

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO DE PERTURBACIONES HIDRÁULICAS Y DE PROCESO EN EL TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS

Jhon Alexander Gómez Díaz

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Especialización en Informática y Automática Industrial
Facultad de Ingeniería
Bogotá, Colombia
2025

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PREDICTIVO DE PERTURBACIONES HIDRÁULICAS Y DE PROCESO EN EL TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS

Jhon Alexander Gómez Díaz

Propuesta de trabajo de grado presentada como requisito parcial para optar al título de:

Especialista en Informática y Automática Industrial

Director:

Jose Jairo Soriano Méndez

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Faculta de Ingeniería
Bogotá D.C., Colombia
2025

Tabla de Contenido

Pág.

LISTADO DE TABLAS VI
LISTADO DE FIGURAS VII
ABREVIATURAS IX
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 1
2. JUSTIFICACIÓN 5
3. OBJETIVOS 7
3.1. OBJETIVO GENERAL 7
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS 7
4. MARCO TEORICO 8
4.1. MEDIOS DE TRANSPORTE ONSHORE 8
4.2. EQUIPOS E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL EN ESTACIONES DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS 9
4.2.1. TANQUES 10
4.2.2. FILTROS 10
4.2.3. MEDIDORES 10
4.2.4. TRANSMISORES Y TRANSDUCTORES 12
4.2.5. VÁLVULAS 12
4.2.6. UNIDADES DE BOMBEO 13
4.3. PERTURBACIONES EN TUBERÍAS DE HIDROCARBUROS 14
4.4. SISTEMAS DE CONTROL 15
4.4.1. SELECTOR DE MÍNIMAS 17
4.4.2. SISTEMAS DE CONTROL PREDICTIVOS 18
5. ESTADO DEL ARTE 20
5.1. ESTRATEGIAS AVANZADAS DE CONTROL ÓPTIMO Y PREDICTIVO DISCRETO APLICADAS AL SISTEMA DE BOMBEO DE PETRÓLEO POR ACCIONAMIENTO MECÁNICO 20
5.2. CONTROLADOR PREDICTIVO BASADO EN MODELO NO LINEAL (NMPC) PARA OPTIMIZAR LA OPERACIÓN DE UN POZO PETROLERO 21
5.3. HYBRID NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL OF A COOLING WATER NETWORK 22
5.4. MODEL PREDICTIVE CONTROL OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES 23

5.5. ESTUDIO DEL EFECTO DEL GOLPE DE ARIETE EN ESTACIONES DE BOMBEO, OLEODUCTOS 24
6. METODOLOGÍA 25
6.1. EVALUACIÓN DEL PROCESO 25
6.2. SELECCIÓN DEL MODELO DE CONTROL 25
6.3. SIMULACIÓN DEL SISTEMA E INTEGRACIÓN DEL CONTROL 25
6.4. EVALUACIÓN DEL SISTEMA 26
6.5. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE COMUNICACIÓN 27
7. ALCANCE Y LIMITACIONES 28
7.1. ALCANCE 28
7.2. LIMITACIONES 28
8. EVALUACIÓN DEL PROCESO 29
8.1. RECOLECCIÓN DE DATOS HISTÓRICOS 29
8.2. RED DE DATOS 30
8.3. PROCESO DE EXTRACCIÓN DE DATOS DEL COLECTOR 31
8.4. ALMACENAMIENTO EN LA NUBE 32
8.5. ENLACE CLOUD HISTORIAN / CIO 32
8.6. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO 33
8.7. EFECTO DE LA PERTURBACIÓN EN EL SISTEMA DE CONTROL ACTUAL 39
8.8. SISTEMA DE TRANSPORTE DE ODECA 41
8.8.1. CARACTERIZACIÓN DEL POLIDUCTO 41
8.8.2. PERFIL DE LÍNEA DEL POLIDUCTO 42
8.8.3. ESQUEMA TÍPICO DE BACHEO 43
8.8.4. CARACTERIZACIÓN DE LAS INSTALACIONES 43
9. SELECCIÓN DEL MODELO DE CONTROL 45
9.1. EXPERIMENTALES 45
9.2. ANALÍTICOS 46
9.3. PROPUESTA DE CONTROL 47
9.3.1. ASR_H – ALARMA ALTA SUCCIÓN REMOTA 48
9.3.2. ASR – ALARMA SUCCIÓN REMOTA 49
9.3.3. FRPD – Factor de reducción de la presión de descarga 50
9.3.4. PDR_{ASR} PRESIÓN DE DESCARGA RESULTANTE DEL ASR 51
9.3.5. LIMITES DE CONTROL PARA EL MODELO 51

9.3.6. IDENTIFICACIÓN DE LAZOS A CONTROLAR 54
10. SIMULACIÓN DEL SISTEMA E INTEGRACIÓN DEL CONTROL.....55
10.1. SIMULACIÓN DEL PROCESO EN ASPEN 55
10.2. VALIDACIÓN DE SIMULACIÓN 58
10.3. CONFIGURACIÓN SISTEMA DE CONTROL 59
10.4. INTEGRACIÓN SIMULADOR Y SISTEMA DE CONTROL..... 61
11. EVALUACIÓN DEL SISTEMA 63
11.1. VALIDACIÓN OPERACIONAL DEL ASR_H 63
11.2. TIEMPO DE RETARDO DE ONDA HIDRÁULICA 64
11.3. RESULTADOS SISTEMA DE CONTROL 65
12. SELECCIÓN MÉTODO COMUNICACIÓN 67
12.1. DIAGNÓSTICO TELECOMUNICACIONES..... 67
12.2. PROPUESTA DE TELECOMUNICACIONES 68
12.3. TIEMPOS DESEADOS DE COMUNICACIÓN DEL SISTEMA 69
13. CONCLUSIONES.....72
13.1. EVALUACIÓN DEL PROCESO 72
13.2. SELECCIÓN DEL MODELO DE CONTROL..... 72
13.3. SIMULACIÓN DEL SISTEMA E INTEGRACIÓN DEL CONTROL 73
13.4. EVALUACIÓN DEL SISTEMA..... 73
13.5. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE COMUNICACIÓN 74
14. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 75

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones de línea segmento de bombeo ODECA 42
Tabla 2. Especificaciones de diseño equipos planta Puerto Salgar 44
Tabla 3. Especificaciones de diseño equipos planta Mariquita 44
Tabla 4. Especificaciones de diseño equipos planta Fresno 44
Tabla 5. Especificaciones de diseño equipos planta Herveo 44
Tabla 6. Valores de ASR_H para el control del sistema ODECA..... 49
Tabla 7. Valores de ASR para el control del sistema ODECA 50
Tabla 8. Valores de FRDP para el control del sistema ODECA 51
Tabla 9. Valores de PDR_{ASR} para el control del sistema ODECA 51
Tabla 10. Interlock de control planta Puerto Salgar 52
Tabla 11. Interlock de control planta Mariquita 52
Tabla 12. Interlock de control planta Fresno 53
Tabla 13. Interlock de control planta Herveo 53
Tabla 14. Lazos de control estaciones de bombeo sistema ODECA 54
Tabla 15. Tiempos resultantes del cambio de presión en evento crítico 63
Tabla 16. Tiempos de retardo de onda hidráulica sistema ODECA..... 65
Tabla 17. Listado de señales a compartir..... 69
Tabla 18. Tiempos en el sistema de control 70
Tabla 19. Tiempo retardo telecomunicaciones 71

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de bombeo en sistemas de transporte de hidrocarburos 1
Figura 2. Efectos de la perturbación en el sistema de control actual 2
Figura 3. Representación de instrumentos y controladores según norma ISA 5.1 10
Figura 4. Tipos de medidores usados en la industria del petróleo 11
Figura 5. Esquema de cadena de medida 12
Figura 6. Esquema de una bomba centrifuga 13
Figura 7. Esquema de una bomba reciprocante 14
Figura 8. Comportamiento de la presión con una perturbación hidráulica 15
Figura 9. Arquitectura base de un sistema de control redundante 16
Figura 10. Esquema selector de mínimas para el control de bombeo 18
Figura 11. Estrategia de control predictivo..... 20
Figura 12. Esquema de operación pozo petrolero 21
Figura 13. Esquema de control y manipulación booleana con algoritmo de árbol 22
Figura 14. Ventajas de aplicación de modelos predictivos en motores 23
Figura 15. Efectos por los golpes de ariete en los impulsores de las bombas centrifugas 24
Figura 16. Arquitectura en la nube 33
Figura 17. Script para detección de cruces por flujo cero 34
Figura 18. Script para detección de puntos de recuperación 34
Figura 19. Identificación de paradas de bombeo en círculos naranja 35
Figura 20. Prueba de rachas en SPSS según la mediana 35
Figura 21. Prueba de rachas en StatFit según la mediana 35
Figura 22. Prueba de rachas en StatFit según TurningPoints 36
Figura 23. Resumen código en R para entrenamiento de modelo por Caret 37
Figura 24. Matriz de confusión y estadísticas modelo Caret 38
Figura 25. Resumen código en R entrenamiento de modelo RandomForest 38
Figura 26. Matriz de confusión y estadísticos modelo RandomForest 39
Figura 27. Tendencia de comportamiento de flujo ante una perturbación 40
Figura 28. Tendencia de comportamiento de presiones ante una perturbación 40
Figura 29. Esquema sistema de transporte ODECA 41
Figura 30. Perfil de elevación del poliducto 43
Figura 31. Esquema típico de bacheo 43
Figura 32. Esquema de control propuesto, acción sobre controlador de descarga de la estación anterior, según predicción del algoritmo de detección de perturbación 48
Figura 33. Perfil de control mediante ASR_H 49
Figura 34. Diagrama de bloques del proceso planta Puerto Salgar 56
Figura 35. Diagrama de bloques del proceso planta Mariquita 56
Figura 36. Diagrama de bloques del proceso planta Fresno 57
Figura 37. Diagrama de bloques del proceso planta Herveo 57
Figura 38. Resultado simulación transporte hidrocarburos, sistema ODECA 58
Figura 39. Bloques funcionales para el control propuesto planta Mariquita 59
Figura 40. Bloques funcionales para el control propuesto planta Fresno 59

Figura 41. Bloques funcionales para el control propuesto planta Herveo 60
Figura 42. Bloques funcionales para el control propuesto planta Puerto Salgar 60
Figura 43. Bloques funcionales para el control de unidades planta Puerto Salgar 60
Figura 44. Acceso a Macro Languague Editor 61
Figura 45. Creación de Hysys Case 61
Figura 46. Creación subrutina DDE 62
Figura 47. Asignación de unidad de proceso a variable 62
Figura 48. Esquema para comunicación bidireccional ASPEN y RSLogix 62
Figura 49. Arquitectura integrada de simulador y control 62
Figura 50. Comportamiento de la presión ante evento hidráulico en Mariquita 64
Figura 51. Comportamiento presión de despacho y recibo ante un evento hidráulico en la planta Puerto Salgar y Mariquita 65
Figura 52. Comportamiento presión y flujo ante un evento hidráulico bajo el efecto del sistema de control propuesto 66
Figura 53. Comportamiento presión y flujo ante un evento hidráulico bajo el efecto del sistema de control actual 66

Abreviaturas

Abreviatura	Término
BLS	Barriles
BPH	Barriles por hora
KBPD	Kilo Barriles Por Día
mM	Miles de Millones
PLC	Programmable Logic Controller
PMO_R	Máxima presión de operación al recibo
MPD	Mínimo valor de presión de descarga
ASR	Alarma de Succión Remota
ASR_H	Alarma de Alta Succión Remota
PDR_{ASR}	Presión de descarga resultante del ASR
FRPD	Factor de reducción de la presión de descarga

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

CENIT lidera dentro del Grupo Empresarial Ecopetrol – GEEE, el segmento de transporte y logística de hidrocarburos, derivados y afines más conocido como Midstream, con 28 sistemas de transporte de crudo y refinados, compuestos por una red de Oleoductos de 2.969 km, una red de Poliductos de 3.681 km y una red de oleoductos de las filiales es de 1.817 km. [1]

Estos sistemas se encuentran compuestos por plantas que se clasifican según su ubicación en la cadena de transporte, como plantas iniciales o cabecera, donde se despacha desde tanques, plantas de rebombeo, donde se reimpulsa el hidrocarburo mediante bombas y plantas finales donde se recibe el producto en tanques para realizar entrega a clientes o refinación *(Fig. 1)*. Las plantas iniciales y de rebombeo tienen afectaciones que no permiten la continuidad de la operación, llamadas paros de bombeo, que reducen el factor de servicio, causadas por perturbaciones al proceso en las plantas aguas arriba o aguas abajo de la planta, que se traduce en la no disponibilidad del sistema. [2]

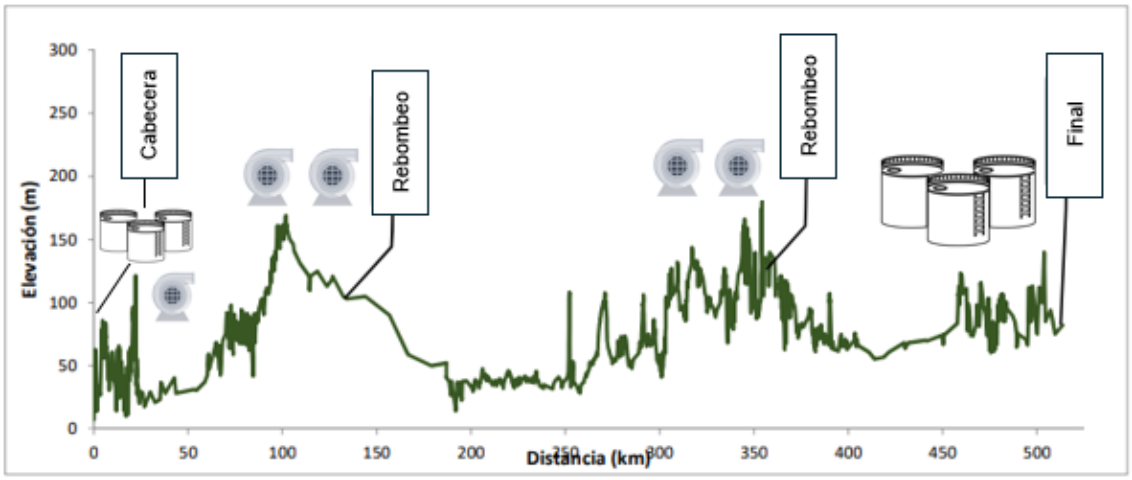


Figura 1. *Esquema de bombeo en sistemas de transporte de hidrocarburos (Elaboración propia)*

Debido a la altimetría variable de los sistemas de bombeo se presentan perturbaciones hidráulicas y/o de proceso que conllevan a paros de bombeo no programados, en la figura 2, se muestra un extracto de 49 minutos de operación donde se ve la inestabilidad del sistema producto del evento, en un mes promedio se puede encontrar alrededor de 58 eventos de este tipo que no son regulados por el sistema de control actual.

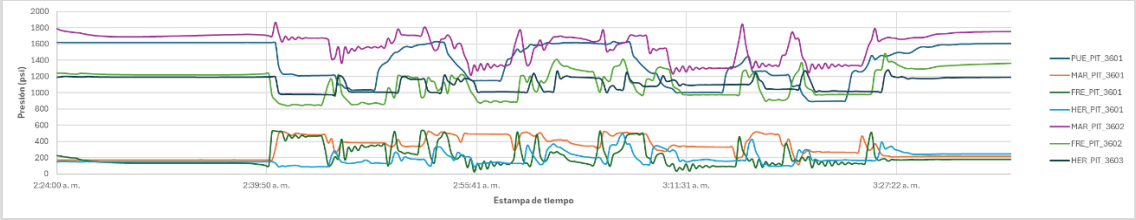


Figura 2. *Efectos de la perturbación en el sistema de control actual (Elaboración propia)*

Para calcular la afectación al servicio de transporte se toma en cuenta los eventos registrados como afectación al bombeo (Incluye eventos Operacionales, de Proyectos y Asociados a los activos de estaciones y líneas). El cálculo de la afectación a disponibilidad del sistema (*Ecuación (1)*) se describe a continuación:

$$\boldsymbol{Af_i = F_N - \bar{F}_\iota \times t_i} \qquad \textbf{(1)}$$

Donde:

- Af_i = Afectación a la disponibilidad del sistema en barriles de un evento registrado como evento de afectación al bombeo
- $\bar{F}_\iota$ = Flujo promedio del sistema durante un evento de afectación. Para eventos de parada es igual a cero (0)
- t_i = Duración en horas de un evento de afectación al bombeo
- F_N= Capacidad nominal del sistema de transporte en barriles por hora (BPH)

El cálculo del factor de servicio del sistema, asociado a eventos no programados bajo gestión de CENIT *(Ecuación (2))* se describe a continuación:

$$\boldsymbol{FS_b}[\%] = \mathbf{1} - \frac{\sum \boldsymbol{Af_i}}{\boldsymbol{F_N} \times \boldsymbol{t_i}} \times \mathbf{100} \qquad \textbf{(2)}$$

Donde:

- FS(b) = Factor de Servicio base, asociado a eventos No Programados bajo gestión de Cenit.
- $\sum \mathrm{Af_i}$ = Sumatoria de las afectaciones de los eventos dentro del periodo analizado
- $\mathrm{t_i}$ = Periodo analizado sobre el cual se calcula el Factor de Servicio. Como calculo base para el insumo de la mesa se considera los últimos tres (3) meses.
- $\mathrm{F_N}$ = Capacidad nominal del sistema de transporte en barriles por hora (BPH)

Utilizando las ecuaciones 1 y 2, se reportan afectaciones por alrededor de 66 kbls en el sistema de transporte Salgar-Yumbo L6" y un factor de servicio del 92% de las nominaciones programadas para el año 2022 [1]. Actualmente, no existe un modelo de control que integre los datos operacionales de las plantas del sistema de transporte de hidrocarburos y que actúe de manera predictiva ante cualquier perturbación de proceso para mitigar los efectos que pueden llevar a una afectación al bombeo, modificando los lazos de control por selectores de mínimas en las unidades de bombeo, sobre las variables de presión de succión, presión de descarga y flujo según el tipo de planta.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

Teniendo en cuenta lo anterior, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo puede implementarse un modelo de control que responda ante perturbaciones al proceso generadas por variaciones en la presión y flujo en las plantas interconectadas al sistema de transporte de hidrocarburos líquidos, de manera autónoma y manteniendo la operación en sus límites seguros?

2. JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de modelos para el control de unidades por perturbaciones hidráulicas propias de las condiciones geográficas que atraviesan los oleoductos y poliductos de Colombia no es ampliamente estudiado en la actualidad, por lo tanto, se hace necesario un estudio del comportamiento del fenómeno de perturbaciones en sistemas de transporte de hidrocarburos, para su aplicación en el control de procesos de bombeo de manera predictiva, manteniendo la operación dentro de limites seguros.

Para el 2022 CENIT, realizó la evacuación diaria de petróleo de 772.633 KBPD de crudo y transporte de 298.119 KBPD de petróleo refinado generando una utilidad neta de 4.585 mM COP. [1] CENIT espera un crecimiento correlacionado directamente con el incremento en la demanda nacional de combustibles refinados, estimado en niveles superiores al 1% anual para el largo plazo [1], por lo que, una estrategia de control que reduzca las paradas de bombeo del sistema de transporte de hidrocarburos será crucial para cumplir con esta proyección.

En cuanto al valor económico generado para sus grupos de interés, se tienen inversiones a través de sus programas socioambientales de 63,3 mM COP, el pago de 4.958 mM COP a proveedores de capital, y el pago de 381 mM COP correspondientes a salarios y beneficios de los trabajadores de la compañía. La optimización del uso de la infraestructura y el aumento de la confiabilidad de los sistemas de control permitirá aumentar la conexión con grupos de interés y articular la inversión en los territorios.

Actualmente, uno de los mayores retos en las industrias del sector petrolero es el suministro suficiente, seguro y sostenible de energía; debido a que las necesidades energéticas se ubican en un 53% del consumo total de energía de la población de América Latina y el Caribe [3], teniendo en cuenta una demanda creciente en los

diversos países para alcanzar su bienestar socioeconómico. Esto ha llevado a la implementación de métodos que permitan el uso eficiente de la energía eléctrica y uso de combustibles fósiles en aras de tener un mejor desempeño energético.

