entrega de la tarea, usted requiere:	[e,l]
	13		Agrupación	Pregunta	Es posible agrupar las tareas	None
	14		Distribución Geográfica	Característica	Desplazamiento	NG
	15	Proceso de Llegada - Arribos	Tiempo de liberación	Característica	Anticipación	r_j
	16		Tiempo de Entrega	Pregunta	Para la terminación/entrega de la tarea, usted requiere:	d_j
	17		Naturaleza	Pregunta	¿Es posible que arriben nuevos trabajos o tareas al sistema?	Dy
	18		Tiempo de llegada	Pregunta	Los tiempos de llegada son:	S
	19		Tamaño de Lote	Pregunta	Las llegadas son:	U
	20		Lugar de arribo	Pregunta	Los trabajos arriban a:	V
	21		Precedencia	Pregunta	Existe relación de precedencia entre los trabajos	None
	22		Disciplina	Pregunta	La disciplina de llegada de los trabajos es:	G
Recurso	23	Fila - Cola	Capacidad Fila	Pregunta	¿El sistema tiene un máximo de clientes para recibir?	F
	24		Disciplina Fila	Pregunta	La disciplina en la fila de atención/espera es:	G
	25		Incumplimiento	Pregunta	¿Es posible que el cliente no se presente?	None
	26		Abandono	Característica	Abandono	None

Campo	N	Componente	Parámetro	Tipo	Descripción	Valor obtenido
	27		Procesamiento en la fila	Pregunta	¿Es posible realizar un procesamiento en la fila?	None
	28	Servidores	Número	Pregunta	Seleccione el número de servidores/recursos:	m
	29		Tipo	Pregunta	Seleccione el tipo de recursos:	Het
	30		Agrupación	Pregunta	Es posible agrupar los servidores para el procesamiento /atención:	None
	31		Capacidad Servicio	Pregunta	Seleccione el tipo de capacidad:	C
	32		Tiempo de proceso	Pregunta	Los tiempos de proceso son:	D
	33		Competencias	Pregunta	¿los recursos tienen competencias específicas?	k_hi
	34		Recursos	Pregunta	El tipo de recursos es:	Ren
	35		Disponibilidad	Pregunta	¿Posee turnos para el desarrollo de la actividad?	S
	36		Paradas	Pregunta	Tipos de Paradas de Mantenimiento:	None
	37		Tecnología	Característica	Uso de personas	M
	38		Ampliación de capacidad	Pregunta	Opciones para ampliación de Capacidad:	R-Sch
	39		Lugar	Pregunta	Seleccione el sitio donde el proveedor desarrollo la actividad:	C
	40		Lugar de origen	Pregunta	La base del proveedor es:	D
	41	Atención-	Calidad	Característica	Tiempo de espera	C
	42		Lugar-Destino	Pregunta	¿Es un producto final?	Exi
	43		Disciplina	Pregunta	La disciplina en el proceso de atención es:	P
Control de Flujo	44	Propiedad	Acceso	Atributo	Propiedad	N
	45		Tiempo	Pregunta	En caso de tener acceso a la propiedad: es de tiempo:	None
	46		Cantidad	Pregunta	En caso de tener acceso a la propiedad: es de uso:	None
	47		Posibilidad rechazo /Sin Posibilidad de rechazo	Pregunta	¿El cliente puede rechazar el producto?	NRej
	48	Tipo de atención	Simultaneidad	Atributo	Simultaneidad	On
	49		Agendado	Atributo	Agendado	Y
	50		Disciplina	Pregunta	La disciplina en el proceso de atención es:	P
	51		Lotes	Pregunta	Seleccione el tipo de procesamiento:	U
	52		Personalización	Característica	Influencia	S
	53		Elegibilidad Maquinas	Característica	Influencia	None
	54		Consumo de recursos	Pregunta	El tipo de recursos es:	Ren
	55	Movimiento	Ruta	Atributo	Estandarización	V
	56		Recirculación	Pregunta	¿es posible reprocesar?	N
	57		No espera	Característica	Tiempo de espera	N-w
	58		Interrupción de actividades	Pregunta	¿es posible fraccionar el desarrollo de la actividad?	None
	59		Inventario	Atributo	Acumulación	N
	60		Agrupación de tareas	Pregunta	Seleccione el tipo de procesamiento en los servidores:	None
	61		Sincronización de tareas	Característica	Programación de recursos	N
	62		Sincronización de recursos	Pregunta	Es posible agrupar los servidores para el procesamiento /atención:	None

Fuente: Elaboración propia.

Anexo R.3 Modelo de programación entera mixta para el Caso 1

Este modelo se presentó en (E. López-Santana, Espejo-Díaz, et al., 2016). Dado un conjunto de pacientes $P = \{1,2,\dots,N\}$ los cuales están distribuidos geográficamente sobre una región. El proveedor del servicio cuenta con un conjunto de operadores de salud $K = \{1,2,\dots,M\}$ los cuales son heterogéneos respecto al nivel de preparación y habilidades. Cada operador de salud inicia y finaliza su recorrido en su respectivo hogar, además que cuenta con un tiempo máximo de trabajo determinado.

Dado lo anterior el problema es definido mediante un grafo no dirigido $G = (V, A)$ con un conjunto de nodos $V = KI \cup P \cup KF$, donde KI representa los nodos de inicio de los

operadores de salud, P los hogares de los pacientes y KF los nodos ficticios que representan el destino de los operadores de salud dónde $KI = KF$. El conjunto de arcos es definido por $A = \{(i,j): i,j \in V, i \neq j\}$ y cada arco (i,j) tiene asociado un valor no negativo t_{ij} que representa el tiempo de viaje desde una ubicación i a otra ubicación j. Cada paciente $i \in P$ presenta un diagnóstico médico que requiere de un nivel de habilidad mínimo h_i siendo 1 el más bajo. La prioridad en la atención es determinada por el parámetro p_i siendo 1 el más alto e indica que el paciente debe ser visitado en la mayor brevedad posible. La visita domiciliara al paciente tiene una duración determinada s_i y debe comenzar después del momento a_i en que comunicó la necesidad. A cada operador de salud $k \in K$ se le establece un nivel de habilidad o experticia q_k. El anterior parámetro es utilizado para lograr que la visita domiciliaria sea realizada sólo si el nivel de calificación del operador de salud q_k es mayor o igual al nivel de habilidad o calificación requerido por los pacientes h_i.