Para CENIT los arranques y paradas de bombeo no programadas por eventos de proceso, se traducen en un mayor consumo de energía eléctrica y/o de combustibles como ACPM según el tipo de unidad de bombeo y una reducción en la vida útil de la maquinaria; en un mes típico se pueden presentar alrededor de 58 paradas de bombeo con duración promedio de 10 minutos por cada una y también una dificultad en el restablecimiento del sistema. Es por ello, que una lógica que actúe de manera predictiva a estas perturbaciones de proceso conllevará a una mayor eficiencia energética y un consumo eficiente de combustibles fósiles, que no solo se refleja como un beneficio ambiental sino también como un beneficio económico al no ser catalogados como grandes consumidores individuales no intermediarios de ACPM, donde se establece el límite de consumo en 10.000 BLS por trimestre, según el inciso segundo del artículo 3 del Decreto 2935 de 2002. [4]

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y simular un sistema de control predictivo para mantener la operación dentro de sus límites seguros, ante las perturbaciones de proceso generadas en las plantas de transporte de hidrocarburos líquidos aguas arribas o aguas abajo del sistema de transporte Salgar – Yumbo L6”

3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

a) Evaluar el comportamiento estadístico del fenómeno de las perturbaciones de las variables de proceso (presión de succión, presión de descarga y flujo) y revisión del tipo de unidades de bombeo del sistema de transporte Salgar – Yumbo L6”

b) Seleccionar un modelo de control predictivo que permita modificar parámetros de las unidades de bombeo aguas arriba o aguas abajo de la planta que presenta la perturbación

c) Simular el sistema de transporte Salgar – Yumbo L6” e integrar el modelo de control seleccionado.

d) Proponer un método de comunicación de datos para el intercambio de las variables de proceso entre plantas del sistema de transporte Salgar – Yumbo L6”

e) Evaluar el sistema de transporte ante condiciones anormales.

4. MARCO TEORICO

La cadena de valor de la industria del petróleo se encuentra conformado por tres sectores, el *upstream* que corresponde a las actividades propias del subsuelo tales como exploración, explotación y producción de los hidrocarburos. El *midstream* que corresponde a las actividades propias del almacenamiento y transporte. Por último, el *downstream* que corresponde a las actividades de refinamiento en caso del crudo o distribución al usuario final en caso de refinados. [5]

El transporte de hidrocarburos tiene una gran relevancia a nivel mundial, debido a que permite la interconexión entre los campos de exploración / explotación, estaciones de almacenamiento, estaciones de rebombeo y estaciones finales de refinamiento o de comercialización con clientes, para esto se utilizan gasoductos, poliductos y oleoductos desde el campo de producción *onshore* o buque tanques *offshore*. [6]

4.1. MEDIOS DE TRANSPORTE ONSHORE

a) Carro tanques

Medio utilizado para el transporte de hidrocarburos refinados desde las refinerías hasta los consumidores finales o transporte de hidrocarburos no refinados desde los pozos de producción hasta estaciones de almacenamiento. A causa de los altos costos, se utilizan para distancias no mayores de 400 km. El producto es transportado de forma líquida, por lo que estos medios se encuentran dotados de una serie de características de seguridad como revestimientos resistentes a la corrosión, protección contra electricidad estática, contenedores presurizados o refrigerados, entre otros. [7]

b) Poliductos – Oleoductos

Medio de transporte de hidrocarburos refinados y no refinados con mayor capacidad y menor costo por unidad transportada (barriles). Para este tipo de

transporte, el impulso del hidrocarburo se asegura a través de unas bombas ubicadas en la estación cabecera y una interconexión con estaciones de rebombeo según el perfil hidráulico de la línea. Esta tubería se encuentra dotada con válvulas de seccionamiento para facilitar acciones de mantenimiento y mitigación de emergencias, construida típicamente con los materiales, soldaduras y aislamientos definidos en las normas API 5L, API 1104, ASTM D4541 y ASME B31.4. [8]

4.2. EQUIPOS E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL EN ESTACIONES DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS

Las estaciones de transporte de hidrocarburos deben tener una serie de elementos mínimos que permitan una operación segura y confiable, entre ellos se encuentran válvulas motorizadas, con estados, de alivio, de control de presión, transmisores de presión, temperatura, velocidad, vibración. Así como equipos que doten de capacidad a las instalaciones como lo son tanques y unidades de bombeo.

Este conjunto de instrumentos y equipos se clasifican según la variable operacional, la función que cumple (indicar, transmitir, controlar, registrar) y el tipo de instrumento (mecánicos, eléctricos, neumáticos, hidráulicos). [9] Su representación en planos de proceso o diagramas de instrumentación, se rigen bajo las especificaciones de las normas ISA que dan lineamientos para la nomenclatura de cada equipo e instrumento.

En la figura 2, se muestra un ejemplo de la representación de un transmisor de flujo y un controlador de nivel, donde la primera letra corresponde a la variable operacional, la segunda y tercera letra indican la función del instrumento y el ultimo elemento corresponde a la numeración que sirve para identificar el área de proceso o el lazo de control al que se encuentra asociado.

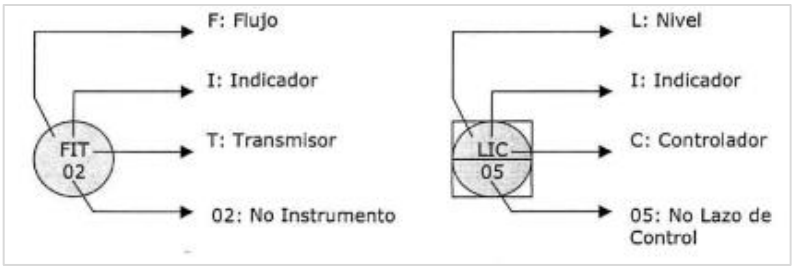


Figura 3. *Representación de instrumentos y controladores según norma ISA 5.1 [10]*

A continuación, se listan los equipos e instrumentos más relevantes en el proceso de transporte de hidrocarburos y su control.

4.2.1. TANQUES

Elementos utilizados para el almacenamiento de hidrocarburos refinados, no refinados y no definidos. Estos se pueden clasificar según su capacidad, forma, tamaño y tipo de producto de almacenado. Deben cumplir con requerimientos específicos para la protección contra lo corrosión, conocido como protección catódica. [11]

4.2.2. FILTROS

Elemento utilizado para eliminar los contaminantes solidos antes del transporte por el oleoducto, de manera tal, que se reduzcan los tiempos de inactividad. Por otro lado, también son utilizados para la separación de fluidos para maximizar la vida útil de las tuberías y equipos aguas abajo. Los más usados en la industria del transporte de hidrocarburos en Colombia son los filtros de canasta, los filtros coalescentes y los micrónicos. [11]

4.2.3. MEDIDORES

Estos elementos cumplen una función vital en el control de inventario de manera dinámica o estática, en el control de procesos y en la transferencia de custodia. Según el método de medición se pueden clasificar en cuatro categorías: flujo másico, flujo de velocidad, presión diferencial y desplazamiento positivo.

Los medidores de flujo másico son aquellos que miden la cantidad de líquido que pasa a través del medidor en una unidad determinada de tiempo. Dentro de esta categoría se encuentra el medidor Coriolis que usa la mecánica del movimiento, dividiendo el fluido del proceso en dos tubos que oscilan en direcciones opuestas, estas vibraciones generan un voltaje, que crean ondas sinusoidales y el tiempo de retraso en el movimiento es proporcional a la tasa de flujo másico. [12]

Los medidores de flujo de velocidad son aquellos que calculan la magnitud a partir de un rotor de giro libre, cada revolución es leída por un captador magnético y corresponde a un volumen especifico de líquido. Dentro de esta categoría se encuentra el medidor de vórtice y el medidor de flujo de turbina, se caracterizan por sus bajos costos de mantenimiento y su uso en fluidos monofásicos. [12]

Los medidores de presión diferencial son aquellos que miden la caída de presión a través de una obstrucción fija insertada en la ruta de flujo del fluido, en esta categoría se encuentran las platinas de orificio y los tubos Venturi determinando el caudal mediante las ecuaciones de Bernoulli. [12]

Los medidores de desplazamiento positivo son aquellos que usan el fluido para desplazar componentes mecánicos, dentro de los más comúnmente usados se tienen los de diafragma. Es importante mencionar que para obtener mediciones precisas se requiere de instrumentación de presión y temperatura para compensar la variabilidad. [12]



Figura 4. Tipos de medidores usados en la industria del petróleo *[12]*

4.2.4. TRANSMISORES Y TRANSDUCTORES

Se encargan de indicar la magnitud de las variables operacionales, la transmisión de las señales a los controladores y la transmisión a instrumentos que son los elementos finales de control en el proceso, así como otros equipos y dispositivos de seguridad. [9]

Cada variable operacional que deba ser medida requiere de un transmisor, los cuales se deben instalar próximos al área que genera la variable representativa a medir. Cada transmisor debe ir acompañado de un conjunto de acondicionamiento de señal con elementos como filtros, amplificadores y procesamiento. [13]

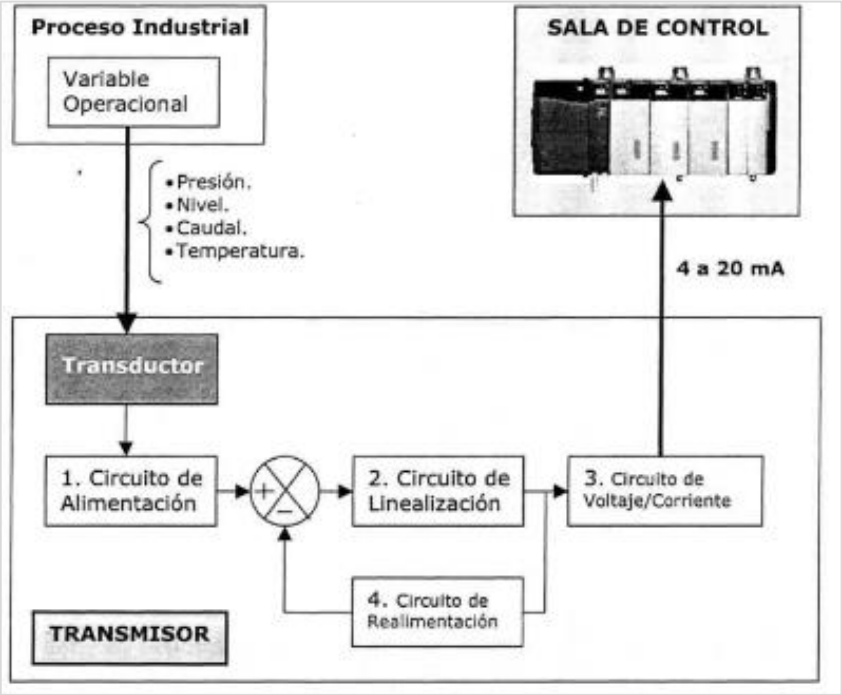


Figura 5. *Esquema de cadena de medida [9]*

4.2.5. VÁLVULAS

Elementos distribuidos a lo largo del poliducto y dentro de las estaciones de bombeo o almacenamiento de hidrocarburos que permiten controlar el paso, actuar como elementos de seguridad o como elementos de control. El tipo de válvulas comúnmente usadas en Colombia contemplan válvulas de bola y de

cortina, construidas en un acero al carbón, con diámetros desde 2” hasta 42” y unidas a la tubería mediante bridas. [14]

4.2.6. UNIDADES DE BOMBEO

Se usan en la industria de transporte de hidrocarburos con el fin de asegurar el flujo continuo y seguro de los fluidos a través de largas distancias y diferentes alturas, añadiendo la energía necesaria para impulsar el hidrocarburo desde una estación inicial hasta una final, incluyendo las estaciones de rebombeo.

Existen de diversos tipos, pero las más utilizadas en Colombia son bombas centrifugas, por su capacidad de manejo de altos volúmenes y bombas reciprocantes por su capacidad de trabajo en aplicaciones de alta presión. La API 685 establece los criterios para la selección, diseño, fabricación, prueba, instalación, operación y mantenimiento de bombas centrífugas de proceso para aplicaciones críticas en la industria de petróleo. [15]

Las bombas centrifugas son máquinas rotativas que transforman la energía mecánica de un impulsor. El fluido entra por el centro del rodete, que dispone de unos álabes para conducir el fluido, y por efecto de la fuerza centrífuga es impulsado hacia el exterior, donde es recogido por la carcasa de la bomba y lo conduce hacia las tuberías de salida, el elemento transmisor de energía se denomina impulsor rotatorio que aporta la energía cinética. [16]

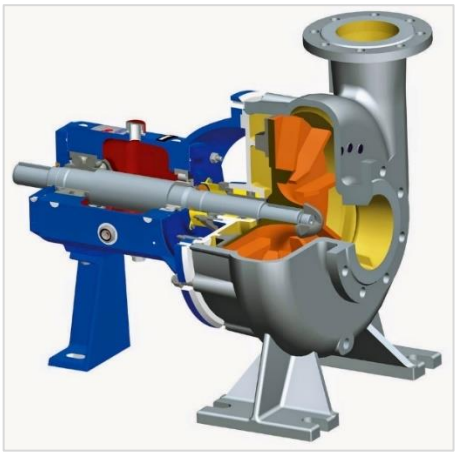


Figura 6. *Esquema de una bomba centrifuga [16]*

Las bombas reciprocantes reciben un volumen fijo de líquido en condiciones de succión, lo comprime y lo expulsa por la boquilla de descarga, teniendo como elemento de transmisión de energía un pistón, embolo o diafragma. La bomba reciprocante no es cinética como la centrifuga y no requiere velocidad para producir presión, pues se pueden obtener presiones altas a bajas velocidades, ventaja para el manejo de fluidos altamente viscosos. [17]

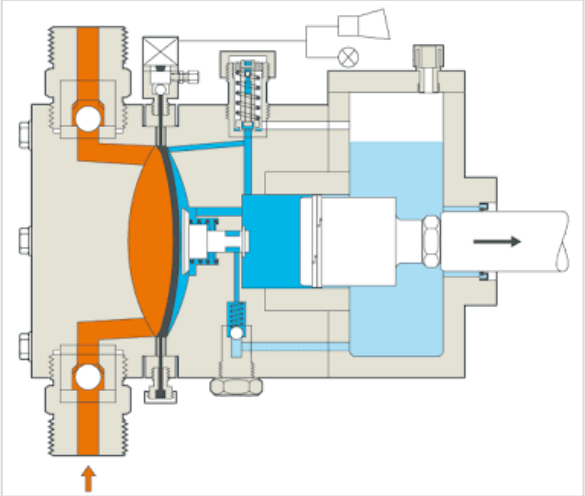


Figura 7. *Esquema de una bomba reciprocante [17]*

4.3. PERTURBACIONES EN TUBERÍAS DE HIDROCARBUROS

Los fenómenos hidráulicos y de proceso en las tuberías son producidos por variaciones de velocidad en el fluido transportado bien sea por cierre de válvulas o por paradas abruptas del bombeo, este fenómeno se debe al movimiento oscilatorio complejo que se propaga en forma de ondas, generando deformaciones y tensiones que generan altas presiones, a causa de la transformación de energía cinética en energía de presión y energía elástica, estos transitorios hidráulicos se propagan por todo el sistema a la velocidad del sonido. [18]

La detección y prevención es de suma importancia, para proteger la integridad física de las tuberías y sistemas asociados, incluyendo el medio ambiente, comunidades y seguridad de los trabajadores. Adicionalmente, estas

perturbaciones llevan a una disminución en la eficiencia operativa, incremento en los costos de mantenimiento y reducción en la vida útil de los equipos. [19]

Dentro de los tipos de vibraciones que se pueden presentar en los sistemas de tuberías se tienen vibraciones inducidas por flujo, vibraciones inducidas acústicamente, pulsaciones de bombas y compresores, resonancia, energía mecánica de turbomáquinas, golpe de ariete y cavitación y flashing. [19]

Las dos más comunes por efectos del bombeo son golpe de ariete que es producido por cambios rápidos en la velocidad del fluido, este cambio genera ondas de presión interna excesiva, colapso de la tubería y fugas en las bridas; y las pulsaciones producto de fluctuaciones en la presión y el flujo del fluido, generando una variación rítmica que se propaga a lo largo de la tubería y generan movimientos oscilantes que pueden resonar con la frecuencia natural de la tubería y ocasionar rupturas. [19]

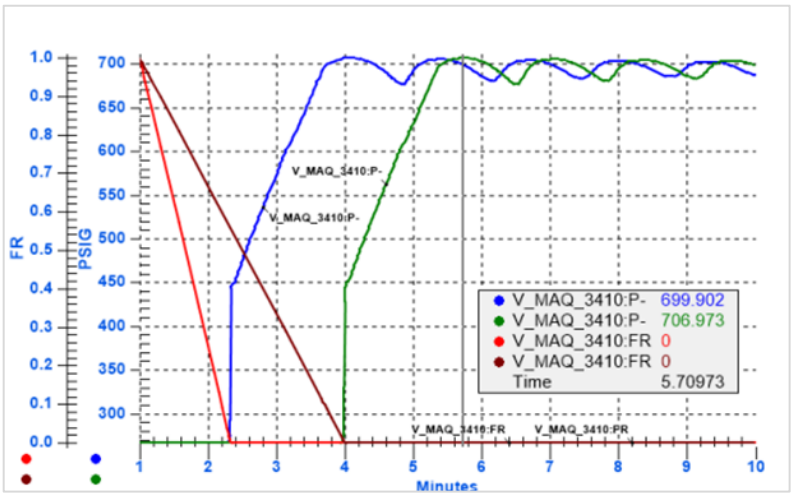


Figura 8. *Comportamiento de la presión con una perturbación hidráulica (Elaboración propia)*

4.4. SISTEMAS DE CONTROL

La industria de petróleo y gas utiliza controladores lógicos programables de gran capacidad debido a los requerimientos a nivel de entradas y salidas de señales digitales y análogas, ya que proporcionan automatización, control y monitoreo de procesos críticos.

Los PLC utilizados en la industria del petróleo tienen una arquitectura base compuesta por dos controladores redundantes presentes en dos chasis diferentes, que tienen su propia fuente de alimentación para brindar independencia y continuidad al controlador presente en el chasis. El controlador posee una ranura para cambiar el modo del controlador a RUN, STOP o RESET. [20]

Para establecer la redundancia entre los controladores, servidores y switches se instalan módulos de redundancia en ambos chasis conectados mediante un cable de fibra óptica, con la conexión estable se determina cual es el principal y cuál es el secundario asegurando la igualdad del programa cargado sobre cada controlador. En la figura 8, se observa una arquitectura base para una estación con módulos de redundancia.

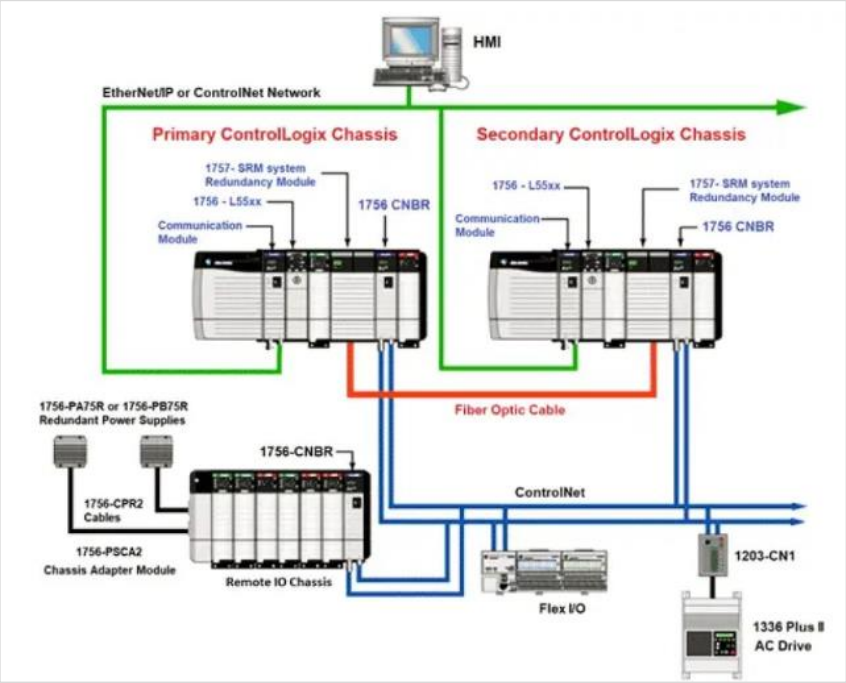


Figura 9. *Arquitectura base de un sistema de control redundante [21]*

4.4.1. SELECTOR DE MÍNIMAS

Es una estrategia utilizada en el control de sistemas de bombeo industriales para garantizar la operación segura y eficiente. Es ampliamente usado cuando se tienen múltiples lazos de control, generalmente en presión de succión, presión de descarga y flujo. Este selector se encarga de seleccionar el valor más restrictivo para evitar daños en la bomba o en el sistema. [21]

El selector escoge cual variable actual sobre el control, según la mínima diferencia en porcentaje que se tenga con el setpoint, de manera que, para proteger el sistema de cavitación va a controlar el bombeo por control de presión de succión, para evitar sobrepresiones controla mediante la presión de descarga y para mantener un caudal mínimo, asegurar una buena lubricación y evitar sobrecalentamiento del motor se controla por flujo. [22]

Cada una de las variables monitoreadas se encuentran controladas por un PID que se encarga de ajustar la velocidad de la bomba según la variable crítica activa. Por ejemplo, si la succión está bajando considerablemente, el selector prioriza esta variable para incrementar la presión desacelerando la bomba incluso si los setpoints de flujo y presión de descarga se desvíen temporalmente. En cambio, si el flujo es considerablemente bajo en comparación con el setpoint, la bomba se acelerará mientras que la presión de succión y descarga se mantengan en rangos aceptables. [22]

En la figura 10, se encuentra representada la interacción entre los sensores, controladores, la bomba y el selector de mínimas típico para las estaciones de bombeo de hidrocarburos; donde se tienen los tres lazos de control PID (PIC-3406, PIC-3408 y FIC-3301) asociados a presión de succión, presión de descarga y flujo respectivamente, así la variable crítica escogida por el selector envía la señal de salida al elemento final de control, en este caso un VFD – variador de frecuencia para la bomba.

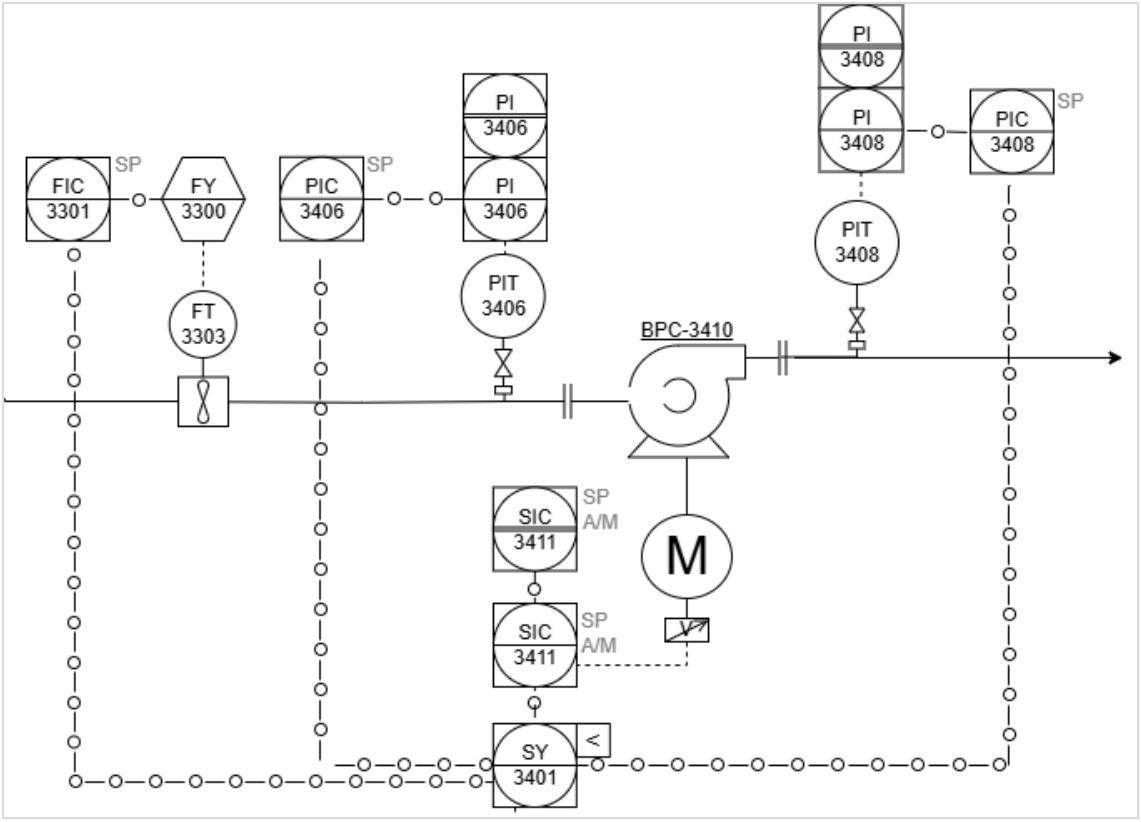


Figura 10. *Esquema selector de mínimas para el control de bombeo (Elaboración propia)*

4.4.2. SISTEMAS DE CONTROL PREDICTIVOS

El control predictivo es una técnica avanzada de control también conocida como MPC (Model Predictive Control) utiliza un modelo matemático del sistema para predecir su comportamiento futuro y ajustar las acciones de control en un horizonte de tiempo [23]. En sistemas de bombeo de hidrocarburos, el MPC es especialmente útil porque permite manejar múltiples variables, como presión, flujo, nivel, entre otras, mientras considera restricciones operativas, como límites de presión y capacidad de las bombas. Esta capacidad de anticipación y optimización hace que el MPC sea ideal para procesos complejos y no lineales, como los encontrados en la industria petrolera. [24]

En los sistemas para bombeo de hidrocarburos, se utilizan diferentes tipos de controles predictivos, cada uno enfocado en una necesidad específica. Entre ellos

se tiene el control predictivo lineal el cual es el más común, se basa en modelos lineales del sistema, por lo que es ideal cuando se tiene un comportamiento predecible y restricciones simples como lo son variaciones mínimas en la viscosidad o sobre las condiciones de operación, por ejemplo, en bombeo de crudo ligero. No obstante, su rendimiento se ve limitado en sistemas altamente no lineales que presentan cambios abruptos en la presión o flujo, lo que puede afectar su desempeño dada la complejidad [23].

El control predictivo no lineal (NMPC) utiliza modelos no lineales, lo que lo hace ideal para sistemas de bombeo con variaciones significativas en las especificaciones del fluido como cambios de densidad, cambios de presión o cambios bruscos en el flujo, por ejemplo, en el transporte de crudos pesados o fluidos multifásicos. Este método utiliza modelos matemáticos no lineales para predecir el comportamiento del sistema, lo que permite un control más preciso en condiciones operativas variables. No obstante, el NMPC requiere un mayor poder computacional y modelos altamente precisos, lo que puede incrementar los costos de implementación y mantenimiento [24].

Por último, el control predictivo híbrido combina modelos lineales y no lineales, permitiendo manejar sistemas con dinámicas mixtas, como válvulas de control on-off y bombas de velocidad variable, pero su complejidad de diseño y ajuste pueden llegar a ser un desafío [25].

5. ESTADO DEL ARTE

En la revisión de la literatura, se realizó un análisis de los enfoques en diversas áreas de investigación con las estrategias de control optimo, predictivo y los efectos negativos de las perturbaciones hidráulicas en estaciones de bombeo.

5.1. ESTRATEGIAS AVANZADAS DE CONTROL ÓPTIMO Y PREDICTIVO DISCRETO APLICADAS AL SISTEMA DE BOMBEO DE PETRÓLEO POR ACCIONAMIENTO MECÁNICO [26]

En este articulo el autor plantea una estrategia de control predictiva que se encarga de analizar las variables con sus tendencias pasadas, sus políticas de control y salidas de proceso para establecer un presente en el control donde a partir de un determinado tiempo muerto se establecerán posibles políticas de control basadas en las diferentes trayectorias de referencia que estén tomando las variables de proceso.

Este tipo de estrategia de control presenta ventajas frente a una respuesta de control suave y mejoras en los desempeños de producción, estos controladores presentados tienen un control matricial dinámico que realiza un análisis comparativo mediante criterios de cumplimiento de diseño para mejorar de manera autónoma la técnica de control, usando tiempos de muestreo de 0.01 s y técnicas de control predictivo escalar. [26]

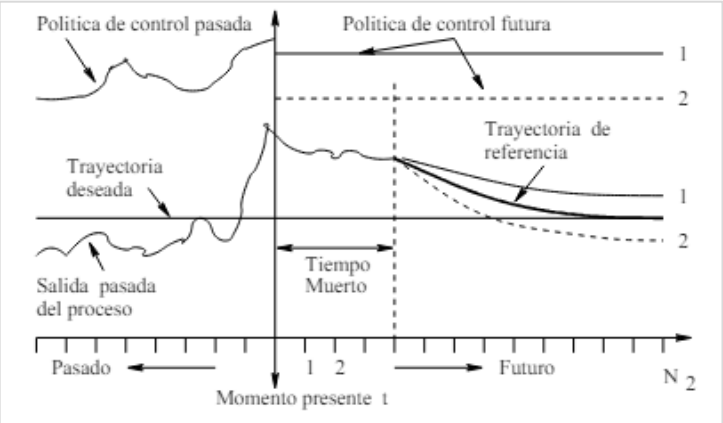


Figura 11. *Estrategia de control predictivo [26]*

5.2. CONTROLADOR PREDICTIVO BASADO EN MODELO NO LINEAL (NMPC) PARA OPTIMIZAR LA OPERACIÓN DE UN POZO PETROLERO [27]

En este estudio el autor realiza una evaluación multivariable para el control de flujo utilizando un modelo no lineal predictivo, que ofrece ciertas ventajas para el manejo del modelo dinámico del sistema a través de la consideración de restricciones y optimización con funciones objetivo, manejo de no linealidades.

El autor sugiere el uso de un modelo de bloques antiwind up que evita la saturación de los controladores proporcionales-integrales-derivativos, por lo que es posible restringir la máxima variación que pueda tener las frecuencias de operación de la bomba en un instante determinado, estos límites son fáciles de incluir en los bloques y parámetros de los controladores. [27]

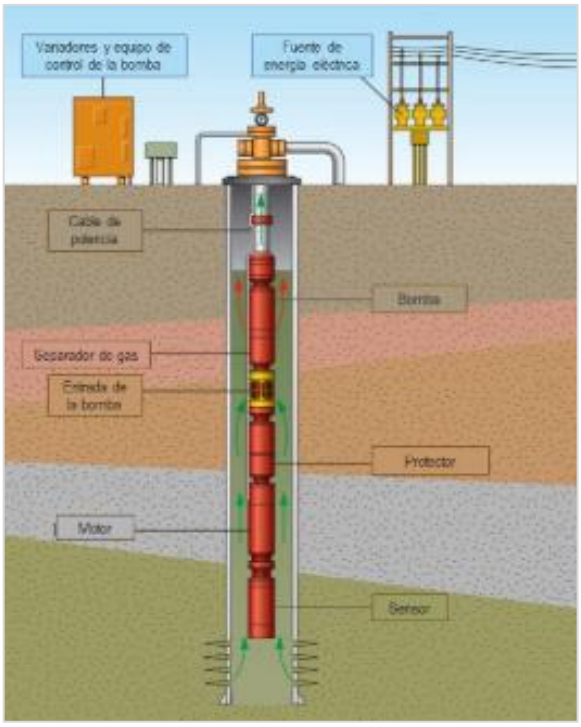


Figura 12. *Esquema de operación pozo petrolero [27]*

5.3. HYBRID NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROL OF A COOLING WATER NETWORK [28]

En este estudio el autor desarrolla una estrategia de control para la temperatura, permitiendo una minimización del consumo eléctrico de una red de agua de refrigeración. El modelo predictivo hibrido no lineal utiliza una optimización de descenso de gradiente, a través de un algoritmo para las variables continúas manipuladas y un algoritmo de recorrido de árbol enumerado para controlar y optimizar las variables manipuladas booleanas.

El HNMPC está sujeto a perturbaciones similares a las experimentadas en una planta real mostrando un mejor rendimiento en comparación con un control predictivo de modelo no lineal continuo (NMPC) y dos escenarios de caso base rechazando de manera exitosa las perturbaciones en la temperatura del proceso. [28]

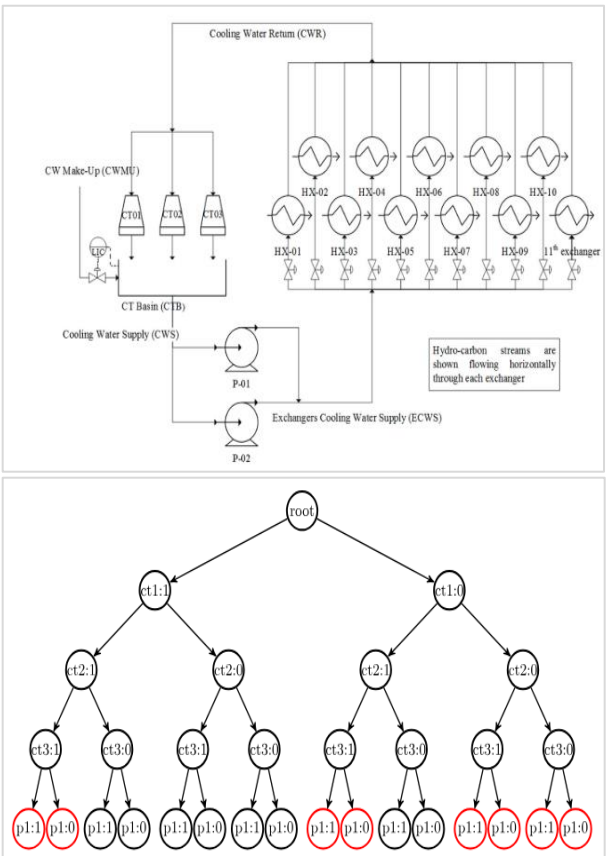


Figura 13. *Esquema de control y manipulación booleana con algoritmo de árbol [28]*

5.4. MODEL PREDICTIVE CONTROL OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES [29]

En este articulo el autor expone las ventajas de la utilización de modelos predictivos para el control de motores de combustión interna, donde se logra una gran reducción a nivel de controladores pasando de 7 a 10 controladores a 4 variables de estado y una reducción de 10 a 20 sensores a 2 a 4 variables de control.

Por otro lado, este tipo de modelos predictivos presentan ventajas en la reducción de esfuerzos de calibración, aplicación de machine learning, muestreos favorables en tiempo real, ahorros de combustible de entre 0.3 a 12 % y reducciones en la emisión de gases producto de combustión incompleta. [29]

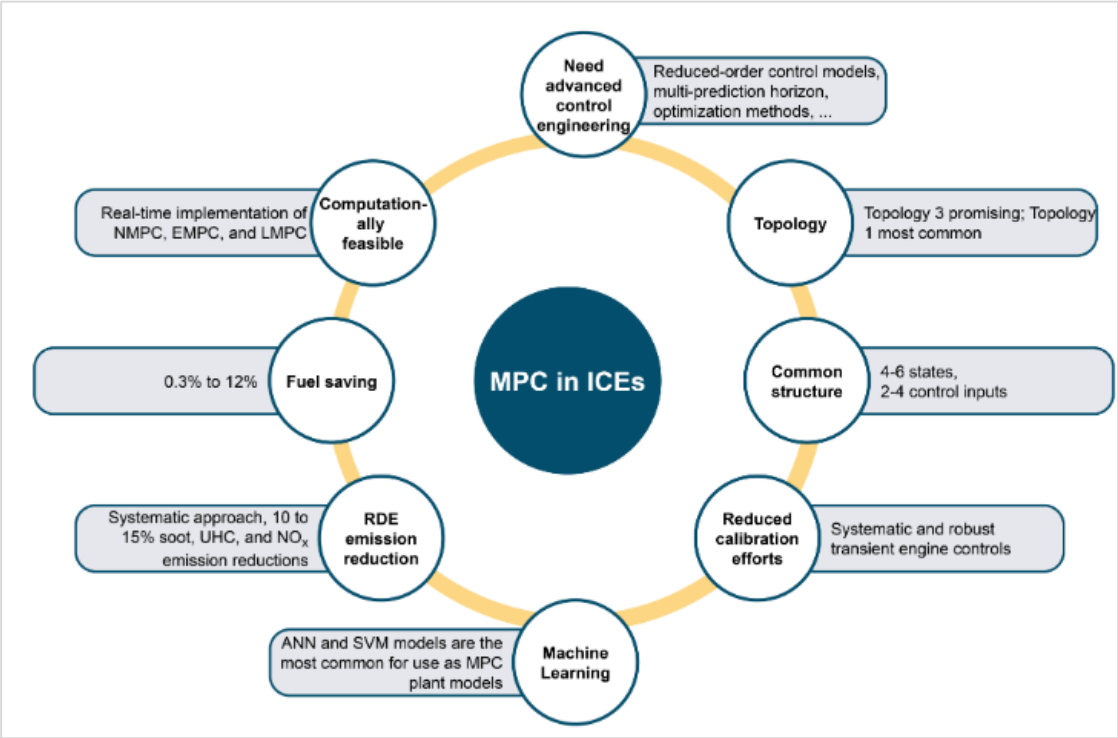


Figura 14. *Ventajas de aplicación de modelos predictivos en motores [29]*

5.5. ESTUDIO DEL EFECTO DEL GOLPE DE ARIETE EN ESTACIONES DE BOMBEO, OLEODUCTOS [30]

En este estudio el autor encuentra diferentes modelos dinámicos para las perturbaciones hidráulicas partiendo de la tipificación del origen del transitorio, el comportamiento de las ondas en la tubería y las ecuaciones matemáticas relacionadas con procesos de cargue de buques, bombeo por tuberías y tipos de válvulas existentes, llegando a reflejar los efectos negativos sobre la vida útil de los equipos. [30]

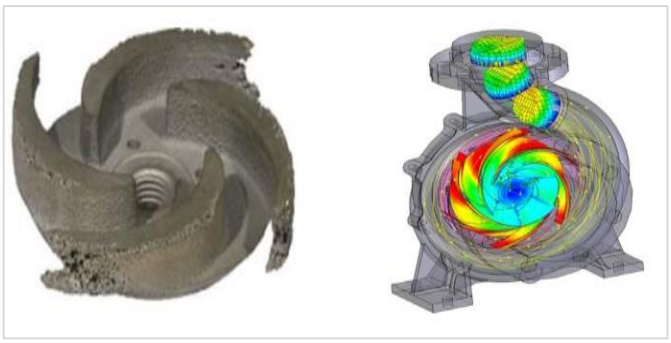


Figura 15. *Efectos por los golpes de ariete en los impulsores de las bombas centrifugas [30]*

6. METODOLOGÍA

6.1. EVALUACIÓN DEL PROCESO

Para iniciar el diseño del sistema de control, se recopilarán datos de la operación del sistema de transporte propuesto, entre los cuales se tendrán reportes históricos de las variables de proceso más importantes por cada estación como lo son presión de succión, presión de descarga, presión de entrada y/o salida de la estación, flujo de salida de la estación y velocidad de las bombas encendidas.

De la información recopilada se aplicará un tratamiento estadístico, para determinar las variables que tienen una mayor incidencia en las perturbaciones hidráulicas y de proceso y finalmente esta información se validará con un modelo matemático propuesto.

Por otro parte, se realizará un levantamiento de información del proceso de transporte para el sistema propuesto, donde se caracterizarán las instalaciones, unidades de bombeo y se construirá el diagrama de flujo de proceso para facilitar la identificación de procesos e instrumentación a usar.

6.2. SELECCIÓN DEL MODELO DE CONTROL

Para esta selección, se realizará una revisión literaria enfocada en las dinámicas identificadas en la fase anterior, teniendo la facilidad de explorar con un enfoque analítico basado en el modelo o un enfoque experimental basado en los datos recopilados. Se realizará una validación de los diferentes modelos de control y sus aplicaciones según el tipo de industria.

6.3. SIMULACIÓN DEL SISTEMA E INTEGRACIÓN DEL CONTROL

a) Simulación del sistema de transporte

La simulación se realizará utilizando el software Aspen HYSYS, el cual es un software de simulación de procesos ampliamente utilizado en la industria

química y de hidrocarburos, el cual permite evaluar el rendimiento de una planta o sistema. Cuenta con aplicaciones clave como el estudio del comportamiento de propiedades físicas de los hidrocarburos, operaciones unitarias como separadores, bombas, compresores e intercambiadores de calor, y la predicción de variables como temperatura, presión y flujo.

b) Integración del Modelo de control

La integración del modelo tomara como entrada de datos, el análisis estadístico del comportamiento de las perturbaciones hidráulicas y de proceso, se seguirán las siguientes actividades:

- **IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES**: Se identifican las variables críticas necesarias para medir y controlar el proceso.