El valor mínimo que la promesa de servicio Z_i puede tomar para cada paciente i está calculado con base en los valores del TRIAGE correspondientes a (García, 2013) los cuales se encuentran en la Tabla R-3. Para lograr lo anterior se construyó una función cuadrática de los tiempos recomendados de atención según su nivel de prioridad p_i como se observa en la Figura R-1. De esa manera los coeficientes de la función cuadrática que serán utilizados en el modelo matemático son $\gamma = 16.071,\ \delta = -37.929$ y $\varepsilon = 24$.

Tabla R-3 Tiempo de atención con base en el nivel de TRIAGE

Nivel TRIAGE	Tiempo de espera para atención (minutos)
1	0
2	15
3	60
4	120
5	240

Fuente: Tomado de (García, 2013)

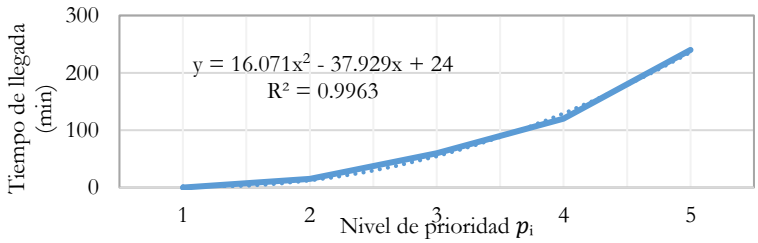


Figura R-1 Función cuadrática del TRIAGE
Fuente: Tomado de (Espejo Diaz, 2016)

A continuación, se presenta la notación usada en el modelo matemático, así como la formulación del modelo mediante las ecuaciones que serán explicadas posteriormente. La notación empleada para el problema y el modelo de programación entera es presentada en la Tabla R-4

Tabla R-4 Notación usada para el modelo de programación entera mixta

Conjuntos	P : Conjunto de pacientes K : Conjunto de operadores de salud KI : Conjunto de orígenes de los operadores de salud KF: Conjunto de destinos de los operadores de salud V : Conjunto de vértices ($V = KI + P + KF$) A : Conjunto de arcos $V1$: Conjunto de vértices 1 ($V1 = KI + P$)

	$V2$: Conjunto de vértices 2 ($V2 = P + KF$)
Parámetros	t_{ij} : Tiempo de viaje desde el paciente i al paciente j. a_i : Momento en el cual el paciente i comunica la necesidad del servicio. s_i : Duración de la visita domiciliaria al paciente i. h_i : Habilidad mínima requerida por el paciente i . [1 Nivel de requerimiento más bajo]. p_i : Prioridad en la atención del paciente i en el sistema. [1 Prioridad máxima]. q_k : Habilidad del operador de salud k . [1 Nivel de experticia más bajo]. l_k : Comienzo de la jornada laboral del operador de salud k. u_k : Finalización de la jornada laboral del operador de salud k. BM : Valor numérico alto para restricciones lógicas. α: Ponderación para la primera función objetivo. β: Ponderación para la segunda función objetivo. G: Tamaño del conjunto P más el tamaño del conjunto KI. $\gamma, \delta, \varepsilon$: Coeficientes de la función TRIAGE
Variables	X_{ijk}: 1 Si el operador de salud k cubre la ruta $(i-j)$, 0 en otro caso. Y_{ik} Momento de llegada del operador de salud k al paciente i Z_i Promesa de servicio al paciente i

Fuente: Elaboración propia.

El modelo matemático correspondiente a la programación y ruteo de operadores de salud es presentado en las ecuaciones (R-1) a la (R-21).

$$Min\ FO = \propto FO_1 + \beta\ FO_2 \tag{R-1}$$

$$FO_1 = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} X_{ijk}\ t_{ij} \tag{R-2}$$

$$FO_2 = \sum_{i \in P} \frac{Z_i}{|P|} \tag{R-3}$$

Sujeto a:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V1} X_{ijk} = 1 \qquad \forall\ j \in P \tag{R-4}$$

$$\sum_{j \in V1} X_{jek} = \sum_{j \in V2} X_{ejk} \qquad \forall\ k \in K, e \in P \tag{R-5}$$

$$\sum_{j \in V2} X_{ijk \mid i=k} = 1 \qquad \forall\ k \in K, i \in KI \tag{R-6}$$

$$\sum_{i \in KI} \sum_{j \in V2} X_{ijk} = 0 \qquad \forall\ k \in K \tag{R-7}$$

$$\sum_{i \in V1} X_{i\ k+G\ k} = 1 \qquad \forall\ k \in K \tag{R-8}$$

$$\sum_{i \in V1} \sum_{j \in KF \mid j \neq k+G} X_{ijk} = 0 \qquad \forall\ k \in K \tag{R-9}$$

$$Y_{ik} + t_{ij} + s_i - M\left(1 - X_{ijk}\right) \leq Y_{jk} \qquad \forall\ k \in K,\ (i,j) \in P \tag{R-10}$$

$$Y_{ik} + t_{ij} - M\left(1 - X_{ijk}\right) \leq Y_{jk} \qquad \forall\ k \in K, i \in KI, j \in V2 \tag{R-11}$$

$$Y_{ik} + t_{ij} - M\left(1 - X_{ijk}\right) \leq Y_{jk} \qquad \forall\ k \in K, i \in V1, j \in KF \tag{R-12}$$

$$Y_{ik} \geq a_i \qquad \forall\ k \in K, i \in P \tag{R-13}$$

$$\gamma\ {p_i}^2 - \delta p_i + \varepsilon + a_i \leq Z_i \qquad \forall\ i \in P \tag{R-14}$$

$$Y_{ik} \leq Z_i \qquad \forall\ k \in K, i \in P \tag{R-15}$$

$$h_j - M\left(1 - X_{ijk}\right) \leq q_k \qquad \forall\ k \in K, i \in V1, j \in P \tag{R-16}$$

$$Y_{ik} \geq l_i \qquad \forall\ k \in K, i \in KI \tag{R-17}$$

$$Y_{jk} \leq u_j \qquad \forall\ k \in K, j \in KF \tag{R-18}$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \qquad \forall\ (i,j) \in V | i \neq j, k \in K \tag{R-19}$$