- **CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL**: Para la configuración se utiliza el software Factory Talk View de Rockwell Automation, que es el mismo que se usa en los sistemas de control de cada una de las estaciones involucradas.

- **DISEÑO DE LA LEY DE CONTROL**: En la estrategia de diseño se definirán los métodos de control según el modelo del sistema, se puede contar con un control en cascada, ideal para procesos con múltiples variables interdependientes, control de relación, adecuado para procesos con variables relacionadas o control de retroalimentación simple, utilizado cuando solo se necesita controlar una variable.

6.4. EVALUACIÓN DEL SISTEMA

En esta etapa se realizará una representación gráfica del sistema simulado e integrado, se realizarán pruebas de estacionariedad y capacidad de mantener el

sistema dentro de los limites seguros de operación representado acciones de control en tiempos menores de la onda hidráulica.

6.5. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE COMUNICACIÓN

Se realizará una revisión literaria de los métodos disponibles y que se ajusten a la infraestructura actual de la empresa, donde como requisitos mínimos deben ser el aseguramiento de una transmisión eficiente y segura de información. Para evaluar el método adecuado se validarán los siguientes requerimientos:

- **REQUISITOS TÉCNICOS**: Evaluación del tipo de dato a transmitir, velocidad de adquisición y distancia entre el centro de recopilación de datos. Se considerarán factores como ancho de banda, latencia, confiabilidad y seguridad.

- **TIPO DE COMUNICACIÓN EXISTENTE**: Se realizará un levantamiento de información entre los cuales se tienen Ethernet, ideal para redes locales (LAN) con alta velocidad y confiabilidad. Fieldbus, utilizado en sistemas de control distribuido (DCS) y automatización industrial. Profibus, Modbus, CAN, entre otros, que hacen parte de protocolos específicos para aplicaciones industriales.

- **TOPOLOGÍA DE RED**: Se considerará la escalabilidad y la redundancia.

- **SEGURIDAD:** Se validará las medidas de seguridad a implementar como firewalls, VPN y autenticación, así como la protección contra ataques cibernéticos y accesos no autorizados.

7. ALCANCE Y LIMITACIONES

7.1. ALCANCE

Este proyecto desarrollará el diseño y simulación de un sistema de control ante perturbaciones hidráulicas en el sistema de transporte de hidrocarburos Salgar – Yumbo L6" y se realizará la propuesta de comunicación de datos entre plantas.

7.2. LIMITACIONES

A nivel de infraestructura CENIT cuenta con instrumentación de presión, temperatura, flujo, vibración, densidad entre otros a lo largo de la infraestructura de cada planta. Por lo que la comunicación de datos entre plantas se limitará a la lectura de datos de transmisores principales de proceso como lo son presión de succión y descarga unidades, presión de entrada y salida de la estación, velocidades de las unidades y flujo a la salida de la estación.

La respuesta del modelo se centrará en la lectura de datos de la variable de proceso que presente una anomalía sobre la presión de entrada y salida de la estación, enviando comandos al controlador propuesto para modificar el control por selector de mínimas en la presión de succión, presión de descarga o flujo según decida el algoritmo desarrollado.

La propuesta de comunicación de datos y de control se realizará de acuerdo con la infraestructura actual con la que cuenta CENIT.

8. EVALUACIÓN DEL PROCESO

8.1. RECOLECCIÓN DE DATOS HISTÓRICOS

La arquitectura de datos de la empresa de transporte de hidrocarburos al ser escalable y segura nos permite extraer datos para ser usados en diferentes aplicaciones o análisis. En ella podemos encontrar tres capas importantes: fuente de datos, almacenamiento de datos y procesamiento de datos.

- Fuente de datos: En esta capa se encuentran los sistemas de recolección de datos, que incluyen sensores y dispositivos de medición instalados en las instalaciones de transporte. La plataforma utilizada por la empresa es el Honeywell Experion® la cual puede integrar datos de diversos tipos de dispositivos, como sistemas SCADA (Control de Supervisión y Adquisición de Datos), que monitorizan parámetros críticos del transporte de hidrocarburos (temperatura, presión, caudal, etc.) [31]

- Almacenamiento de datos: Los datos recolectados deben ser almacenados en un sistema de gestión de bases de datos (DBMS). Es recomendable utilizar soluciones en la nube como Amazon S3 para almacenamiento de grandes volúmenes de datos, o bases de datos SQL y NoSQL para datos estructurados y no estructurados, respectivamente. Para el caso de la empresa se utiliza el Honeywell Cloud Historian, la cual es una base de datos optimizada para almacenar datos de series temporales, que son datos asociados a una estampa de tiempo. Estos datos provienen de los sensores en campo como lo son transmisores de velocidad, transmisores de presión, transmisores de viscosidad, transmisores de flujo, entre otros, centralizados a través de las RTU y los PLC. [32]

- Procesamiento de Datos: La capa de procesamiento de datos se encuentra implementada a través de tecnologías como PHD Peer desarrollado por Honeywell, el PHD es parte de la suite Uniformance®, y está diseñada para manejar grandes volúmenes de datos en tiempo real, proporcionando herramientas para el análisis histórico y la toma de decisiones [33]. El PHD tiene una arquitectura cliente-servidor que contiene elementos como el PHD Server, el cual es el núcleo del sistema, este es responsable de la captura, compresión y almacenamiento de datos, tiene conectividad con los sistemas de control de cada estación y procesa datos en tiempo real, utilizando técnicas avanzadas de compresión para reducir el volumen de los datos. [34]

  Por otro lado, el PHD Clients, se encarga de las aplicaciones que permiten a los usuarios acceder y visualizar los datos almacenados en el PHD, para la empresa se cuenta con el Reporting Services de Honeywell. Finalmente, en cuanto a las interfases de conectividad el PHD soporta múltiples protocolos de comunicación industrial para la captura de datos, siendo OPC y Modbus los utilizados por la empresa e integrados con el Honeywell Experion®. [34]

8.2. RED DE DATOS

La red de datos es fundamental para garantizar que la información fluya sin problemas desde los dispositivos de campo hasta la nube. Los componentes clave incluyen:

- Infraestructura de Red: La empresa usa una infraestructura de red robusta que garantiza la conectividad entre los dispositivos y la nube. Dentro de ellas se incluyen redes Ethernet industriales para las plantas más actualizadas y protocolos de comunicación como OPC UA y Modbus para interoperabilidad entre diferentes sistemas como lo son los sensores y la parte de control [35].

- Seguridad de la Red: La empresa maneja diferentes medidas de seguridad, dado el manejo de datos sensibles. Por lo que se utilizan VPNs, firewalls y estrictos protocolos de ciberseguridad para proteger la red. Además, del uso de la autenticación de múltiples factores (MFA) que ayudan a prevenir accesos no autorizados [36]

8.3. PROCESO DE EXTRACCIÓN DE DATOS DEL COLECTOR

La extracción de datos del colector se realiza a través del Reporting Services y contempla los siguientes pasos:

- Configuración del Colector: El sistema de control local de las estaciones del sistema ODECA posee una serie de PLC Allen-Bradley con RsLogix / ControlLogix y un ordenador dedicado para la captura de datos con conexión a la red de la empresa. Primero deben ser configuradas las variables de proceso a monitorear, para este caso se utilizan las presiones de entrada, succión, descarga y flujos de las unidades de bombeo con la debida identificación (Tags) según el estándar de señales SCADA de la compañía, luego se configuran las direcciones IP y los puertos de comunicación acorde a los lineamientos de estrategia digital de la empresa y finalmente habilitar la lectura de datos a través de la conexión OP.C En la arquitectura de la empresa, los datos son recolectados de manera individual en cada una de las estaciones de bombeo para luego ser centralizados en el colector principal, según intervalos de muestreo de 1 segundo [37]

- Transmisión de Datos: Una vez que los datos son colectados, se transmiten a través de la red con ayuda del KEP Server de Rockwell y protocolos de comunicación OPC con el Honeywell Experion de manera que, con la configuración de estas comunicaciones, se permite que los datos sean

enviados en tiempo real a la nube y accesibles a través de la web por el Reporting Services [38].

8.4. ALMACENAMIENTO EN LA NUBE

Los datos transmitidos se almacenan en el sistema de gestión de bases de datos en la nube. En este paso, es importante realizar un proceso de limpieza, validación de la calidad de los datos y el uso de los archivos de contextualización para asegurar que la información almacenada sea precisa y útil para el análisis [39].

8.5. ENLACE CLOUD HISTORIAN / CIO

Por medio de la arquitectura Colector – Data Lake, se logró la descarga de los datos históricos de proceso del mes de agosto del 2024, con una frecuencia de 15 segundos, a través del Reporting Services, en el cual se recopilan los datos de cada una de las estaciones relacionadas en el sistema ODECA y luego son transmitidos a través de protocolos de comunicación OPC o Modbus al Datalake para su posterior extracción.

En la figura 16, se muestra la arquitectura en la nube de la empresa donde en un nivel cero se tienen los instrumentos de campo y actuadores con una conexión cableada enduro, en el nivel uno se tienen los controladores y equipos de terceros como telemetría, sistemas eléctricos y RTU con un enlace de comunicación Modbus TCP / IP, en el nivel dos se tienen los switches, servidores de aplicaciones y servidores de control, donde se tiene acceso a las estaciones de operación y la estación de ingeniería funcionando como red cliente-servidor a través de enlaces ethernet y finalmente el nivel tres que a través de los switches TO y los firewall se tiene el enlace para los datacenter y la DMZ, que es una red o subred segregada que actúa como una zona intermedia entre la red interna corporativa y la red externa con el fin de controlar el tráfico y administrar el servidor web, esta DMZ está diseñada para agregar una capa adicional de seguridad, protegiendo los sistemas internos de accesos no autorizados o ataques provenientes de redes externas.

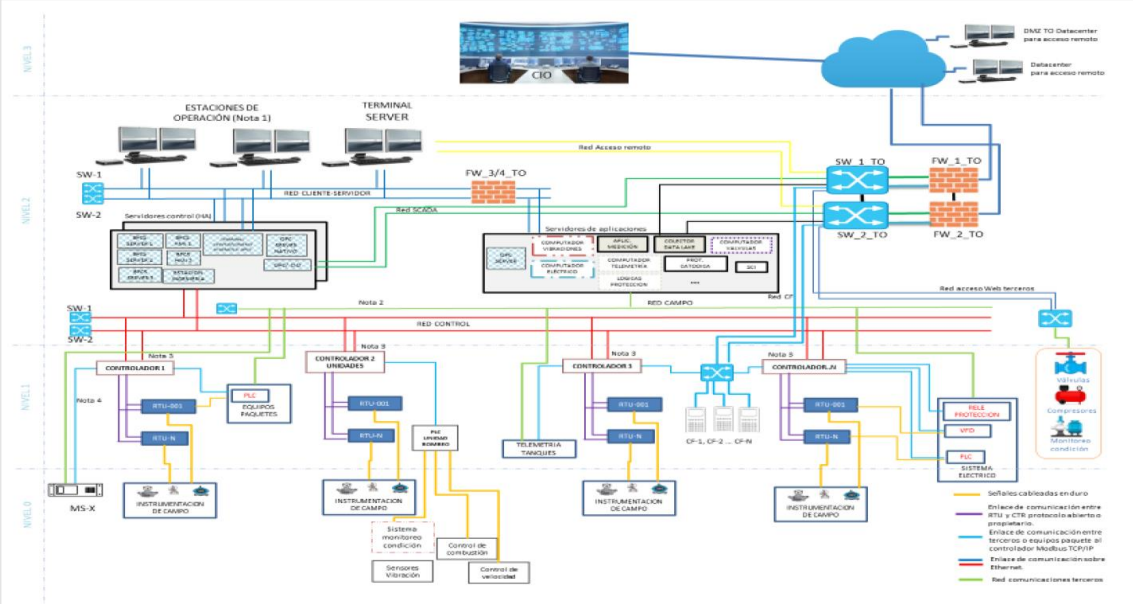


Figura 16. *Arquitectura en la nube (Elaboración propia)*

8.6. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

La identificación de los paros de bombeo y los tiempos de recuperación se realizan, verificando el flujo de cada estación (Puerto Salgar, Fresno, Herveo y Mariquita) y se detectan todos los cruces por cero del flujo en el mes, así como el punto en el que inicia su recuperación. Una vez que el flujo inicia su recuperación, se calcula su 1% y se compara con el valor absoluto de la resta de los dos anteriores datos. Si la diferencia es menor al 1%, se considera que se ha alcanzado un punto estacionario.

Si este punto se mantiene durante los siguientes 5 puntos de muestreo y se repite al menos 5 veces, se considera que se ha detectado estacionariedad. En este caso, se registra el tiempo que duró en formarse la estacionariedad, el valor del flujo, la fecha y la hora. Para este proceso se elaboró un script con dos partes principales una primera que detecta el cruce por flujo cero (Fig. 17) y una segunda parte que escanea los cruces y calcula los puntos de recuperación, escribe la hora, flujo y fecha del evento (Fig. 18).

```
Sub Cruce()
'
' Macro4 Macro
'

'
    Dim Fin As Long

    Fin = Range("A" & Rows.Count).End(xlUp).Row

    Range("C3").Select
    Selection.AutoFill Destination:=Range("C3:C" & Fin)
    Range("D3").Select
    Selection.AutoFill Destination:=Range("D3:D" & Fin)
    Range("E3").Select
    Selection.AutoFill Destination:=Range("E3:E" & Fin)

    Columns("F:G").Select
    Selection.ClearContents
    Range("F3").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "1"
    Selection.AutoFill Destination:=Range("F3:F" & Fin)
    'Range("F3:F" & Fin).Select
    ActiveSheet.Range("$A$1:$G$" & Fin).AutoFilter Field:=5, Criteria1:="2"
    Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
    Selection.ClearContents
    ActiveSheet.Range("$A$1:$G$" & Fin).AutoFilter Field:=5
    Range("F3").Select
End Sub
```

Figura 17. *Script para detección de cruces por flujo cero (Elaboración propia)*

```
Sub Deteccion()

'
    Application.CutCopyMode = False
    Dim Fil As Integer
    Dim Fila As Long

    Fil = 1
    Fila = ActiveCell.Row

    Do
       Fil = Fil + 1
    Loop Until ((ActiveCell.Offset(Fil, -2).Value = 1 And ActiveCell.Offset(Fil, -3).Value = 1) Or ActiveCell.Offset(Fil, -1).Value = 2 Or ActiveCell.Offset(Fil, -3)

    If ActiveCell.Offset(Fil, -3).Value <> "" Then
        If ActiveCell.Offset(Fil, -1).Value = 2 Then
            Range("F" & Fil + Fila - 1).Select
        Else
            Range("G" & Fil + Fila).Value = Range("A" & Fil + Fila).Value - Range("A" & Fila).Value
            Range("F" & Fil + Fila).Select
        End If
    Else
        Range("F" & Fil + Fila).Select
    End If

End Sub
```

```
Sub Scan()

Abajo

Do
    If ActiveCell.Offset(0, 1).Value = "" Then
        Deteccion
    Else
        Abajo
    End If
Loop Until ActiveCell.Offset(1, 0).Value = "" And ActiveCell.Offset(2, 0).Value = ""

ActiveSheet.Range("$A$1:$G$44641").AutoFilter Field:=7, Criteria1:="<>"

Arriba

End Sub
```

Figura 18. *Script para detección de puntos de recuperación (Elaboración propia)*

A continuación, se puede observar en la figura 19, algunos de los eventos que se identifican como parada de bombeo encerradas en color naranja durante el mes de

análisis, donde en estos puntos identificados por el script se alcanzan flujos de cero.

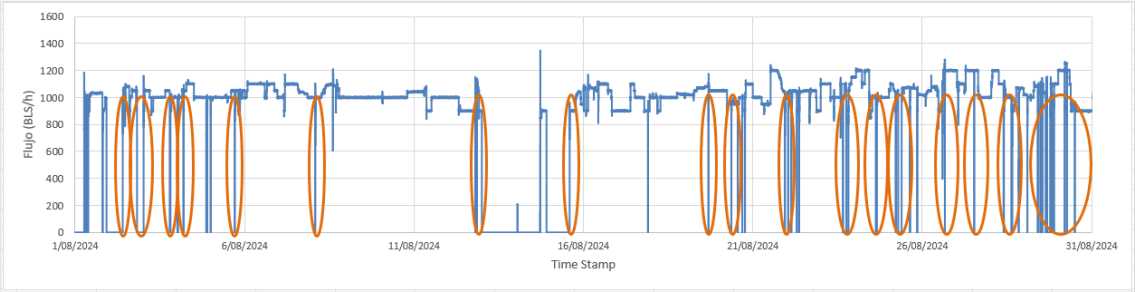


Figura 19. *Identificación de paradas de bombeo en círculos naranja (Elaboración propia)*

Adicionalmente, para determinar la calidad y representatividad de los datos muestreados se realizan pruebas de aleatoriedad mediante la prueba de rachas en SPSS, a continuación, en la figura 20, 21 y 22 se detallan los resultados.

Prueba de rachas

	PUE_FT_3301	Tiempo	Estampa de Tiempo
Valor de prueba[a]	979.58	8	18-SEP-2024...
Casos < Valor de prueba	94	92	94
Casos >= Valor de prueba	95	97	95
Casos totales	189	189	189
Número de rachas	88	96	8
Z	-1.094	.083	-12.763
Sig. asin. (bilateral)	.274	.934	<.001

a. Mediana

Figura 20. *Prueba de rachas en SPSS según la mediana (Elaboración propia)*

De igual manera, se realiza la prueba de rachas arriba y debajo de la mediana y el turning point mediante la herramienta StatFit, obteniendo los siguientes resultados:

runs test (above/below median)

data points	42
points above median	21
points below median	21
total runs	22
mean runs	22
standard deviation runs	3.20061
runs statistic	0
level of significance	0.05
runs statistic(0.025)	1.95996
p-value	1
result	DO NOT REJECT

Figura 21. *Prueba de rachas en StatFit según la mediana (Elaboración propia)*

runs test (turning points)

data points	41
turning points	25
mean turnings	27
standard deviation turnings	2.63944
turnings statistic	0.757735
level of significance	0.05
turnings statistic(0.025)	1.95996
p-value	0.44861
result	DO NOT REJECT

Figura 22. *Prueba de rachas en StatFit según TurningPoints (Elaboración propia)*

Con las anteriores pruebas se demuestra que existe aleatoriedad en el grupo de datos obtenidos por el script desarrollado. Por otro lado, se realiza el análisis de históricos para encontrar el modelo de las perturbaciones hidráulicas y cuáles son las variables más representativas, según el sobrepaso de umbrales de los límites de seguridad del sistema y que conllevan a paradas de bombeo.

Las librerías que fueron utilizadas en R para el entrenamiento del modelo son:

- **dplyr:** Librería para la manipulación de datos, con funciones intuitivas como filtrar, seleccionar, ordenar, agrupar y resumir datos.
- **ggplot2:** Librería para crear gráficos de alta calidad, se usa una gramática de gráficos que permite construir visualizaciones capa por capa.
- **lubridate:** Facilita el trabajo con fechas y tiempos en R, tiene funciones para analizar, manipular y formatear fechas.
- **readxl:** Permite la lectura de archivos de Excel en R.
- **tidyr:** Permite reorganizar datos, facilita convertir datos entre formatos largos y anchos.
- **caret:** Herramienta de machine learning útil para casos de regresión logística con modelos sencillos, donde se entrena a partir de un conjunto de datos con una variable binaria (Perturbación) se predice con valores de operación (Presiones y flujos).
- **randomForest:** Herramienta de machine learning basada en arboles de decisión que funciona bien cuando se presentan relaciones no lineales

entre la presión, flujo y perturbaciones, cuando se tienen mínimos 1000 registros, se requiere interpretar la importancia de las variables y se requiere de buena precisión sin ajustar demasiados hiperparámetros.

El método para generar el modelo se basa en un entrenamiento a partir de datos, donde se definen los límites de cada variable de proceso según los instructivos de operaciones, luego se calculan las perturbaciones cuando se superan estos umbrales. En la figura 23, se observa parte del código utilizado por entrenamiento de modelo de Caret y en la figura 24 se observan los resultados de la matriz de confusión.

```
# 2. Preparar los datos
# Convertir la columna de fecha a formato Date
datos$fecha <- as.POSIXct(datos$fecha, format="%Y-%m-%d %H:%M:%S")

# Crear una columna para identificar perturbaciones (1: perturbación, 0: operación normal)
# Aquí asumimos que una perturbación ocurre cuando alguna presión o flujo supera un umbral
umbral_presion <- 1630  # Define un umbral para las presiones
umbral_flujo <- 1400     # Define un umbral para los flujos

# Crear la columna de perturbación
datos <- datos %>%
  mutate(perturbacion = ifelse(rowSums(select(., starts_with("presion")) > umbral_presion) > 0 |
                                 rowSums(select(., starts_with("flujo")) > umbral_flujo) > 0, 1, 0))

# Ver la distribución de perturbaciones
table(datos$perturbacion)

# 3. Análisis exploratorio de datos (EDA)
# Gráfico de series temporales para presiones y flujos
datos_largos <- datos %>%
  pivot_longer(cols = starts_with("presion") | starts_with("flujo"),
               names_to = "variable",
               values_to = "valor")

ggplot(datos_largos, aes(x = fecha, y = valor, color = variable)) +
  geom_line() +
  labs(title = "Series Temporales de Presiones y Flujos",
       x = "Fecha", y = "Valor", color = "Variable") +
  theme_minimal()

# Gráfico de dispersión para presiones vs flujos
ggplot(datos, aes(x = presion1, y = flujo1, color = as.factor(perturbacion))) +
  geom_point() +
  labs(title = "Presión PUE vs Flujo PUE",
       x = "Presión PUE", y = "Flujo PUE", color = "Perturbación") +
  theme_minimal()

# 4. Modelado para identificar perturbaciones

# Verificar valores faltantes en todas las columnas
colSums(is.na(datos))
# Imputar valores faltantes con la media
datos <- datos %>%
  mutate(across(everything(), ~ ifelse(is.na(.), mean(., na.rm = TRUE), .)))
# Dividir los datos en conjunto de entrenamiento y prueba
set.seed(123)  # Para reproducibilidad
indices <- createDataPartition(datos$perturbacion, p = 0.8, list = FALSE)
entrenamiento <- datos[indices, ]
prueba <- datos[-indices, ]

# Entrenar un modelo de regresión logística con todas las variables
modelo <- glm(perturbacion ~ presion1 + presion2 + presion3 + presion4 +
                flujo1 + flujo2 + flujo3 + flujo4,
              data = entrenamiento, family = binomial)
```

Figura 23. *Resumen código en R para entrenamiento de modelo por Caret (Elaboración propia)*

Los estadísticos para el primer modelo de perturbación demuestran que se logra una buena predicción con una precisión del 97.32% mostrando un buen desempeño general, una detección de perturbaciones reales de un 98.55% y una especificidad del 89.33% lo que muestra que genera algunas falsas alarmas.

```
          Reference
Prediction     0     1
         0 27550   459
         1   404  3843

               Accuracy : 0.9732
                 95% CI : (0.9714, 0.975)
    No Information Rate : 0.8666
    P-Value [Acc > NIR] : < 2e-16

                  Kappa : 0.8836

 Mcnemar's Test P-Value : 0.06604

            Sensitivity : 0.9855
            Specificity : 0.8933
         Pos Pred Value : 0.9836
         Neg Pred Value : 0.9049
             Prevalence : 0.8666
         Detection Rate : 0.8541
   Detection Prevalence : 0.8683
      Balanced Accuracy : 0.9394
```

Figura 24. *Matriz de confusión y estadísticas modelo Caret (Elaboración propia)*

Con el fin de mejorar el modelo se realiza el entrenamiento con el modelo randomForest, en la figura 25, se observa parte del código utilizado por entrenamiento de modelo y en la figura 26 se observan los resultados de la matriz de confusión.

```r
# 4 Detectar perturbaciones (solo valores por encima del límite máximo)
df <- df %>%
  mutate(
    P1_anomaly = ifelse(P1 > max_limits$P1, 1, 0),
    P2_anomaly = ifelse(P2 > max_limits$P2, 1, 0),
    P3_anomaly = ifelse(P3 > max_limits$P3, 1, 0),
    P4_anomaly = ifelse(P4 > max_limits$P4, 1, 0),
    F1_anomaly = ifelse(F1 > max_limits$F1, 1, 0),
    F2_anomaly = ifelse(F2 > max_limits$F2, 1, 0),
    F3_anomaly = ifelse(F3 > max_limits$F3, 1, 0),
    F4_anomaly = ifelse(F4 > max_limits$F4, 1, 0)
  )

# Crear la variable 'perturbation' (1 si alguna variable supera su límite máximo)
df$perturbation <- ifelse(rowSums(df[, grepl("_anomaly$", names(df))]) > 0, 1, 0)

# Ver cuántas perturbaciones se detectaron
table(df$perturbation)

# 6 Modelo Random Forest para analizar qué variable es más relevante
X <- df[, c("P1", "P2", "P3", "P4", "F1", "F2", "F3", "F4")]
y <- as.factor(df$perturbation)

# Entrenar el modelo
set.seed(42)
rf_model <- randomForest(X, y, ntree = 100, importance = TRUE)

# 7 Importancia de variables
importance_df <- as.data.frame(importance(rf_model))
importance_df$Variable <- rownames(importance_df)
importance_df <- importance_df[order(-importance_df$MeanDecreaseGini),]

print("Importancia de variables en la detección de perturbaciones:")
print(importance_df)
```

Figura 25. *Resumen código en R entrenamiento de modelo RandomForest (Elaboración propia)*

Los estadísticos para el segundo modelo de perturbación demuestran que se logra una mejora en la predicción con una precisión del 99.9% mostrando un excelente desempeño general, una detección de perturbaciones reales de un 99.9% y una especificidad del 99.9% lo que muestra una reducción considerable en la generación de falsas alarmas.

```
          Reference
Prediction     0     1
         0 20698     1
         1     2 11555

               Accuracy : 0.9999
                 95% CI : (0.9997, 1)
    No Information Rate : 0.6417
    P-Value [Acc > NIR] : <2e-16

                  Kappa : 0.9998

 Mcnemar's Test P-Value : 1

            Sensitivity : 0.9999
            Specificity : 0.9999
         Pos Pred Value : 1.0000
         Neg Pred Value : 0.9998
             Prevalence : 0.6417
         Detection Rate : 0.6417
   Detection Prevalence : 0.6417
      Balanced Accuracy : 0.9999
```

Figura 26. *Matriz de confusión y estadísticos modelo RandomForest (Elaboración propia)*

Pese a que el modelo generado por RandomForest muestra un mejor desempeño que Caret, ambos coinciden en que las variables de mayor importancia en la generación de una perturbación hidráulica son las variables de presión por lo que el sistema de control se enfocara en estas variables, puntualmente son:

- Presión de descarga estación Puerto Salgar, Mariquita y Fresno
- Presión de recibo estación Mariquita, Fresno y Herveo

8.7. EFECTO DE LA PERTURBACIÓN EN EL SISTEMA DE CONTROL ACTUAL

Para determinar el efecto de la perturbación en el sistema de control actual se verifica a través de tendencia como la de la figura 26, donde se logra observar visualmente el efecto de las perturbaciones hidráulicas que conllevan a paradas de bombeo no programadas, lo cual afecta la nominación y los cumplimientos del programa del bombeo y a su vez se relaciona directamente con una pérdida de ingresos, de manera que, al presentarse una perturbación, los controladores PID actuales propios de cada planta (Salgar, Mariquita, Fresno y Herveo) no son capaces de mantener estable la operación, llegando a los límites de disparos de las válvulas de seguridad y posterior apagado de bombas centrifugas.

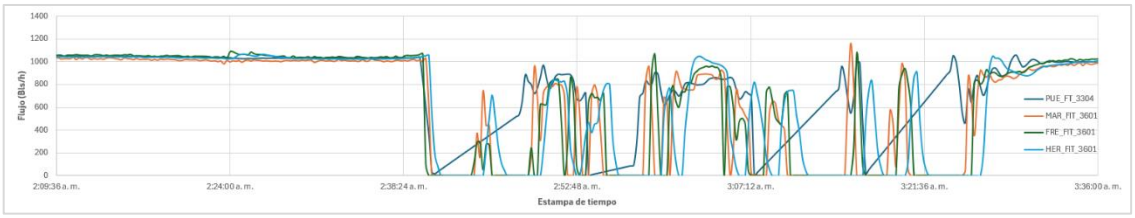


Figura 27. *Tendencia de comportamiento de flujo ante una perturbación (Elaboración propia)*

Durante el mes de agosto 2024, se encontraron 58 paradas de bombeo producto de perturbaciones hidráulicas lo que represento transportar 24.4 KBPD lo cual es 8% menor al cumplimiento de nominación de 27.4 KBPD. A manera de ejemplo, en el evento de la figura 19, se dejaron de transportar alrededor de 400 BLS con un tiempo de restablecimiento de 49 minutos, adicional a las sobrepresiones en las diferentes secciones del poliducto que ponen en riesgo la integridad de la línea.

Estas perturbaciones generan un aumento súbito en la presión que pueden ser provocadas por los efectos de mezcla e interfases en las diferentes plantas de bombeo, por procesos de barridos de producto en las instalaciones y por los cambios de altitud según el perfil de elevación del sistema, sin embargo, estos pueden ser anticipados al observar el comportamiento de la presión de recibo o de descarga de cada planta.

En la figura 20, a manera de ejemplo se realiza un enfoque en las presiones en el periodo de tiempo de la figura 19 entre las 2:39 y las 2:42 am, en un primer instante se logra evidenciar un aumento en la presión de recibo en la estación Fresno, luego esto refleja un aumento en la presión de descarga en la planta Mariquita la cual es la inmediatamente anterior y finalmente se observa un aumento en la presión de succión de la estación Mariquita, lo cual confirma que existen comportamientos marcados al presentarse una perturbación.

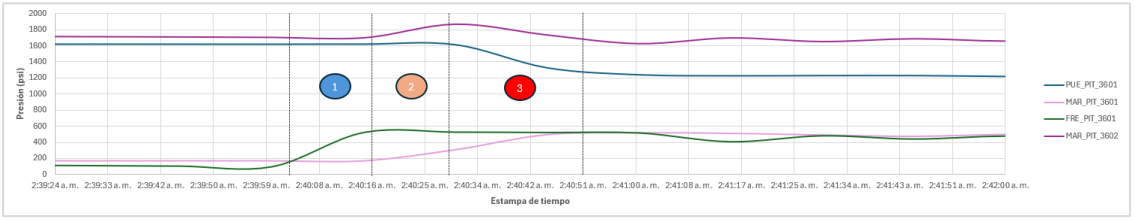


Figura 28. *Tendencia de comportamiento de presiones ante una perturbación (Elaboración propia)*

8.8. SISTEMA DE TRANSPORTE DE ODECA

Como desarrollo de la fase 1, en esta parte se realiza una descripción de los factores más importantes del levamiento de proceso, con el fin de dar un mayor entendimiento del sistema al cual se va a aplicar la propuesta de control y de los equipos con los que se cuenta para llevar a cabo la simulación de proceso.

El sistema de transporte ODECA es un poliducto que inicia desde la estación Puerto Salgar y finaliza en la estación Yumbo, está construido con tubería de diámetro de 6, 8 y 10", con una longitud de 393,38 Km y una capacidad nominal 27,4 KBPD; cruzando los departamentos de Cundinamarca, Tolima, Caldas, Risaralda y Valle del Cauca. [40]

La dinámica del sistema comprende 4 estaciones de rebombeo en el segmento Puerto Salgar – Mariquita, Mariquita – Fresno, Fresno – Herveo y Herveo – Manizales, y 4 estaciones de entregas, Manizales, Pereira, Cartago y Yumbo. En la figura 29, se puede visualizar el esquema del sistema de transporte. [40]

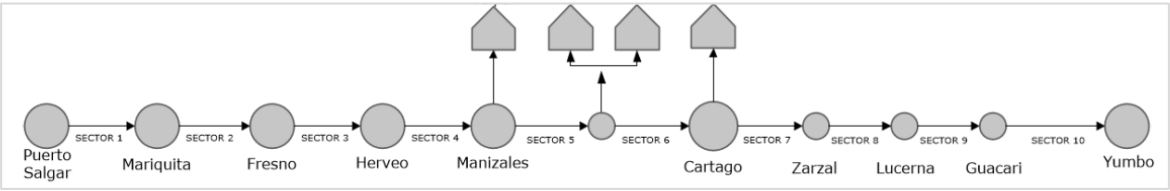


Figura 29. Esquema sistema de transporte ODECA *[40]*

A través de este sistema, se transportan diferentes productos refinados como lo son, gas licuado de petróleo, gasolina extra, biodiesel, gasolina regular y keroseno hidrotratado, con volúmenes de baches típicos para producto puro desde los 7.000 hasta los 15.000 BLS y para producto de interfase desde los 1.000 hasta los 1.300 BLS. [40]

8.8.1. CARACTERIZACIÓN DEL POLIDUCTO

Con el fin de obtener las características propias del poliducto se realiza el levantamiento de información utilizando P&ID de proceso de cada una de las

estaciones que tienen unidades de bombeo, es decir, Puerto Salgar, Mariquita, Fresno y Herveo.

En las siguientes tablas, se encuentra la información de dimensiones y lleno de línea cada segmento del sistema.

Tabla 1. Especificaciones de línea segmento de bombeo ODECA. *[41]*

Sector	Inicia	Termina	Diámetro (in)	Longitud (km)	Lleno (BLS)
1	Salgar	Mariquita	8”	55+536	11.806
2	Mariquita	Fresno	6”	19+18	3.521
3	Fresno	Herveo	6”	24+20	4.719
4	Herveo	Manizales	8”	27+77	4.469
Total				127+11	24.515

8.8.2. PERFIL DE LÍNEA DEL POLIDUCTO

El perfil del poliducto corresponde a las especificaciones nominales de tubería registradas por integridad de ductos para este sistema [41]. La Planta Puerto Salgar (K 0+000, 193 msnm) se encuentra al inicio del poliducto, desde allí el fluido es impulsado hasta la planta Mariquita (K 55+536, 853 msnm) que de ahí es re bombeado hasta la Planta Fresno (K 75+135, 1848 msnm) donde se reimpulsan hacia la Planta Herveo (K 99+337, 2678 msnm) para luego remontar la Cordillera Central, pasando por el punto más alto del poliducto en Colombia, en el Alto de la Romelia (3757 msnm) en los límites entre los departamentos de Tolima y Caldas.

El trazado del ducto luego desciende por el departamento de Caldas hasta la Planta Manizales (K 127+110, 2211 msnm) continuando hasta pasar al Departamento de Risaralda donde se encuentra la Planta Pereira (K 211+280, 1268 msnm) continuando posteriormente a los límites entre los departamentos de Risaralda y Valle (Río La Vieja), hacia la Planta Cartago (K 233+520, 942 msnm) para finalmente llegar a la Planta Yumbo (K 393+387, 973 msnm).

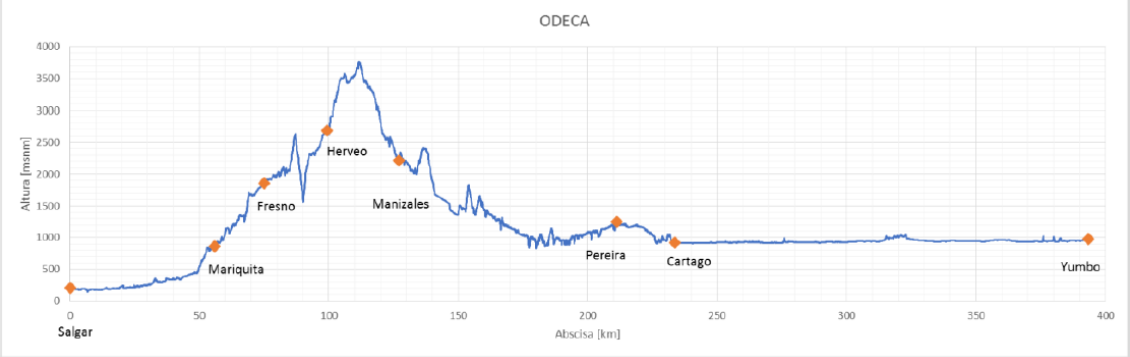


Figura 30. *Perfil de elevación del poliducto [41]*

8.8.3. ESQUEMA TÍPICO DE BACHEO

El bacheo típico del sistema se encuentra descrito en la Figura 31, este puede variar según la programación, existencias y cupos en consignatarios.

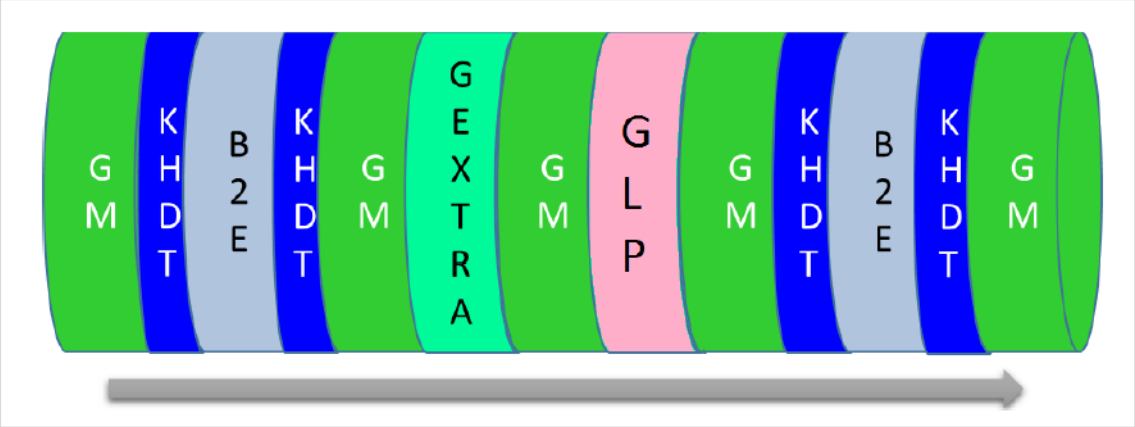


Figura 31. *Esquema típico de bacheo [41]*

8.8.4. CARACTERIZACIÓN DE LAS INSTALACIONES

Mediante el levantamiento de información en cada una de las estaciones que tienen bombeo dentro del sistema, se permite caracterizar los equipos involucrados en la operación con sus especificaciones de diseño, usando los manuales de cada equipo, en las respectivas plantas. A continuación, en las tablas 2-5 se encuentran las especificaciones:

Tabla 2. *Especificaciones de diseño equipos planta Puerto Salgar [40]*

Datos de equipos									
Planta Puerto Salgar									
Elemento	**Tag**	**Motor**			**Variador**		**Bomba**		
		Tipo	**Potencia (Hp)**	**rpm**	**Tipo**	**Rango (Rpm)**	**Tipo**	**Capacidad (Bph)**	**Cabeza (Psi)**
Bombas booster	BB 3410	Eléctrico	200 HP				Centrifuga Verticales	1657 BPH	575 Ft
	BB 3420	Eléctrico	200 HP				Centrifuga Verticales	1657 BPH	575 Ft
	BB 4410	Eléctrico	100 HP				Centrifuga Verticales	629 BPH	630 Ft
	BB 4420	Eléctrico	100 HP				Centrifuga Verticales	629 BPH	630 Ft
	BB 4430	Eléctrico	40 HP				Centrifuga Verticales	629 BPH	480 Ft
	BB 4440	Eléctrico	40 HP				Centrifuga Verticales	629 BPH	480 Ft
Unidades principales	BPC3410	Eléctrico	1250 HP	1800 - 3600	Frecuencia	1800-3600	Centrifuga Horizontal	1250 BPH	4200 Ft
	BPC3420	Eléctrico	1250 HP	1800 -	Frecuencia	1800-3600	Centrifuga Horizontal	1250 BPH	4200 Ft

Tabla 3. *Especificaciones de diseño equipos planta Mariquita [40]*

Planta Mariquita									
Elemento	**Tag**	**Motor**			**Variador**		**Bomba**		
		Tipo	**Potencia (Hp)**	**rpm**	**Tipo**	**Rango (Rpm)**	**Tipo**	**Capacidad (Bph)**	**Cabeza (Psi)**
Unidades principales	BPC 3410	Eléctrico	1250 HP	3600	Frecuencia	0 a 3600	Centrifuga horizontal	1250	4025 ft
	BPC 3420	Eléctrico	1250 HP	3600	Frecuencia	0 a 3600	Centrifuga horizontal	1250	4025 ft

Tabla 4. *Especificaciones de diseño equipos planta Fresno [40]*

Planta Fresno									
Elemento	**Tag**	**Motor**			**Variador**		**Bomba**		
		Tipo	**Potencia (Hp)**	**rpm**	**Tipo**	**Rango (Rpm)**	**Tipo**	**Capacidad (Bph)**	**Cabeza (Psi)**
Unidades principales	BPC 3410	Eléctrico	1000 HP	3600	(NA)	(NA)	Centrifuga horizontal	800 Gpm	4025 ft
	BPC 3420	Eléctrico	1250 HP	3600	Frecuencia	0 a 3600	Centrifuga horizontal	1250	4025 ft

Tabla 5. *Especificaciones de diseño equipos planta Herveo [40]*

Planta Herveo									
Elemento	**Tag**	**Motor**			**Variador**		**Bomba**		
		Tipo	**Potencia (Hp)**	**rpm**	**Tipo**	**Rango (Rpm)**	**Tipo**	**Capacidad (Bph)**	**Cabeza (Psi)**
Unidades principales	BPC 3410	Eléctrico	1000 HP	3600	(NA)	(NA)	Centrifuga horizontal	800 Gpm	(NA)
	BPC 3420	Eléctrico	1250 HP	3600	Frecuencia	0 a 3600	Centrifuga horizontal	1250	4025 ft

9. SELECCIÓN DEL MODELO DE CONTROL

La fase 2, se enfoca en una breve revisión en la literatura donde se han estudiado dos grandes enfoques, el enfoque analítico basado en ecuaciones diferenciales y el enfoque experimental basado en datos, con el objetivo de escoger la propuesta de control más adecuada.