$$Y_{ik} \geq 0 \qquad \forall\ i \in V, k \in K \tag{R-20}$$

$$Z_i \geq 0 \qquad i \in P \tag{R-21}$$

La ecuación (R-1) representa la función multi-objetivo del sistema la cual está compuesta por la ecuación (R-2) que busca minimizar el tiempo de desplazamiento de operadores de salud y la ecuación (R-3) que busca minimizar demora en la prestación del servicio. La restricción (R-4) asegura que todos los pacientes sean atendidos. En (R-5) se asegura la conservación del flujo, es decir si un operador se salud visita un paciente éste debe irse. Las restricciones (R-6), (R-7), (R-8) y (R-9) garantizan que cada operador de salud salga y regrese a su propio hogar. Para los operadores de salud el tiempo de llegada a los pacientes, el tiempo de salida y regresos a sus hogares es calculado en (R-10), (R-11) y (R-12). La restricción (R-13) asegura que las visitas no sean realizadas antes de la notificación de la necesidad por parte del paciente. En (R-14) se calcula el mínimo de la promesa de servicio para cada paciente de acuerdo con su prioridad. En (R-15) se relaciona el tiempo de llegada del operador de salud con la promesa de servicio. La condición de que cada visita sea realizada por un operador de salud calificado es cubierta por (R-16). En (R-17) y (R-18) se observa la jornada laboral de los operadores de salud. En (R-19) se asegura que las variables X_{ijk} sean binarias y en (R-20) y (R-21) que el tiempo de llegada y la promesa de servicio sean positivas.

Anexo R.4 Información para el Caso 1 de cuidado a la salud domiciliaria

La instancia para evaluación del caso de estudio se presenta en la siguiente figura:

```
Instances\Mod1.txt
K 4
P 15
gama 16.071
sigma -37.929
epsilon 24.0
paciente
i  !x        !y        !a   !s   !h !p
0 -29.73 64.136 0 0 0 0
1 -30.664 5.463 0 0 0 0
2 51.642 5.469 0 0 0 0
3 -13.171 69.336 0 0 0 0
4 -29.73 64.136 399.0 2.0 4.0 2.0
5 -30.664 5.463 121.0 7.0 4.0 4.0
6 51.642 5.469 389.0 21.0 3.0 3.0
7 -13.171 69.336 204.0 24.0 2.0 3.0
8 -67.413 68.323 317.0 1.0 4.0 3.0
9 48.907 6.274 160.0 17.0 3.0 4.0
10 5.243 22.26 170.0 6.0 5.0 3.0
11 -65.002 77.234 215.0 5.0 3.0 3.0
12 -4.175 -1.569 80.0 7.0 4.0 4.0
13 23.029 11.639 90.0 1.0 2.0 2.0
14 25.482 6.287 397.0 4.0 3.0 3.0
15 -42.615 -26.392 271.0 10.0 3.0 3.0
16 -76.672 99.341 108.0 2.0 3.0 2.0
17 -20.673 57.892 340.0 16.0 1.0 3.0
18 -52.039 6.567 226.0 23.0 3.0 3.0
operadores:
q l u
0 5.0 0.0 1000.0
1 7.0 0.0 1000.0
2 4.0 0.0 1000.0
3 7.0 0.0 1000.0
```

Figura R-2 Instancia de evaluación de Caso 2
Fuente: Elaboración propia.

Anexo S Información complementaria Caso 3: servicio de mantenimiento

Este anexo este compuesto de tres apartados con información complementaria para el Caso 3. El primer apartado presenta la información empleada para el CPT. El tercero apartado describe los modelos y algoritmos desarrollados de forma específica para el Caso 3 y en el tercer apartado la información de las instancias resueltas.

Anexo S.1 Información de las respuestas de la notación para el CPT del Caso 3

A continuación, se presenta las respuestas obtenidas para cada campo de la notación en el CPT:

Tabla S.1 Información de las respuestas de la notación para el CPT del Caso 3

Campo	N	Componente	Parámetro	Tipo	Descripción	Valor obtenido
Cliente	1	Trabajos	Número de Trabajos	Pregunta	Seleccione el rango del número de trabajos a realizar	n
	2		Número de Tareas a realizar	Pregunta	¿Existen tareas a realizar por cada trabajo?	None
	3		Tipo de tarea	Atributo	Estandarización	S
	4		Expectativa del cliente	Pregunta	Identifique la expectativa del cliente:	Q
	5		Tipo de necesidad	Atributo	Naturaleza	I
	6		Durabilidad	Atributo	Durabilidad	NP
	7		Demanda	Pregunta	¿el resultado de esta actividad afecta otras actividades o procesos?	D
	8		Flexibilidad	Atributo	Dependencia	Ass
	9		Tamaño de Población	Pregunta	Seleccione el tipo de mercado:	F
	10		Múltiples periodos	Pregunta	El horizonte de planeación para satisfacer su necesidad es:	NP
	11		Requerimientos	Pregunta	¿la tarea a realizar requiere una habilidad especifica o un conjunto de ellas o ninguna?	S
	12		Ventana de Tiempo	Pregunta	Para la terminación/entrega de la tarea, usted requiere:	[e,l]
	13		Agrupación	Pregunta	Es posible agrupar las tareas	C
	14		Distribución Geográfica	Característica	Desplazamiento	G
	15	Proceso de Llegada - Arribos	Tiempo de liberación	Característica	Anticipación	None
	16		Tiempo de Entrega	Pregunta	Para la terminación/entrega de la tarea, usted requiere:	S
	17		Naturaleza	Pregunta	¿Es posible que arriben nuevos trabajos o tareas al sistema?	Dy
	18		Tiempo de llegada	Pregunta	Los tiempos de llegada son:	S
	19		Tamaño de Lote	Pregunta	Las llegadas son:	U
	20		Lugar de arribo	Pregunta	Los trabajos arriban a:	V
	21		Precedencia	Pregunta	Existe relación de precedencia entre los trabajos	None
	22		Disciplina	Pregunta	La disciplina de llegada de los trabajos es:	G
Recurso	23	Fila - Cola	Capacidad Fila	Pregunta	¿El sistema tiene un máximo de clientes para recibir?	F
	24		Disciplina Fila	Pregunta	La disciplina en la fila de atención/espera es:	FIFO
	25		Incumplimiento	Pregunta	¿Es posible que el cliente no se presente?	None
	26		Abandono	Característica	Abandono	None
	27		Procesamiento en la fila	Pregunta	¿Es posible realizar un procesamiento en la fila?	None
	28	Servidores	Número	Pregunta	Seleccione el número de servidores/recursos:	m
	29		Tipo	Pregunta	Seleccione el tipo de recursos:	Hom
	30		Agrupación	Pregunta	Es posible agrupar los servidores para el procesamiento /atención:	None
	31		Capacidad Servicio	Pregunta	Seleccione el tipo de capacidad:	C
	32		Tiempo de proceso	Pregunta	Los tiempos de proceso son:	S
	33		Competencias	Pregunta	¿los recursos tienen competencias específicas?	k_hi
	34		Recursos	Pregunta	El tipo de recursos es:	Ren

Campo	N	Componente	Parámetro	Tipo	Descripción	Valor obtenido
	35		Disponibilidad	Pregunta	¿Posee turnos para el desarrollo de la actividad?	S
	36		Paradas	Pregunta	Tipos de Paradas de Mantenimiento:	None
	37		Tecnología	Característica	Uso de personas	M
	38		Ampliación de capacidad	Pregunta	Opciones para ampliación de Capacidad:	R-Sch
	39		Lugar	Pregunta	Seleccione el sitio donde el proveedor desarrollo la actividad:	C
	40		Lugar de origen	Pregunta	La base del proveedor es:	N
	41	Atenci ón-	Calidad	Característica	Tiempo de espera	C
	42		Lugar-Destino	Pregunta	¿Es un producto final?	Rout
	43		Disciplina	Pregunta	La disciplina en el proceso de atención es:	G
Control de Flujo	44	Propiedad	Acceso	Atributo	Propiedad	N
	45		Tiempo	Pregunta	En caso de tener acceso a la propiedad: es de tiempo:	None
	46		Cantidad	Pregunta	En caso de tener acceso a la propiedad: es de uso:	None
	47		Posibilidad rechazo /Sin Posibilidad de rechazo	Pregunta	¿El cliente puede rechazar el producto?	NRej
	48	Tipo de atención	Simultaneidad	Atributo	Simultaneidad	On
	49		Agendado	Atributo	Agendado	Y
	50		Disciplina	Pregunta	La disciplina en el proceso de atención es:	G
	51		Lotes	Pregunta	Seleccione el tipo de procesamiento:	U
	52		Personalización	Característica	Influencia	C
	53		Elegibilidad Maquinas	Característica	Influencia	None
	54		Consumo de recursos	Pregunta	El tipo de recursos es:	Ren
	55	Movimiento	Ruta	Atributo	Estandarización	V
	56		Recirculación	Pregunta	¿es posible reprocesar?	N
	57		No espera	Característica	Tiempo de espera	None
	58		Interrupción de actividades	Pregunta	¿es posible fraccionar el desarrollo de la actividad?	None
	59		Inventario	Atributo	Acumulación	N
	60		Agrupación de tareas	Pregunta	Seleccione el tipo de procesamiento en los servidores:	None
	61		Sincronización de tareas	Característica	Programación de recursos	Y
	62		Sincronización de recursos	Pregunta	Es posible agrupar los servidores para el procesamiento /atención:	None

Fuente: Elaboración propia.

Anexo S.2 Modelos propuestos para el Caso 3

En este anexo se presenta los modelos desarrollados para resolver el problema del caso 3.

La Tabla S.2 presenta la notación utilizada en los modelos de mantenimiento y ruteo.

Tabla S.2 Notación utilizada para el problema de mantenimiento y ruteo

Conjuntos	V_C: conjunto de clientes V: conjunto de Vértices (clientes y depósito) A: conjunto de arcos K: conjunto de técnicos $\mathcal{T}$: conjunto de Períodos R: conjunto de patrones de visita v_i: sistema de las operaciones de PM del cliente i, $v_i = \{o_i^1, o_i^2, .., o_i^{\eta_i}\}$
Parámetros	$\mathcal{T}'$: horizonte de planeación N: número de clientes m: número de técnicos T_i: variable aleatoria del tiempo a la falla de la máquina i $f_i(T_i)$: función de la densidad de la probabilidad (p.d.f.) de T_i $F_i(T_i)$: función de distribución de probabilidad de T_i δ_i: fecha para el PM de la máquina i

w_i: tiempo de espera antes del comienzo de la operación de la máquina i
s_i: hora de inicio de una operación de PM en el cliente i
s_{jk}: hora de inicio de una operación PM j cuando es realizado por el técnico k
$M_i(\delta_i)$: tiempo de espera condicional a la falla de la máquina i Cuando el tiempo δ_i sabiendo que la falla se produce antes δ_i
T_{CM_i}: tiempo medio requerido para realizar una operación de CM de la máquina i
T_{PM_i}: tiempo medio requerido para realizar una operación PM de la máquina i
C_{PM_i}: costo total de la PM. para la máquina i sobre su operación
C_{CM_i} costo de la operación del CM para la máquina i
C_{w_i} : costo de espera por unidad de tiempo en la máquina i
$C_i(\delta_i)$: costo total esperado por unidad de tiempo incurrido en un ciclo para la máquina i cuando el período de PM es δ_i
φ_t: costo de mantenimiento por unidad de tiempo en un período t
φ_{it}: costo de mantenimiento por unidad de tiempo para la máquina i en un período t
φ_{ir}: costo de mantenimiento por unidad de tiempo para la máquina i en un patrón de visita t
e_i: límite inferior de la ventana de tiempo para realizar la operación de PM en el cliente i
l_i: límite superior de la ventana de tiempo para realizar la operación de PM en el cliente i
η_i: número de operaciones esperadas (PM o CM) en el horizonte de planeación de la máquina i
ϕ_{ij}: fecha de *j-th* operación de PM de la máquina i ($j \in v_i$)
ϕ_j: fecha prevista de *j-th* operación PM
τ_{ij}: tiempo del viaje entre los clientes i , j

Fuente: Elaboración propia.

La conexión entre los dos modelos es el tiempo de espera esperado antes del inicio de la operación CM en cliente i cuando falla antes del inicio de la operación PM, denotada por w_i (E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, et al., 2016). El modelo propuesto es una extensión del modelo propuesto por (E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, et al., 2016) que implica un conjunto de múltiples periodos para el modelo de ruteo y el costo de ruteo en la funciones objetivo.