9.1. EXPERIMENTALES

Los enfoques basados en datos utilizan técnicas de aprendizaje automático y procesamiento de grandes volúmenes de información para generar modelos predictivos. Este enfoque ofrece adaptabilidad y flexibilidad, dado que prevén condiciones operativas cambiantes y pueden aprender comportamientos complejos a partir de datos históricos y en tiempo real [42]. Adicionalmente, es recomendado para implementar en entornos con alta incertidumbre, es decir, que pueden manejar variaciones y perturbaciones que no se contemplan en modelos teóricos [43]. Por otro lado, son ideales para integrar con tecnologías modernas, donde la disponibilidad de datos en tiempo real facilita la implementación de estos modelos en la industria [44].

Sin embargo, requieren de grandes volúmenes de información, los cuales deben ser de calidad, debido a la gran cantidad de datos este tipo de control actúa como cajas negras, lo que dificulta la comprensión de la relación exacta entre entrada y salida.

El enfoque experimental incluye algunos relevantes como son Redes Neuronales Artificiales (ANNs), que se entrenan con datos históricos del bombeo para predecir el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones operativas [45]; las Máquinas de Soporte Vectorial (SVMs), que permiten clasificar y predecir estados del sistema de bombeo en presencia de perturbaciones [46] y Modelos Basados en Aprendizaje Profundo (Deep Learning), dentro de los cuales se tienen redes

neuronales recurrentes (RNNs) y los modelos de transformadores, que pueden manejar grandes volúmenes de datos y adaptarse a variaciones no lineales [47].

9.2. ANALÍTICOS

Para este enfoque se utilizan representaciones matemáticas del sistema, como lo son modelos de dinámica de fluidos y termodinámica, para predecir la respuesta del sistema ante perturbaciones. Dentro de sus ventajas se tiene la interpretabilidad y robustez, dado que, al estar basados en principios físicos, estos modelos ofrecen una buena aproximación a la dinámica del sistema [48]. Adicionalmente, este tipo de modelos presenta una buena precisión en condiciones bien definidas, es decir, cuando los parámetros del sistema se conocen con exactitud, de igual manera, se define su facilidad para predecir comportamientos y actuar sobre el sistema [49].

Sin embargo, este enfoque analítico presenta una gran complejidad, por lo que la identificación precisa de todos los parámetros y la formulación matemática puede requerir de altos esfuerzos de ingeniería, por otro lado, la sensibilidad a incertidumbres degrada significativamente la precisión del control debido a los cambios inesperados o perturbaciones no modeladas. [49]

Los modelos de control predictivo analítico utilizan representaciones matemáticas del sistema de bombeo para predecir su comportamiento y ajustar las acciones de control. Dentro de los más utilizados para la industria de hidrocarburos se tienen los MPC (Control Predictivo Basado en Modelo) en el cual se usan ecuaciones diferenciales para representar la dinámica del sistema, permitiendo una optimización en tiempo real [50]; y los modelos físico-matemáticos que incorporan principios de la mecánica de fluidos y la termodinámica para describir el comportamiento del bombeo de hidrocarburos y de esta manera ajustar la acción de control acelerando el tiempo de simulación [51].

9.3. PROPUESTA DE CONTROL

Dado el alto grado de incertidumbre y la variabilidad del bombeo de hidrocarburos, el enfoque basado en datos resulta ser el más adecuado. Particularmente, el monitoreo activo de las variables relevantes en las perturbaciones hidráulicas encontrados en la fase 1, permiten una predicción precisa del comportamiento del sistema. Dada las facilidades de la empresa y la disponibilidad de datos en tiempo real este modelo es el más viables para su implementación industrial.

El objetivo de este sistema de control es evitar los sobrepasos de la máxima presión de operación a largo del gradiente dado por el set de las válvulas PSV del sistema, que generan el apagado por seguridad de las estaciones de bombeo. Por lo que se determinan dos variables que funcionaran como umbrales para definir la magnitud de las acciones de control sobre del sistema en función de las presiones de succión de la estación (ASR y ASR_H) para alejar o normalizar lo más rápido posible las condiciones anormales.

Actualmente en cada una de las estaciones de bombeo (Salgar, Mariquita, Fresno y Herveo) se cuenta con un selector de mínimas que define cual es la variable más crítica, ante una perturbación hidráulica que produce una sobrepresión en la entrada de la estación, la variable a controlar será la presión de succión de manera que el control acelerará la bomba para reducir esta sobrepresión, sin embargo, al llegar a sus revoluciones máximas no existe manera de evitar esta condición, por lo que el sistema llegará al desacople por protección y aumentará aún más la presión en la entrada.

Por otro lado, ante una perturbación hidráulica que produce una sobrepresión en la salida de la estación, la variable a controlar será la presión de descarga de manera que el control desacelerará la bomba para reducir esta sobrepresión, sin embargo, debe generarse la acción de control prediciendo el comportamiento de la presión de las estaciones delante evitando llegar a las condiciones de desacoples y paradas por protección.

En la figura 32, se detalla el esquema propuesto para el sistema de control, donde se actuará por control Override sobre la presión de descarga cuando se detecte una perturbación por el algoritmo, es decir, modificando el setpoint e ignorando las demás condiciones automáticas o manuales que se encuentre sobre este controlador y los demás de succión y flujo, en caso de que aplique.

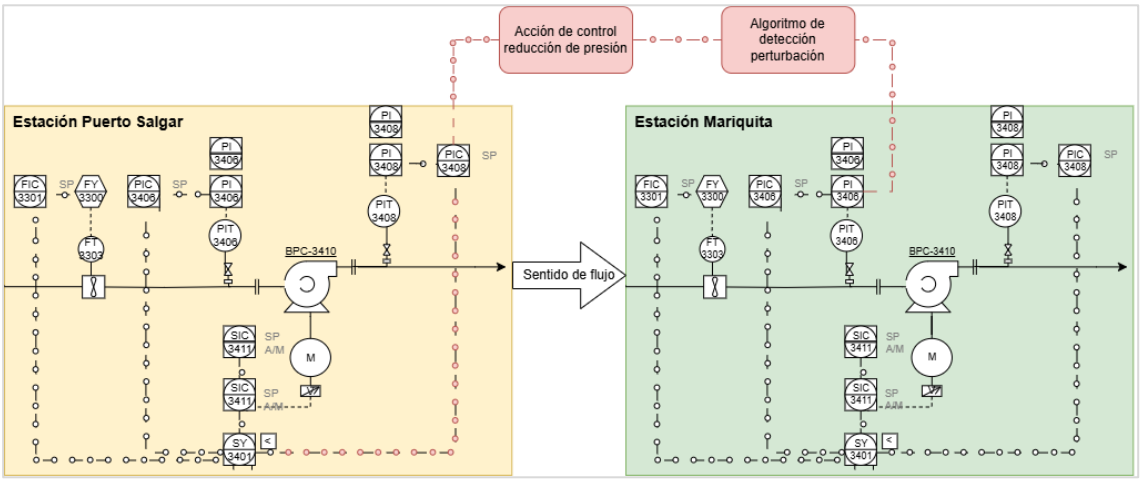


Figura 32. *Esquema de control propuesto, acción sobre controlador de descarga de la estación anterior, según predicción del algoritmo de detección de perturbación (Elaboración propia)*

A continuación, se describen los parámetros que componen el algoritmo de detección de perturbaciones basados en la lectura en tiempo real de datos operativos de presión de succión.

9.3.1. ASR_H – ALARMA ALTA SUCCIÓN REMOTA

Esta presión se determina como la mínima de las siguientes condiciones:

- Presión de recibo resultante a la condición de flujo mínimo de bombeo acorde las ventanas de integridad de las unidades
- Presión de recibo resultante a la presión de desacople o apagada de la unidad.

Para el sistema ODECA, la alta succión remota (ASR_H) es igual a la máxima presión de recibo cuando el sistema se encuentra trasportando un flujo de 750 BPH, flujo correspondiente al mínimo valor por rango operacional de las unidades.

Al alcanzarse esta condición en el recibo, el sistema de protecciones de línea requerirá llevar el sistema a condición segura o desencadenar lógicas de mitigación. En el sistema ODECA, el caudal es controlado únicamente por la planta Puerto Salgar, determinando que, para llevar el sistema a condición segura, el set de caudal en dicha planta debe llevarse a 750 BPH, cuando cualquiera de las plantas de rebombeo, alcance su valor de ASR_H.

La Tabla 6, a continuación, resume las máximas presiones de recibo correspondientes a esta operación y los límites para el primer parámetro del algoritmo de detección.

Tabla 6. *Valores de ASR_H para el control del sistema ODECA*

Planta de despacho	Planta de recibo	ASR_H en planta recibo (psi)
Puerto Salgar	Mariquita	450
Mariquita	Fresno	450
Fresno	Herveo	450

Utilizando los valores de ASR_H se construyen los perfiles de control para el sistema donde se monitorean las condiciones en el recibo de cada planta de rebombeo, desencadenando un control por un flujo en Puerto Salgar a 750 BPH.

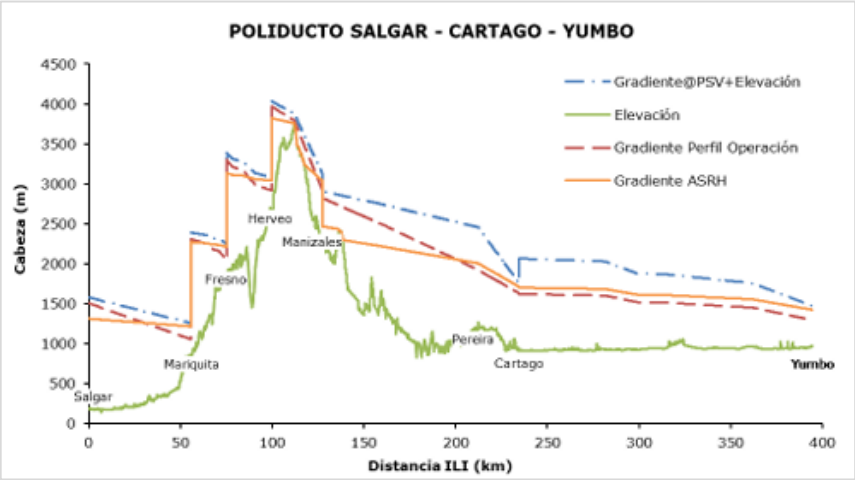


Figura 33. *Perfil de control mediante ASR_H (Elaboración propia)*

9.3.2. ASR – ALARMA SUCCIÓN REMOTA

Este segundo valor, y como primer umbral de detección se calcula con el valor de operación normal y la ASR_H, con base en las condiciones de operación, se define

como premisa para el cálculo inicial el punto medio entre el ASR_H y la máxima presión de operación de recibo en la planta, dada por los históricos operacionales.

Para la definición de la presión máxima de recibo se exceptúan los escenarios puntuales de sobrepresión cercanos al set de disparos de PSV del sistema de recibo. Las presiones de recibo sobre esta presión calculada se establecen dentro del dominio del sistema de protección de líneas, utilizando la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{ASR = PMO_R - X(ASR_H - PMO_R)} \qquad \textbf{(3)}$$

Donde el factor X para el sistema se encuentra entre el 20 y el 50%, según el margen entre los valores de PMO_R, ASR_H y $PAVS_R$. Para cada una de las plantas, se realizó un análisis estadístico para los datos operacionales de presión al recibo con base en los cuales se definió la PMO_R. En general, no se consideraron los valores extremos que pudieran representar desviación en las presiones de operación. Con lo anterior se calculan los límites de control para la ASR.

Tabla 7. *Valores de ASR para el control del sistema ODECA*

Planta de despacho	Planta de recibo	PMO_R (psi)	ASR_H (psi)	%	ASR (psi)
Puerto Salgar	Mariquita	250	450	25	300
Mariquita	Fresno	250	450	25	300
Fresno	Herveo	300	450	20	330

9.3.3. FRPD – Factor de reducción de la presión de descarga

Este factor permite visualizar como la presión de descarga se reduce por unidad de presión que exceda el valor de ASR, este valor es determinado por la relación entre la diferencia en las presiones del set de $PAVS_D$ y la MPD y la diferencia de presiones en el recibo entre el set de la PSV_R y la ASR. A continuación, se encuentra la ecuación relacionada:

$$\boldsymbol{FRPD = \frac{PAVS_D - MPD}{PAVS_R - ASR}} \qquad \textbf{(4)}$$

Utilizando la ecuación 4, se calcula el factor para cada una de las estaciones y sus valores se encuentran reflejado en la tabla 8:

Tabla 8. *Valores de FRDP para el control del sistema ODECA*

Planta de despacho	Planta de recibo	$PAVS_D$	MPD	$PAVS_R$	ASR	FRDP
Puerto Salgar	Mariquita	1.720	1.398	500	300	1.6
Mariquita	Fresno	1.900	1.670	500	300	1.2
Fresno	Herveo	1.900	1.553	500	330	2.0

9.3.4. PDR_{ASR} PRESIÓN DE DESCARGA RESULTANTE DEL ASR

Este último parámetro define la acción de control a ser ejecutada sobre la presión de descarga cuando se detecta una perturbación por el algoritmo sobre la presión de recibo al exceder el valor de la ASR, se tiene en cuenta la presión de despacho en la estación inicial o de rebombeo cuando excede la PMO_D. Este parámetro nos aporta un rango de PDR_{ASR} para cada tramo cuando se excede la ASR y la ASR_H, respectivamente, el cual se visualiza en la tabla 9.

$$\boldsymbol{PDR_{ASR} = PMO_D - (P_R - ASR) * FRPD} \qquad \textbf{(5)}$$

Para efectos de cálculo, la PDR_{ASR} se calculó a partir de una presión de recibo igual a la ASR más 1 psi.

Tabla 9. *Valores de PDR_{ASR} para el control del sistema ODECA*

Planta de despacho	Planta de recibo	PMO_D	ASR	FRDP	PDR_{ASR}	
					Min	Max
Puerto Salgar	Mariquita	1.630	300	1.6	1.389	1.628
Mariquita	Fresno	1.800	300	1.2	1.628	1.799
Fresno	Herveo	1.800	330	2.0	1.555	1.798

9.3.5. LIMITES DE CONTROL PARA EL MODELO

Para la construcción del modelo, se deben considerar tantos las restricciones de la infraestructura como las restricciones de control, por lo tanto, se realizó un levantamiento de los interlock configurados en cada una de las estaciones que involucran bombeo dentro

del sistema. A continuación, en las tablas 10-13 se encuentran los enclavamientos detallados por estación:

Tabla 10. *Interlock de control planta Puerto Salgar [40]*

Interlock	Condición	Acción			
		Alarma (L / H)	Alarma (LL / HH)	Desacople unidad	Parada bombeo
Planta Salgar					
Succión o recibo	Baja presión (psi) Refinados / GLP	70/150	60	60	60
	Bajo flujo (bph)	714	671	523	523
	Alta presión (psi)	500	N/A	N/A	N/A
	Alto flujo (bph)	1490	1490	1490	1490
Descarga o despacho	Baja presión (psi)	N/A	N/A	N/A	N/A
	Bajo flujo (bph)	714	671	523	523
	Alta presión (psi)	1635	1660	1660	1660
	Alto flujo (bph)	1490	1490	1490	1490
Motor	Alta temperatura chumaceras (°C)	90	100	100	100
	Alta temperatura fases (°C)	130	140	140	140
	Alta temperatura en carcaza (°C)	N/A	N/A	N/A	N/A
	Alta vibración (mils)	4.0	6.0	6.0	6.0
Bomba	Alta temperatura en carcaza (°C)	50	55	55	55
	Alta temperatura en chumaceras (°C)	85	90	90	90
	Alta temperatura en cojinetes (°C)	85	90	90	90
	Alta vibración (mils)	3.0	4.0	4.0	4.0
	Bajas revoluciones (rpm)	N/A	N/A	N/A	N/A
	Altas revoluciones (rpm)	N/A	N/A	N/A	N/A

Tabla 11. *Interlock de control planta Mariquita [40]*

Planta Mariquita					
Succión o recibo	Baja presión (psi) Refinados / GLP	80/180	60/170	60/170	60/170
	Alta presión (psi)	480	500	NA	NA
Descarga o despacho	Baja presión (psi)	950	900	NA	NA
	Alta presión (psi)	1805	1833	1833>por + 5 seg.	1850

Interlock	Condición	Acción			
		Alarma (L / H)	Alarma (LL / HH)	Desacople unidad	Parada bombeo
Flujo	Bajo flujo (bph)	700	700	671 <por + 5 seg.	-
	Alto flujo (bph)	1400	1490	1400>por + 30 seg.	-
Velocidad VDF	Baja velocidad (rpm)	2650	2650	2600<por + 30 seg	-
	Alta velocidad (rpm)	3400	3400	3500> por + 30 seg.	-
Flujo y presión	Condiciones de flujo y Velocidad al arranque unidades	-	-	Flujo<671 y rpm<2600 x 80 seg.	-
Motor	Alta temperatura chumaceras (°C)	130	140	140	140
	Alta temperatura fases (°C)	130	140	140	140
	Alta temperatura en carcaza (°C)	NA	NA	NA	NA
	Alta vibración (mils)	4.0	6.0	6.0	6.0
Bomba	Alta temperatura en carcaza (°C)	45	50	50	50
	Alta temperatura en chumaceras (°C)	85	90	90	90
	Alta temperatura en cojinetes (°C)	85	90	90	90
	Alta vibración (mils)	3.0	4.0	4.0	4.0

Tabla 12. *Interlock de control planta Fresno [40]*

Planta Fresno					
Succión o recibo	Baja presión (psi) Refinados / GLP	80/175	60/150	60	60
	Alta presión (psi)	480	500	N/A	N/A
Descarga o despacho	Baja presión (psi)/BPC-3410	950	900	N/A	N/A
	Alta presión (psi)/BPC-3410	1805	1850	1833	1833
	Alta presión (psi) BPC-3420	1805	1850	1833>por + 5 seg.	-
Flujo	Alto flujo (bph)/BPC-3410	1480	1490	1480	1480
	Bajo flujo(Bph)/BPC-3410	714	671	671	671
	Bajo flujo (bph)/BPC-3420	700	700	671 <por + 5 seg.	-
	Alto flujo (bph)/BPC-3420	1400	1490	1480>por + 30 seg.	-
Velocidad VDF	Baja velocidad (rpm) /BPC-3420	2650	2650	2600<por + 30 seg	-
	Alta velocidad (rpm) /BPC-3420	3400	3400	3500> por + 30 seg.	-
Flujo y velocidad al Arranque de bombeo BPC-3420	Condiciones de flujo y Velocidad al arranque de bombeo BPC-3420	-	-	Flujo<671 y rpm<2600 x 80 seg.	-
Motor	Alta temperatura chumaceras (°C)	90	100	100	100
	Alta temperatura fases (°C)	130	140	140	140
	Alta temperatura en carcaza (°C)	N/A	N/A	N/A	N/A
	Alta vibración (mils)	4.0	6.0	6.0	6.0
Bomba	Alta temperatura en carcaza (°C)	45	55	50	50
	Alta temperatura en chumaceras (°C)	N/A	N/A	N/A	N/A
	Alta temperatura en cojinetes (°C)	85	90	90	90
	Alta vibración (mils)	3.0	4.0	4.0	4.0
	Alta vibración (GsPk) Acelerómetro	1.40	1.80	1.80	1.80
	Bajas revoluciones (rpm)	2640	2600	2600	2600
	Altas revoluciones (rpm)	3400	3500	3500	3500