Modelo de mantenimiento

Utilizamos el modelo de mantenimiento para una máquina introducido por (E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, et al., 2016). El funcionamiento de la máquina sigue un modelo de remplazo y definimos un ciclo como el intervalo de tiempo entre dos renovaciones de la máquina con dos tipos de ciclos, preventivo y correctivo. Para el preventivo si la máquina no falla antes de δ, entonces se realiza una operación de PM. Y para el ciclo correctivo, si la máquina falla antes del tiempo δ debe esperar a ser reparado. En la Figura S.1 se presenta un ejemplo de operación del sistema con los posibles ciclos.

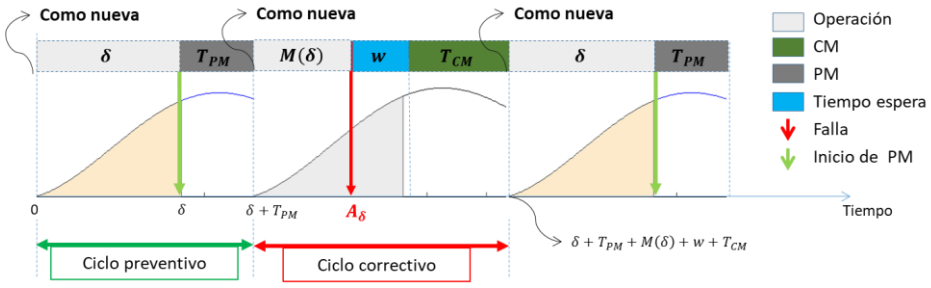


Figura S.1 Ejemplos de ciclos de mantenimiento con operaciones de mantenimiento preventivo y correctivo

Fuente: Tomado de (E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, et al., 2016)

La probabilidad de falla en el intervalo $[0, \delta]$ es $F(\delta)$ que se calcula de la siguiente manera

$$F(\delta) = P(T \leq \delta) = \int_0^{\delta} f(t)dt. \quad \text{(S-1)}$$

La probabilidad de que un ciclo preventivo es $1 - F(\delta)$ Y la probabilidad de que un ciclo de falla ocurre es $F(\delta)$. Con el supuesto de que la máquina está empieza como nueva y queda igual después de la operación de PM o CM, La función de distribución de la probabilidad en cualquier ciclo es $F(\delta)$.

El objetivo es determinar el período óptimo de PM (δ^*) que minimiza el criterio de costo. Para este propósito, es común utilizar un costo esperado a largo plazo por unidad de tiempo (Jardine & Tsang, 2005; E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, et al., 2016; S. Ross, 2006). Esto costo es dado por

$$\mathcal{C}(\delta) = \frac{E[C(\delta)]}{E[T(\delta)]} = \frac{\text{Total expected cost of a cycle}}{\text{Expected cycle length}}. \quad \text{(S-2)}$$

Donde el costo total esperado de un ciclo y la duración prevista del ciclo se da por ecuaciones (S-3) Y (S-4) de acuerdo con (E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, et al., 2016).

$$E[C(\delta)] = C_{PM}\big(1 - F(\delta)\big) + (C_{CM} + wC_w)F(\delta). \quad \text{(S-3)}$$

$$E[T(\delta)] = (\delta + T_{PM})\left(1 - F(\delta)\right) + (M(\delta) + w + T_{CM})F(\delta). \quad \text{(S-4)}$$

Finalmente, el costo total esperado por unidad de tiempo para una máquina es dado por:

$$\mathcal{C}(\delta) = \frac{C_{PM}\big(1 - F(\delta)\big) + (C_{CM} + wC_w)F(\delta)}{(\delta + T_{PM})\left(1 - F(\delta)\right) + (M(\delta) + w + T_{CM})F(\delta)}. \quad \text{(S-5)}$$

El valor óptimo δ^* se encuentra en la ecuación (S-5) usando un procedimiento unidimensional para una optimización no lineal no restringida (E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, et al., 2016).

Si el horizonte de planificación tiene la longitud $\mathcal{T}$, entonces η se definen como la frecuencia de las operaciones PM dada por:

$$\eta = \left\lfloor \frac{\mathcal{T}}{E[T(\delta^*)]} \right\rfloor, \quad \text{(S-6)}$$

Donde $\lfloor . \rfloor$ es la función piso y $E[T(\delta^*)]$ es la longitud de ciclo esperada en el óptimoδ^*. Para la *j-th* operación PM sobre el horizonte de planificación, $j = 1, 2, \ldots, \eta$, la fecha prevista de ejecución, denotada por ϕ_j, es calculado como sigue:

$$\phi_j = \delta^* + (j - 1)E[T(\delta^*)] \quad \text{(S-7)}$$

Se asume que el costo óptimo de la política de mantenimiento permanece inalterado cuando la fecha de PM se desplaza de δ^* Para ϕ_j, así fijamos $\mathcal{C}_j(\phi_j) = \mathcal{C}(\delta^*)$. Esto puede justificarse si ΔCost es relativamente pequeña en comparación con el costo $\mathcal{C}(\delta^*)$. Si el horizonte de planeación $\mathcal{T}'$ se discreta en un conjunto de periodos $\mathcal{T} = \{1,2, \ldots, |\mathcal{T}|\}$ y dado que solo una operación PM. puede ser programada para un período t. Entonces, la duración de cada período t Es $\frac{\mathcal{T}'}{|\mathcal{T}|}$ y la curva del costo total esperado por unidad de tiempo $\mathcal{C}_j(\phi_j)$ se aproxima como muestra en la Figura S.2 Esta situación ilustra el caso de 12 períodos y 2 operaciones de PM en el horizonte de planeación para un cliente.

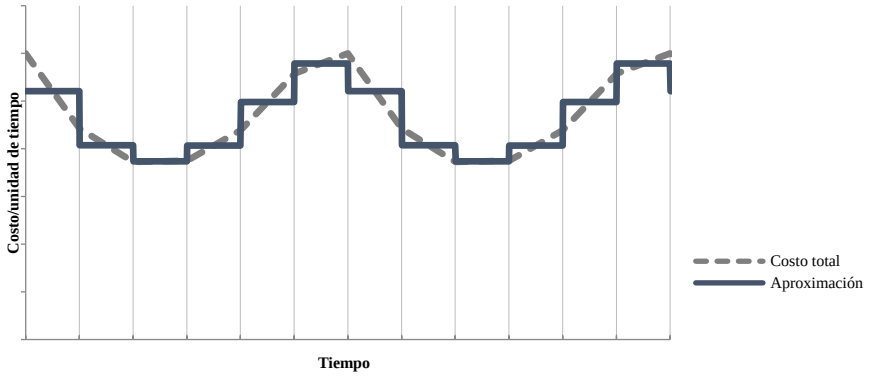


Figura S.2 Aproximación al costo por unidad de tiempo con $|\mathcal{T}|$ =12 períodos y $\eta = 2$
Fuente: Elaboración propia.

La curva aproximada representa el costo esperado de mantenimiento por unidad de tiempo para un cliente en un período t, denotado por φ_t. Dado ϕ_{t-1} como el límite más bajo del tiempo y ϕ_t como el límite superior del tiempo para un período t, el costo φ_t se calcula por

$$\varphi_t = \frac{\mathcal{C}_i(\phi_{t-1})+\mathcal{C}_i(\phi_t)}{2}\ ,\ t \in \mathcal{T}. \qquad \text{(S-8)}$$

El modelo de mantenimiento presentado arriba se resuelve para cada cliente $i \in V_C$, y para generalizar este modelo para N clientes un índice i se agrega a todas las variables

Modelo de ruteo y mantenimiento (MR&M) para la programación de operaciones de PM en múltiples-períodos

Se toma el modelo propuesto por (E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, et al., 2016) en un entorno de varios períodos definido por un conjunto de períodos $\mathcal{T}$. Consideramos un grafo completo $G = (V, A)$, donde el conjunto de vértices $V = \{0,1,2,\dots,N\}$ contiene un depósito central (vértice 0), y un subconjunto de clientes $V_C = V\backslash\{0\}$, así como el conjunto de arcos $A = \{(i,j) : i,j \in V, i \neq j\}$ que represente los vínculos entre todos los pares de vértices. El conjunto técnico es dado por $K = \{1,2,\dots,m\}$. Valores no negativos τ_{ij} se asocian a cada arco $(i,j) \in A$; representan el tiempo de viaje de los técnicos del cliente i al j. Se asume que estos tiempos son dados rutas más cortas y por lo tanto satisfacen la desigualdad del triángulo. Además, se supone que son simétricos ($t_{ij} = t_{ji}\ \forall i \neq j$). Cada vértice $i \in V_C$ se asocia con una ventana de tiempo $[e_j, l_j]$, es decir, los técnicos deben llegar para iniciar una operación de PM antes de tiempo l_j y no más tarde de e_j, pero la máquina en el cliente no se le reparará antes del comienzo de la ventana de tiempo. Además, cada vértice $i \in V_C$ tiene una duración de la operación PM T_{PM} y la operación cm T_{CM}. Estas características son las mismas para cualquier período t en el horizonte de planeación.

Del modelo de mantenimiento, para cada cliente i se tiene el número de operaciones de PM (η_i) sobre el horizonte d planeación y el costo de mantenimiento esperado por unidad de tiempo en un período t (φ_{it}). Se define un conjunto de patrones de visitas Q_i que representa las combinaciones de períodos de visita para cada cliente i. Por ejemplo, en un conjunto de tres períodos, el patrón de visita $q_1 = \{1,1,1\}$ consiste en visitar al cliente todos los períodos y otro patrón $q_2 = \{1,0,1\}$ consiste en visitar al cliente en los períodos primero y tercero. Por lo tanto, se define β_{iqt} como parámetro que es 1 si un periodo t pertenece a la combinación

de visitas $q \in Q_i$ del cliente i, y 0 de lo contrario. φ_{iq} es el costo de mantenimiento esperado para un cliente i y un patrón de visita $q \in Q_i$ que se calcula por

$$\varphi_{iq} = \sum_{t \in \mathcal{T}} \varphi_{it} \beta_{iqt}. \tag{S-9}$$

Por otra parte, se define un conjunto auxiliar de operaciones de mantenimiento para el cliente i como $v_i = \{o_i^1, o_i^2, .., o_i^{\eta_i}\}$; Also asumimos $|v_i| \geq 1$, lo que significa que por lo menos una operación de PM está programada sobre el horizonte de planeación. Además, se establece un conjunto de todas las operaciones de mantenimiento $V_M = \bigcup_{i=1}^{N} v_i = \{1,2, \dots, n\}$Donde $n = \sum_{i=1}^{N} \eta_i$ es el número total de operaciones de PM.

A continuación, el problema de ruteo se define en el gráfico auxiliar $G' = (V', A')$ con $V' = V_C \cup \{0, N+1\}$ y $A' = \{(0,i): i \in V_C\} \cup \{(i, N+1): i \in V_C\} \cup \{(i,j): i,j \in V_C, i \neq j\}$. Los nodos 0 y $N+1$ representa el depósito. Se asume un tiempo de servicio cero en el depósito, que es $T_{PM_0} = T_{PM_{n+1}} = 0$ Y $T_{CM_0} = T_{CM_{n+1}} = 0$. Con el fin de construir la formulación matemática, dos conjuntos adicionales son definidos $\Delta^+(i)$ definido como el conjunto de vértices j tal que el arco $(i,j) \in A'$, es decir, los vértices que son directamente accesibles desde i (llamado también sucesores de i). Análogamente $\Delta^-(i)$ definido como el conjunto de vértices j tal que el arco $(j,i) \in A'$, es decir, los vértices de los que i es directamente accesible (predecesores de i).

Se definen un conjunto de variables binarias x_{ijk}^t que toman el valor de 1 sólo si el técnico $k \in K$ en el período $t \in \mathcal{T}$ atraviesa el arco $(i,j) \in A'$ donde $i \neq j$; y tomar el valor de 0, de lo contrario. Otra variable binaria es y_{iqk} que toman el valor de 1 sólo si el cliente $i \in V_C$ es visitado por el técnico $k \in K$ en el patrón $q \in Q_i$; y tomar el valor de 0, de lo contrario. Las variables s_{ik}^t es la hora de inicio de la operación PM en el cliente $i \in V_C$ cuando es realizado por el técnico $k \in K$ en un período $t \in \mathcal{T}$. Además, se define r_{ik}^t como el tiempo de la última renovación anterior a la PM operación del cliente $i \in V_C$ realizado en el período $t \in \mathcal{T}$ por el técnico $k \in K$. Esta variable fue introducida por (E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, et al., 2016) y tiene en cuenta si el ciclo anterior fue preventivo o correctivo, por lo tanto es una variable aleatoria en el modelo.