Tabla 13. *Interlock de control planta Herveo [40]*

Interlock	**Condición**	**Acción**			
		Alarma (L / H)	**Alarma (LL / HH)**	**Desacople unidad**	**Parada bombeo**
Planta Herveo					
Succión o recibo	Baja presión (psi) Refinados / GLP	80	60	<=60	<=60
	Alta presión (psi)	455	500	NA	NA
Descarga o despacho	Baja presión (psi) BPC-3410	950	900	NA	NA
	Alta presión (psi) BPC-3410	1605	1627	1640	1640
	Alta presión (psi) BPC-3420	1605	1627	1627>por + 5 seg.	-
Flujo	Bajo flujo(Bph)/BPC-3410	714	671	671	671
	Alto flujo (bph)/BPC-3410	1480	1490	1400	1480
	Bajo flujo (bph)/BPC-3420	700	700	671 <por + 5 seg.	-
	Alto flujo (bph)/BPC-3420	1400	1490	1400>por + 30 seg.	-
Velocidad VDF	Baja velocidad (rpm) /BPC-3420	2650	2650	2600<por + 30 seg	-
	Alta velocidad (rpm) /BPC-3420	3400	3400	3500> por + 30 seg.	-
Flujo y velocidad al Arranque de bombeo BPC-3420	Condiciones de flujo y Velocidad al arranque de bombeo BPC-3420	-	-	Flujo<671 y rpm<2640 x 80 seg.	-
Motor	Alta temperatura chumaceras (°C)	90	100	100	100
	Alta temperatura fases (°C)	130	140	140	140

	Alta temperatura en carcaza (°C)				
	Alta vibración (mils)	4	6	6	6
Bomba	Alta temperatura en carcaza (°C)	45	50	50	50
	Alta temperatura en chumaceras (°C)	85	90	90	90
	Alta temperatura en cojinetes (°C)	85	90	90	90
	Alta vibración (mils)	3	4	4	4
	Bajas revoluciones (rpm)	2680	2600	2600	2600
	Altas revoluciones (rpm)	3400	3500	3500	3500

9.3.6. IDENTIFICACIÓN DE LAZOS A CONTROLAR

Las estaciones de bombeo cuentan con un control conformado por un selector de mínimas y 3 lazos de control que actúan sobre la presión de succión, presión de descarga y flujo, cada uno tiene un setpoint y un valor de proceso. A continuación, en la tabla 14, se encuentran identificados los lazos de control por cada variable de proceso para las estaciones de bombeo, teniendo en cuenta que el enfoque de este control será modificar los lazos de presión de descarga y consecuentemente la velocidad de las unidades.

Tabla 14. *Lazos de control estaciones de bombeo sistema ODECA [40]*

Lazo de control	Variable a controlar	Instrumento a controlar		Límites de alarma	
		variadores	Válvula de control	Alarma Alta	Alarma baja
Planta Salgar					
PUE-PIC-3406-SP	Presión Succión	√		500	70/150 GLP
PUE-PIC-3408-SP	Presión	√		1635	N/A
PUE-FIC-3301-SP	Flujo	√		1490	714
Planta Mariquita					
MAR-PIC3401-SP	Presión Succión	√		480	80/180 GLP
MAR-PIC3403-SP	Presión	√		1805	950
MAR-SIC-3410-SP	Velocidad	√		3500	2650 en t segundos
MAR-SIC-3420-SP	Velocidad	√		3500	2650 en t segundos
Planta Fresno					
FRE-PIC3401-SP	Presión Succión	√	√	480	80/175 GLP
FRE-PIC3403-SP	Presión	√		1805	950
FRE-SIC-3420-SP	Velocidad	√		3500	2650 en t segundos
Planta Herveo					
HER-PIC-3401-SP	Presión Succión	√		455	80
HER-PIC-3403-SP	Presión	√		1605	950
HER-SIC-3420-SP	Velocidad	√		3500	2650 en t segundos

10. SIMULACIÓN DEL SISTEMA E INTEGRACIÓN DEL CONTROL

La fase 3, se enfoca en la simulación del sistema según las especificaciones y el levantamiento de proceso realizado en la fase anterior y la integración de la propuesta de control.

10.1. SIMULACIÓN DEL PROCESO EN ASPEN

La información de la sección 8.8. en la cual se caracterizó el sistema de transporte, se utiliza como insumo para la simulación del proceso en ASPEN con el fin de generar un gemelo digital, esta herramienta permite simular una amplia variedad de procesos químicos y de ingeniería.

Los procesos claves que involucra la simulación en ASPEN, incluye la definición de los componentes (productos transportados), configuración de las corrientes de entrada y de salida (flujos, presiones), configuración de los bloques de proceso (filtros, válvulas, bombas) y la configuración de las especificaciones de tubería.

Para el desarrollo de la simulación del sistema de bombeo, se incorporaron las siguientes premisas:

- Longitud y perfil de elevación de ducto: Se utilizaron los perfiles y longitudes de tramos suministrados en las fichas técnicas del poliducto.
- PMO_R: Valores obtenidos a partir de análisis estadísticos de los históricos por planta.
- MPD: Mínimo valor de presión de descarga entre los diferentes esquemas para un mismo escenario.
- Bulk Modulus: Se tomó el valor por defecto del software
- Curvas de desempeño de las bombas: Se usaron las curvas suministradas por el proveedor Flowserve
- Datos térmicos: Se realiza bajo un modelo isotérmico a 86°F para cada producto.
- Productos: Se trabajó con los fluidos más pesado y liviano del rango de productos, tomando el B2E como fluido crítico.

A continuación, en las figuras 34 a 37 se encuentran los diagramas de bloque del proceso para cada una de las estaciones simuladas.

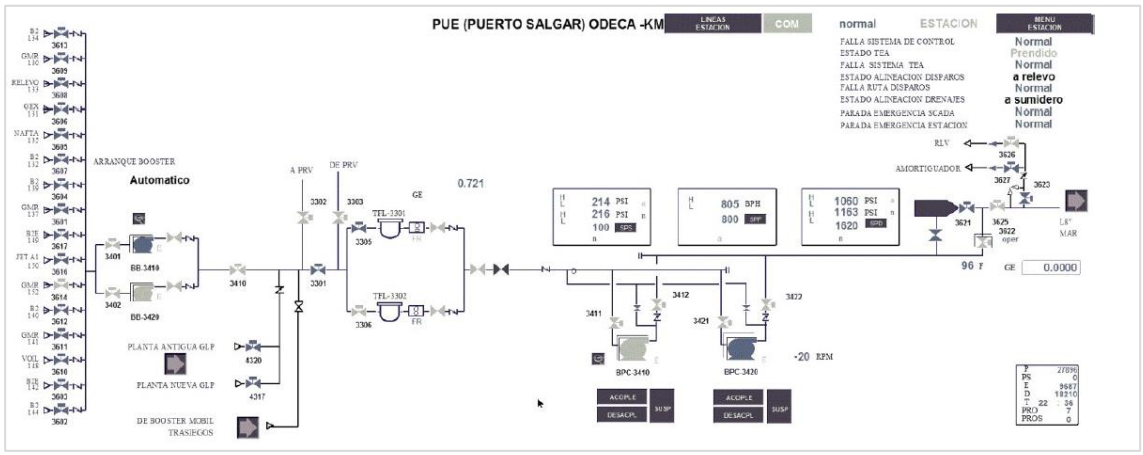


Figura 34. *Diagrama de bloques del proceso planta Puerto Salgar (Elaboración propia)*

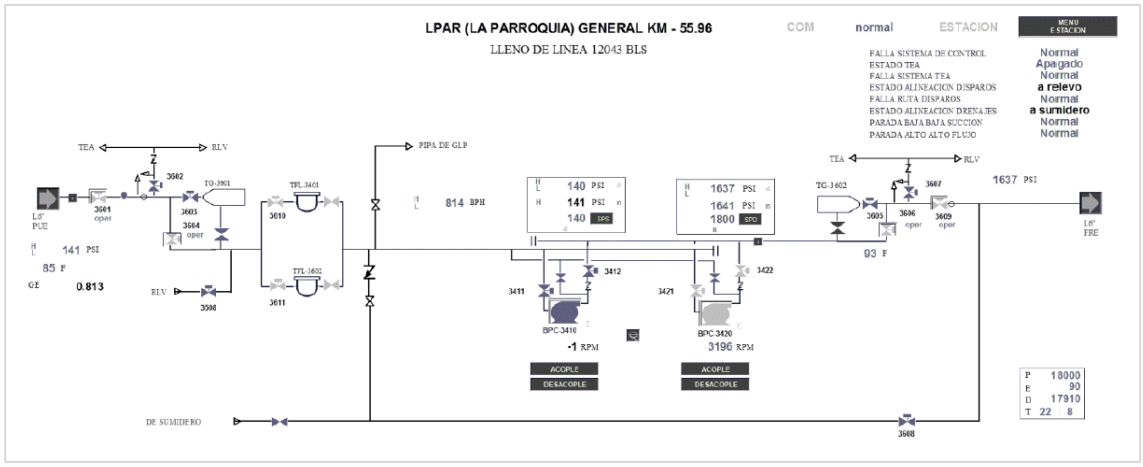


Figura 35. *Diagrama de bloques del proceso planta Mariquita (Elaboración propia)*

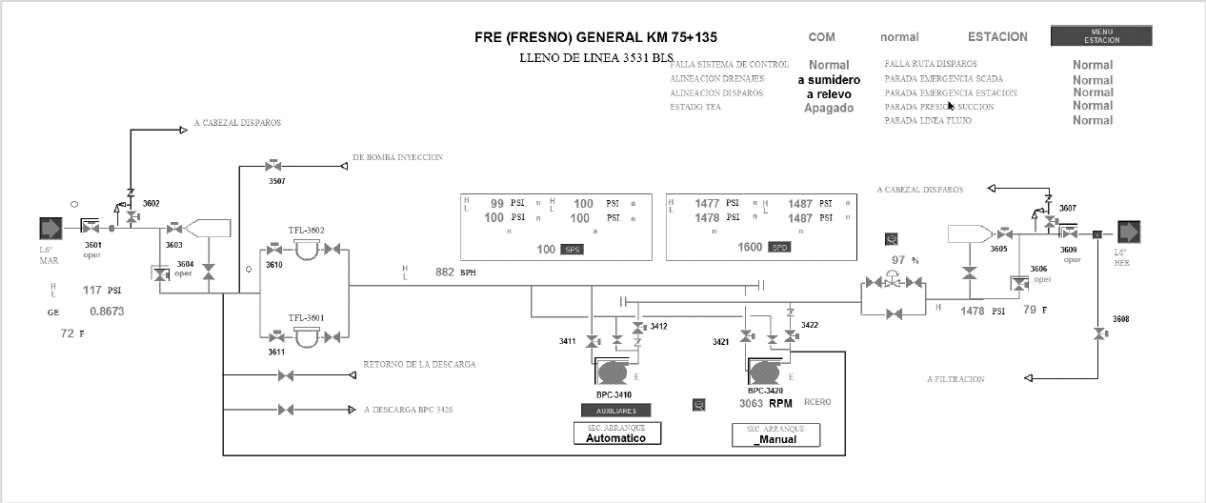


Figura 36. *Diagrama de bloques del proceso planta Fresno (Elaboración propia)*

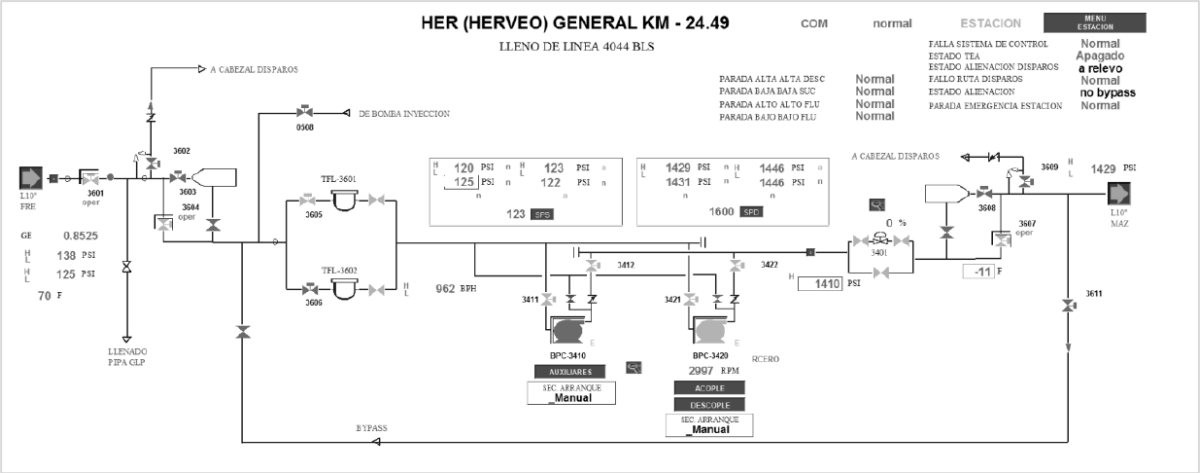


Figura 37. *Diagrama de bloques del proceso planta Herveo (Elaboración propia)*

Como resultado de la simulación se obtienen los perfiles de operación con los rangos de presión en los cuales se trabaja el sistema por cada esquema operacional, es decir, los flujos, presiones de despacho y recibo en cada una de las plantas del sistema, al graficar la cabeza hidráulica o perfil de operación lo obtenido se muestra en la Figura 38, en concordancia con las máximas presiones operacionales alcanzadas para cada tramo.

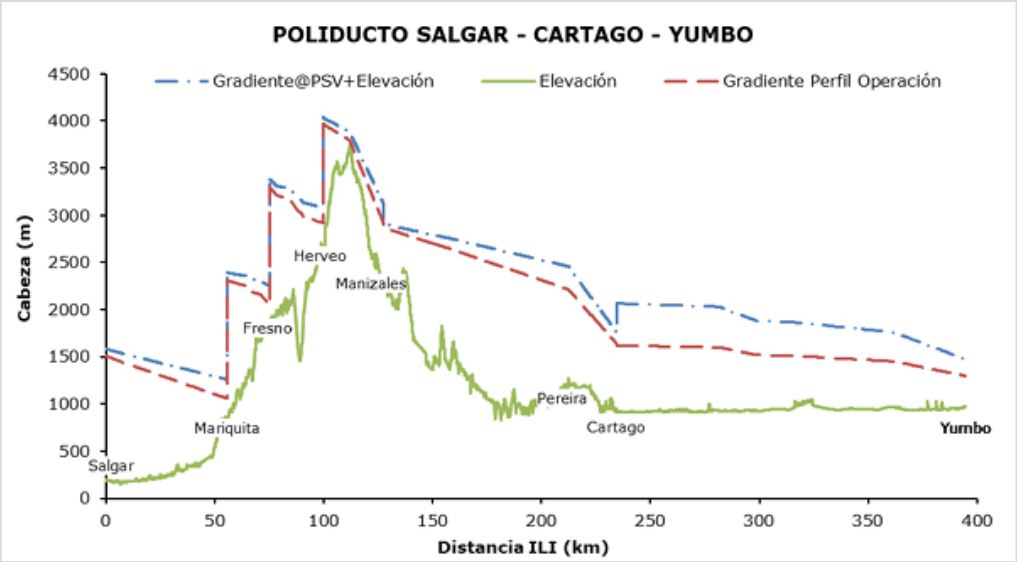


Figura 38. *Resultado simulación transporte hidrocarburos, sistema ODECA (Elaboración propia)*

10.2. VALIDACIÓN DE SIMULACIÓN

La validación de la simulación se realizó a través de una extracción de datos de diferentes días de operación tomados como conjunto de prueba y se compararon los resultados con los históricos de operación.

Primero se realizó la prueba de normalidad con la prueba de Kolmogorov-Smirnov, obteniendo que los datos no son normales con una significancia de 0.001 que nos sugiere rechazar la hipótesis nula de normalidad.

Seguido a esto, se realizó una prueba de rango con signo de Wilcoxon para evaluar la diferencia en presión y flujo entre los valores simulados y los valores reales, encontrando que no hay una diferencia estadísticamente significativa, adicionalmente, se realizó la prueba de coeficiente de concordancia de Kendall, encontrando que las distribuciones son iguales. Con lo anterior, se sugiere que es válida la simulación.

10.3. CONFIGURACIÓN SISTEMA DE CONTROL

Con los parámetros de la fase 2 que definen el sistema de control con base en el algoritmo de detección de la perturbación y la acción de control modificando por Override la presión de descarga de cada una de las estaciones en tiempo real, se realiza la configuración de manera simulada utilizando diagrama de bloques de funciones. En las figuras 39 a 42, se realizan las lógicas de transmisor activo.

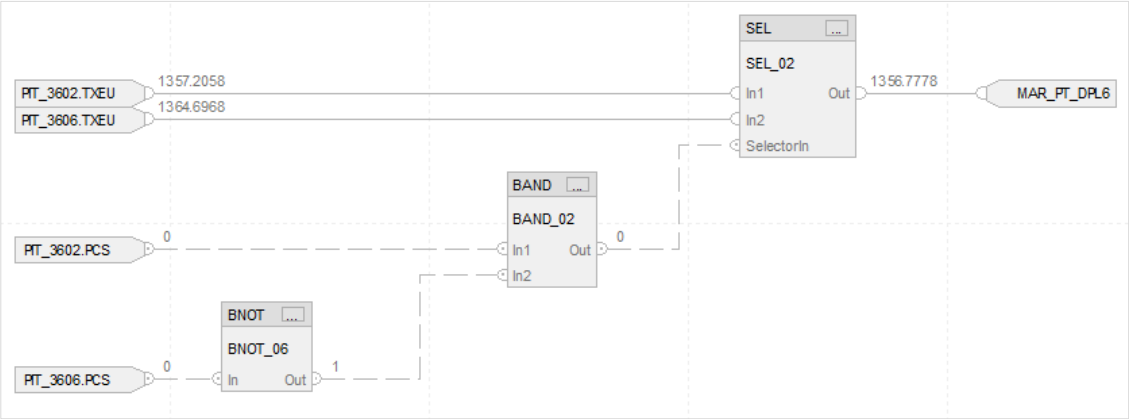


Figura 39. *Bloques funcionales para el control propuesto planta Mariquita (Elaboración propia)*

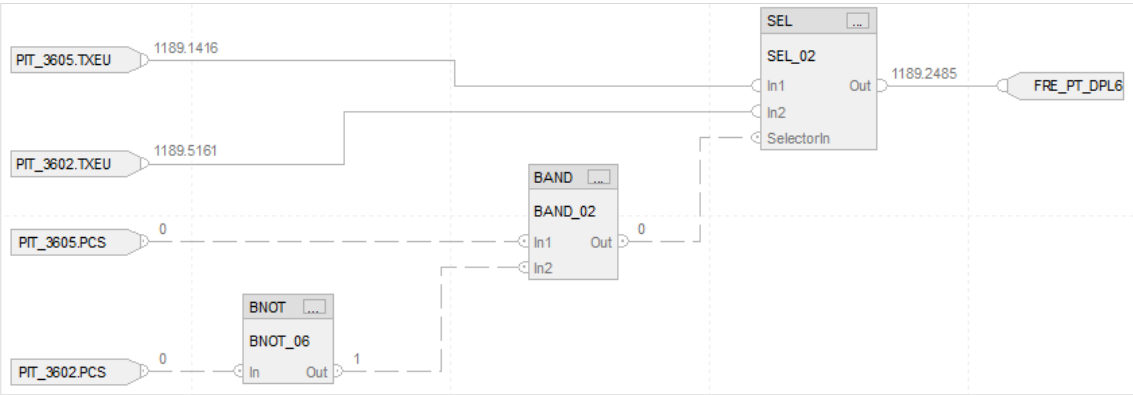


Figura 40. *Bloques funcionales para el control propuesto planta Fresno (Elaboración propia)*