Entonces el modelo de programación entera mixta se define como:

$$Min \sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} \frac{c_{ij}}{n\mathcal{T}'} x_{ijk}^t + \sum_{k \in K} \sum_{q \in Q_i} \sum_{i \in V_C} \frac{\varphi_{ir}}{\eta_i} y_{iqk} \tag{S-10}$$

S.a.,

$$\sum_{k \in K} \sum_{q \in Q_i} y_{iqk} = 1 \qquad \forall\, i \in V_C \tag{S-11}$$

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{k \in K} \sum_{q \in Q_i} \beta_{iqt} y_{iqk} \geq \eta_i \qquad \forall\, i \in V_C \tag{S-12}$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in \Delta^-(i)} x_{ijk}^t = \sum_{k \in K} \sum_{q \in Q_i} \beta_{iqt} y_{iqk} \qquad \forall\, i \in V_C, t \in \mathcal{T} \tag{S-13}$$

$$\sum_{j \in \Delta^-(i)} x_{jik}^t - \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk}^t = 0 \qquad \forall\, i \in V_C, k \in K, t \in \mathcal{T} \tag{S-14}$$

$$\sum_{j \in \Delta^+(0)} x_{0jk}^t = 1 \qquad \forall\, k \in K, t \in \mathcal{T} \tag{S-15}$$

$$\sum_{j \in \Delta^-(n+1)} x_{j,N+1,k}^t = 1 \qquad \forall\, k \in K, t \in \mathcal{T} \tag{S-16}$$

$$s_{ik}^t + T_{PM_i}\left(1 - F_i(s_{ik}^t - r_{ik}^t)\right) + T_{CM_i}F_i(s_{ik}^t - r_{ik}^t) + \tau_{ij} - M\left(1 - x_{ijk}^t\right) \le s_{jk}^t \qquad \forall (i,j) \in A, k \in K, t \in \mathcal{T} \qquad \text{(S-17)}$$

$$e_i^t \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk}^t \le s_{ik}^t \le l_i^t \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ijk}^t \qquad \forall\, i \in V_C, k \in K, t \in \mathcal{T} \qquad \text{(S-18)}$$

$$e_0^t \le s_{ik}^t \le l_0^t \qquad i \in \{0, N+1\}, k \in K, t \in \mathcal{T} \qquad \text{(S-19)}$$

$$0 \le r_{jk}^t \le l_j^t \sum_{j \in \Delta^-(i)} x_{ijk}^t \qquad i \in V_C, k \in K \qquad \text{(S-20)}$$

$$x_{ijk}^t \in \{0,1\} \qquad \forall (i,j) \in A, k \in K, t \in \mathcal{T} \qquad \text{(S-21)}$$

$$y_{iqk} \in \{0,1\} \qquad \forall\, i \in V_C, q \in Q_i, k \in K \qquad \text{(S-22)}$$

La función objetivo (S-10) minimiza el costo total de ruteo y de mantenimiento. Las restricciones (S-11) asegura que cada cliente utiliza un solo patrón de visita en el horizonte de planeación. Las restricciones (S-12) establece la frecuencia mínima de operaciones de PM. Las restricciones (S-13) vincula las variables de ruta x_{ijk}^t con el patrón de visita y_{iqk} con el fin de construir una ruta factable para los técnicos sobre el horizonte de planeación. El conjunto de restricciones (S-14) asegura que después de que un técnico llegue al vértice i tiene que irse a otro destino. El conjunto de restricciones (S-15) y (S-16) indican que cada técnico debe salir del depósito (nodo 0) y debe llegar al depósito (nodo $N+1$) para cada período t. El conjunto de restricciones (S-17) establece la relación entre la hora de salida del técnico de un cliente y su sucesor inmediato, donde M es un gran número. De acuerdo con (E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, et al., 2016) la duración de la operación de mantenimiento se incluye en estas restricciones y dado que podría ser una operación PM o CM, esta duración es un tiempo esperado dependiente de la probabilidad de falla en el último ciclo ($F_i(s_{ik}^t - r_{ik}^t)$), donde r_{ik}^t es el tiempo de renovación antes de la operación PM i, de ahí el conjunto de restricciones (S-17) son restricciones probabilísticas. El conjunto de restricciones (S-18) y (S-19) hacen cumplir las ventanas de tiempo en los clientes y en el depósito para cada período. Las restricciones (S-20) fuerza $r_{ik}^t = 0$ siempre que la operación de mantenimiento i no es ejecutado por el técnico k en un período t. Por último, el conjunto de restricciones (S-21) Y (S-22) imponen el carácter binario de las variables de decisión.

El modelo anteriormente descrito es un problema de optimización combinatoria estocástica porque el conjunto de restricciones (S-17). Este problema es muy difícil de resolver debido a las variables estocásticas que añaden aún más complejidad a la naturaleza combinatoria del problema. De manera similar de (E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, et al., 2016), se propone aproximar la probabilidad de un fallo antes de la PM cuando está programado en s_{ik}^t por la probabilidad de una falla en el intervalo $[0, \delta_i^*]$ con el fin de reducir la complejidad del problema Por lo tanto, se reemplaza las restricciones (S-17) por (S-23) y de las (S-20) se retiran la variable r_{jk}.

$$s_{ik}^t + T_{PM_i}\left(1 - F_i(\delta_i^*)\right) + T_{CM_i}F_i(\delta_i^*) + \tau_{ij} - M\left(1 - x_{ijk}^t\right) \le s_{jk}^t \qquad \forall (i,j) \in A, k \in K, t \in \mathcal{T} \qquad \text{(S-23)}$$

Con estos cambios, el MR&M se convierte en un problema de optimización combinatoria lineal y determinístico. Sin embargo, este problema es muy difícil de resolver (Kek, Cheu, & Meng, 2008; E. López-Santana, Akhavan-Tabatabaei, et al., 2016) por el conjunto de patrones de visita R_i que es demasiado grande para considerarlo (Francis, Smilowitz, & Tzur, 2008; Rodriguez, Correa, & López-Santana, 2015). Por lo tanto, se utiliza un enfoque de descomposición basado en una formulación de cubrimiento de conjuntos para el método de

generación de columnas para encontrar las rutas y el patrón de visitas a la programación de las operaciones de PM.

Enfoque de descomposición para MR&M

El método de generación de columnas es un algoritmo eficiente para resolver programas lineales más grandes (Nemhauser, 2012). La idea principal de este método consiste en explotar la estructura del problema y sólo considerar un subconjunto de variables para resolver un problema de optimización.

Para aplicaciones en problemas de ruteo, la descomposición se ha aplicado con éxito en VRPTW y VRP periódica (Choi & Tcha, 2007; Grigoriev, Van de Klundert, & Spieksma, 2006; E. R. López-Santana & Romero Carvajal, 2015; Toth & Vigo, 2002b).

El proceso consiste en dado un problema maestro restringido (RMP), se comienza con una solución inicial factible, y se resuelve la relajación lineal de RMP y se obtiene los precios de sombra de cada restricción. Luego se resuelve dos subproblemas independientemente: un generador de rutas y generado de patrones de visitas. El primer subproblema consiste en el generador de rutas que se formula como un problema de ruta más corto elemental con ventanas de tiempo (ESPPTW) para cada período $t \in \mathcal{T}$. El segundo subproblema es un generador de patrones de visita para cada cliente que encuentra la mejor asignación de operaciones PM sobre el horizonte de planificación. Las nuevas rutas y patrones de visita se añaden al RMP y se resuelven de nuevo. Este es un proceso iterativo donde el criterio de detención puede ser la falta de mejora en la función objetivo del RMP, o cuando el proceso iterativo alcanza un tiempo de ejecución máximo permitido. La Figura S.3 ilustra el método propuesto.

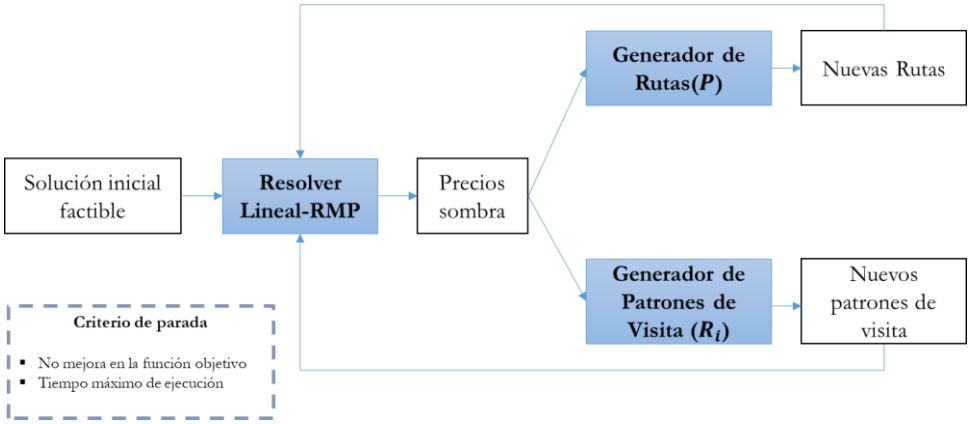


Figura S.3 Enfoque de generación de columnas para resolver el RM.
Fuente: Elaboración propia.

Anexo S.2 Información para el Caso 3

Para el modelo de mantenimiento la instancia considerada es:

MaintColumn R101-1
6 125.0 5 average
1 152.0 769.0 11.0 8.0 19.0 60.0 2.0 0.0 0.3 weibull 0.0 200.0 201
2 125.0 681.0 16.0 10.0 15.0 72.0 2.5 0.0 0.3 weibull 0.0 200.0 201
3 185.0 641.0 13.0 8.0 27.0 110.0 3.5 0.0 0.2 weibull 0.0 200.0 201
4 126.0 705.0 14.0 6.0 16.0 125.0 2.0 0.0 0.2 weibull 0.0 200.0 201
5 102.0 790.0 17.0 8.0 22.0 84.0 3.5 0.0 0.1 weibull 0.0 200.0 201
6 168.0 728.0 15.0 8.0 29.0 33.0 3.0 0.0 0.3 normal 0.0 200.0 201

La siguientes es la instancia empleada para el caso de 6 clientes en el modelo de ruteo:

```
D 230.0
K 6
T 5
V 6
Nodo        x             y             lbtw          ubtw          Tm            fmin          fmax          1             2
                3             4             5
0 35.0 35.0 0.0 230.0 0.0 0 0         0.0           0.0           0.0           0.0           0.0
1 41.0 49.0 161.0 171.0 8.0 3 5       8.57          7.86          7.54          7.58          8.29
2 35.0 17.0 50.0 60.0 10.0 3 5        5.85          4.82          4.71          5.39          4.74
3 55.0 45.0 116.0 126.0 8.0 1 3       9.03          4.27          3.42          8.85          4.24
4 55.0 20.0 149.0 159.0 6.0 2 4       7.09          4.06          3.85          4.52          3.83
5 15.0 30.0 34.0 44.0 8.0 2 4         5.01          3.09          3.88          3.25          3.32
6 25.0 30.0 99.0 109.0 8.0 3 5        8.19          11.41         5.36          6.19          11.74
P 6
1             0
2             0
3             0
4             0
5             0
6             0
R 2
1             2             3             4             5             0
1             2             3             4             5             0
1             2             3             4             5             6             0
1             3             5             0
```

La siguiente es la instancia empleada para realizar la comparación con los patrones de mantenimiento iniciales:

```
D 230.0
K 6
T 5
V 6
Nodo      x       y       lbtw      ubtw      Tm        fmin      fmax      1       2       3       4       5
0 35.0 35.0 0.0 230.0 0.0 0 0       0.0       0.0       0.0       0.0       0.0
1 41.0 49.0 161.0 171.0 8.0 3 5     8.57      7.86      7.54      7.58      8.29
2 35.0 17.0 50.0 60.0 10.0 3 5      5.85      4.82      4.71      5.39      4.74
3 55.0 45.0 116.0 126.0 8.0 1 3     9.03      4.27      3.42      8.85      4.24
4 55.0 20.0 149.0 159.0 6.0 2 4     7.09      4.06      3.85      4.52      3.83
5 15.0 30.0 34.0 44.0 8.0 2 4       5.01      3.09      3.88      3.25      3.32
6 25.0 30.0 99.0 109.0 8.0 3 5      8.19      11.41     5.36      6.19      11.74
P 6
1       0
2       0
3       0
4       0
5       0
6       0
R 10
1       2       3       4       5       0
1       3       5       0
2       4       5       0
1       3       4       0
2       4       5       0
1       2       4       0
2       3       0
4       5       0
1       0
5       0

1       2       3       4       5       6       0
1       2       6       0
1       2       3       4       5       6       0
1       2       6       0
1       2       3       4       5       6       0
1       2       3       4       5       6       0
4       5       0
4       5       0
3       0
3       0
```