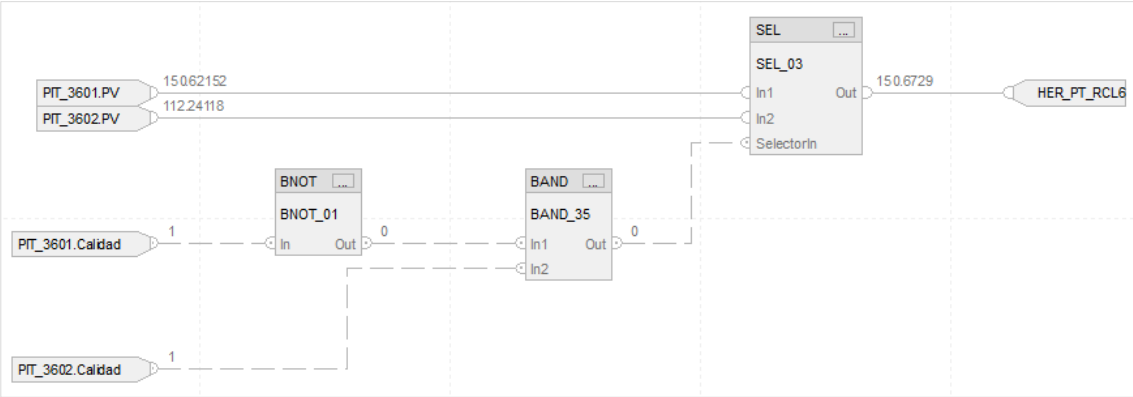


Figura 41. *Bloques funcionales para el control propuesto planta Herveo (Elaboración propia)*

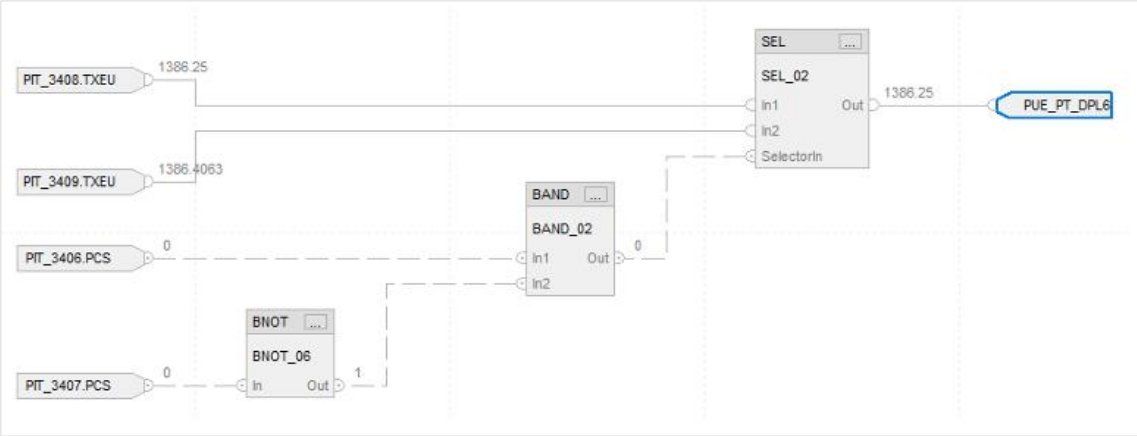


Figura 42. *Bloques funcionales para el control propuesto planta Puerto Salgar (Elaboración propia)*

En la figura 43, se puede visualizar los elementos necesarios en la lógica para realizar la identificación de una condición anormal según las presiones, esquemas operativos y si se supera por más de 2 segundos se declara el estado de alarma para ajustar la velocidad de la bomba, según lo indique el algoritmo.

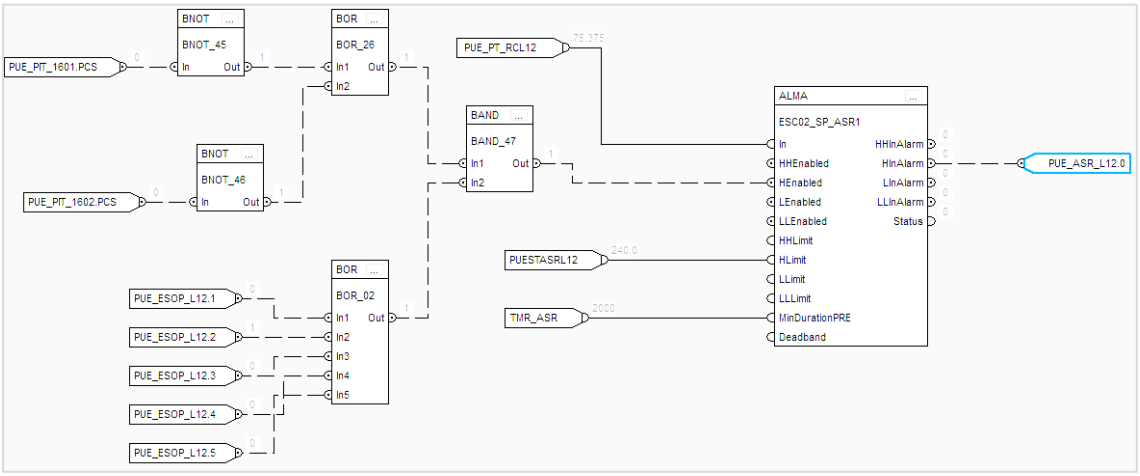


Figura 43. Bloques funcionales para el control de unidades planta Puerto Salgar (Elaboración propia)

10.4. INTEGRACIÓN SIMULADOR Y SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control se configura en RSLogix5000 y Factory Talk View de Rockwell Automation, debido a que actualmente las estaciones del sistema ODECA poseen estos softwares. ASPEN HYSYS es la parte del simulador encargado de los valores de proceso como lo son presiones y velocidades de las unidades, para realizar la comunicación bidireccional entre simulador y sistema de control, se utiliza la interfaz de editor de macros de ASPEN para compartir las señales de proceso.

A continuación, se describen los procesos y macros necesarios para asegurar la comunicación, sobre la pestaña “Customize”, se debe acceder a la herramienta “Macro Language Editor”, como se observa en la figura 44.

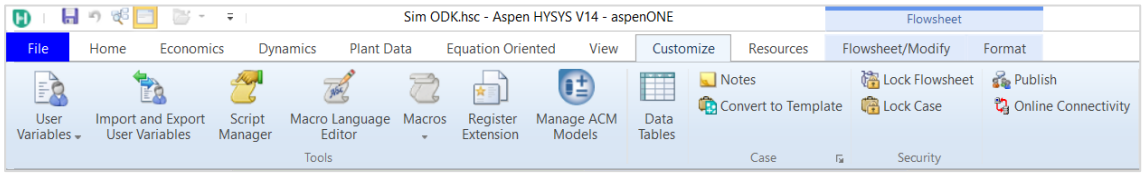


Figura 44. *Acceso a Macro Languague Editor (Elaboración propia)*

En el primer macro, se realiza el cargue de Case de Hysys, a través de la creación del objeto simCase, como se muestra en la figura 45.

```
Sub Main
Dim simCase As Object
Set simCase = ActiveCase
If simCase Is Nothing Then
    MsgBox ("No existe un "HYSYS Case" Abierto")
End If
End Sub
```

Figura 45. *Creación de Hysys Case (Elaboración propia)*

Luego se debe crear la subrutina DDE, a través de una función privada como se observa en la figura 46, acompañado de la sintaxis requerida para obtener la especificación de una unidad, cargándolo a una variable, de manera similar se crea la sintaxis requerida para obtener la especificación de una corriente e igualmente se carga a una variable como se observa en la figura 47.

```
Private Function OpenRSLinx()
On Error Resume Next
'Inicio Conexión DDE con RSLinx
OpenRSLinx = DDEInitiate("RSLINX","SIM_ODK")
'Verificando conexión
If Err.Number<>0 Then
    MsgBox "Error conectando", vbExclamation, "Error"
    OpenRSLinx =0 'Regresa a falso en caso de error
End If
End Function
```

Figura 46. *Creación subrutina DDE (Elaboración propia)*

```
' Asignación variables
Set PUE_PT_3408 = simCase.Flowsheet.Operations.Item("Presión descarga PUE").DischargePressure
' Asignación de corrientes
Set Seg1 = simCase.Flowsheet.Operations.MaterialStreams.Item("S1")
MAR_PT_3401 = Seg1.Pressure.GetValue("C")
```

Figura 47. *Asignación de unidad de proceso a variable (Elaboración propia)*

Finalmente, para establecer la comunicación bidireccional de una variable creada en el RSLogix5000, se requiere de la siguiente instrucción para habilitar la lectura desde RSLogix hacia Aspen Hysys y en la figura 48 se muestra para asignar el valor en un Tag de ASPEN.

```
'Comunicación con Tag de RSLogix
rslinx = OpenRSLinx()
DDEPoke rslinx,"PUE_PIC_3408_SP",Replace(PUE_PIC_3408,"","")
DDETerminate rslinx
'Recepción de RSLogix
PUE_PIC_3408_SP = DDERequest(rslinx,"PUE_PIC_3408_SP",1)
simCase.Flowsheet.Operations.Item("Presión descarga PUE").RawValue=PUE_PT_3408
DDETerminate rslinx
```

Figura 48. *Esquema para comunicación bidireccional ASPEN y RSLogix (Elaboración propia)*

Al seguir los pasos anteriores se logra la integración entre el sistema de control y el simulador de proceso de manera que se logra la arquitectura que se visualiza en la figura 49.

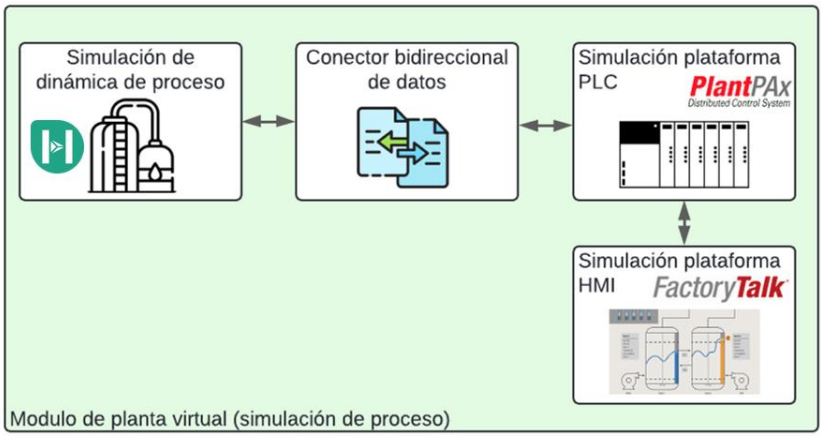


Figura 49. *Arquitectura integrada de simulador y control (Elaboración propia)*

11. EVALUACIÓN DEL SISTEMA

Una vez integrados el simulador y el sistema de control, en la fase 4 se enfoca en los equipos y procesos del sistema deben ser evaluados con los requerimientos del sistema de control propuesto, para ello, se requiere valorar operativamente los ajustes en las presiones de descarga resultantes del algoritmo de detección de perturbaciones (PDR_{ASR}) a las cuales se ajustaría la estación inmediatamente anterior. Estas presiones dependen directamente del nivel de sobrepaso de la presión de recibo en la estación de rebombeo de cada tramo con respecto a la alarma de ASR definida anteriormente.

11.1. VALIDACIÓN OPERACIONAL DEL ASR_H

La validación de la ASR_H se realiza mediante la simulación dinámica del cambio de la presión de una estación de recibo ante cambios en las condiciones de flujo. El comportamiento de la presión de recibo con respecto al tiempo se analiza ante un bloqueo de la ruta de flujo, el cual se simula por medio del cierre de una válvula de igual diámetro a la línea de recibo en cada estación, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 15. *Tiempos resultantes del cambio de presión en evento crítico*

ESTACIÓN DESPACHO	ESTACIÓN DE RECIBO	TIEMPO CIERRE VÁLV. (s)	TIEMPO PARA ASR (s)	TIEMPO PARA ASR_H (s)	TIEMPO PARA $PAVS_R$ (s)
Puerto Salgar	Mariquita	80	138	140	140
Mariquita	Fresno	60	118	120	120
Fresno	Herveo	80	144	152	153

Con base en los resultados de la tabla 15, se observa que se cuenta con tiempos diferenciales entre la ASR y ASR_H incluso en la condición más crítica posible como lo es una pérdida de ruta de flujo. Como referencia, a continuación, se incluye el comportamiento de la presión de recibo en Mariquita en función del tiempo ante un evento de proceso.

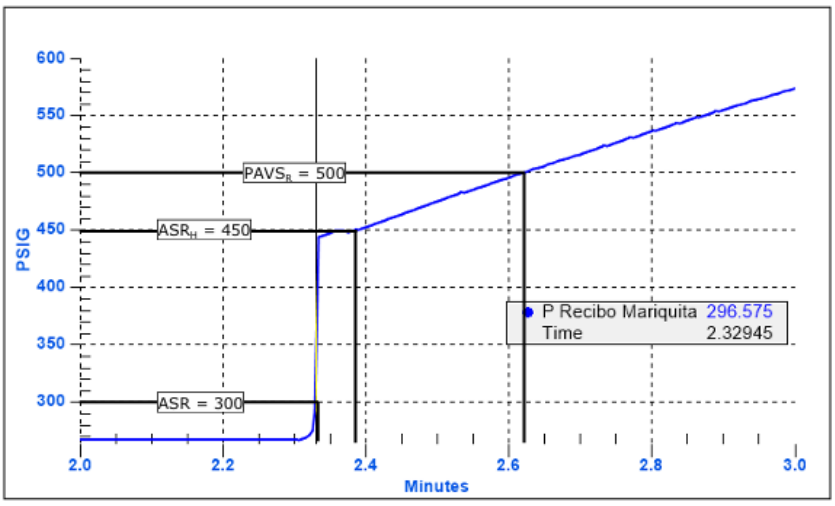


Figura 50. *Comportamiento de la presión ante evento hidráulico en Mariquita (Elaboración propia)*

11.2. TIEMPO DE RETARDO DE ONDA HIDRÁULICA

La filosofía de control y protecciones del sistema considera que el tiempo del evento hidráulico no debe superar al mínimo tiempo necesario que toma el sistema en identificar y actuar por los cambios en las variables de proceso asociadas a la protección de la línea. En otras palabras, los tiempos que conllevan la identificación, las comunicaciones y el desencadenamiento de las lógicas asociadas a un incremento de presión en el recibo de una estación, no debe ser mayor al tiempo transcurrido de las ondas transitorias para trasladarse desde allí hasta la estación de bombeo inmediatamente anterior.

La Tabla 16 resume el comportamiento hidráulico para cada tramo, por cierre de una válvula que incrementa las condiciones de presión de recibo. En este caso, no se tienen en cuenta las válvulas de alivio del sistema y se analiza el tiempo en el cual la onda de presión hidráulica viaja desde la estación de recibo hasta la estación de bombeo aguas arriba. Se incluye a continuación, la figura 51 correspondiente al primer tramo a manera de ejemplo.

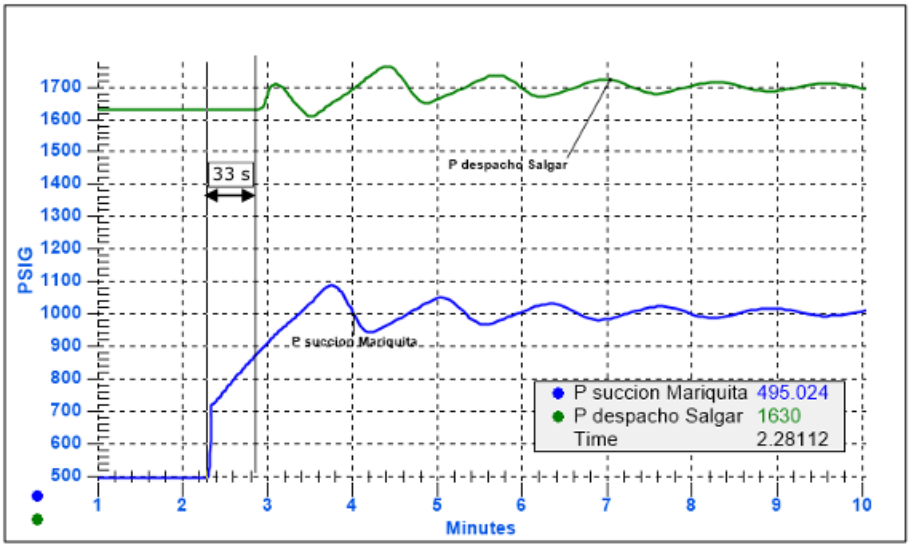


Figura 51. *Comportamiento presión de despacho y recibo ante un evento hidráulico en la planta Puerto Salgar y Mariquita (Elaboración propia)*

De acuerdo con los resultados de la tabla 16, se logra determinar cuál es la estación más crítica para el control del sistema y la importancia de efectuar un control sobre las estaciones que cuentan con unidades de bombeo como lo son Puerto Salgar, Mariquita, Fresno y Herveo. Para este caso se determina el segmento Mariquita – Fresno es el más crítico, seguido del segmento Fresno – Herveo y finalmente el segmento Puerto Salgar – Mariquita para las estaciones de bombeo.

Tabla 16. *Tiempos de retardo de onda hidráulica sistema ODECA*

ESCENARIO	ESTACIÓN DESPACHO	ESTACIÓN DE RECIBO	TIEMPO ONDA HIDRÁULICA (s)
TODOS	Puerto Salgar	Mariquita	33
	Mariquita	Fresno	9
	Fresno	Herveo	12

11.3. RESULTADOS SISTEMA DE CONTROL

Finalmente, se realiza la validación del control para conocer la capacidad de reestablecer el sistema a los limites seguros, obteniendo el comportamiento de la figura 52, donde ante una perturbación simulada que supera los límites de la ASR en la planta Mariquita (300 psi), el control propuesto genera disminución en la presión de descarga de la estación anterior (Salgar), donde inicialmente se interrumpe la tendencia de aumento de presión en el recibo en 19 segundos.

Luego con los permanentes ajustes a la presión de descarga de Salgar se logra salir de la zona de ASR en 42 segundos y un comportamiento estacionario luego de 2 minutos aproximadamente, evitando el disparo de PSV y la parada no programada.

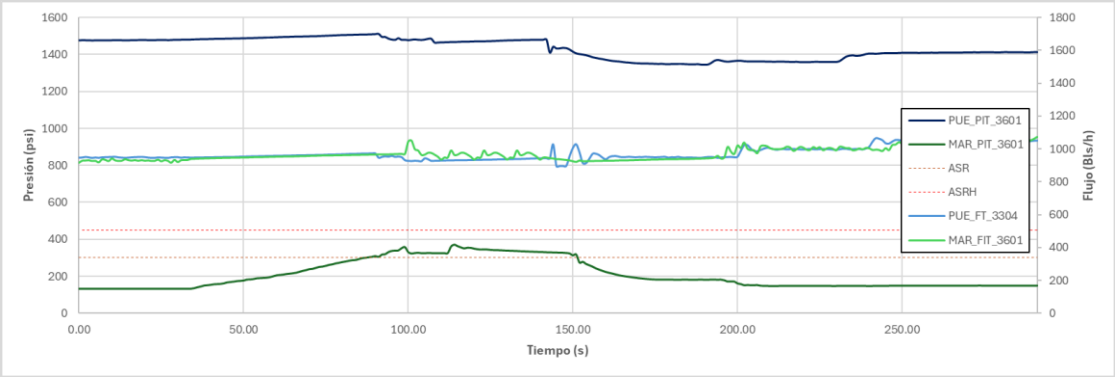


Figura 52. *Comportamiento presión y flujo ante un evento hidráulico bajo el efecto del sistema de control propuesto (Elaboración propia)*

Para visualizar el efecto de la perturbación, bajo el sistema de control actual, se evalúa la misma condición anterior, donde se obtiene que el sistema no es capaz de mantener la operación estable, esto debido a que al tener una alta presión en la succión de la estación Mariquita, el selector de mínimas intentará reducir esta sobrepresión acelerando la bomba y reflejando un aumento temporal en el flujo, sin embargo, al alcanzar los límites de RPM de la bomba, no quedará otro ajuste sino el de desacople por protección de la bomba, generando la caída de flujo inicialmente en la estación Salgar y luego como efecto en cadena se produce la caída de flujo en la estación Mariquita.

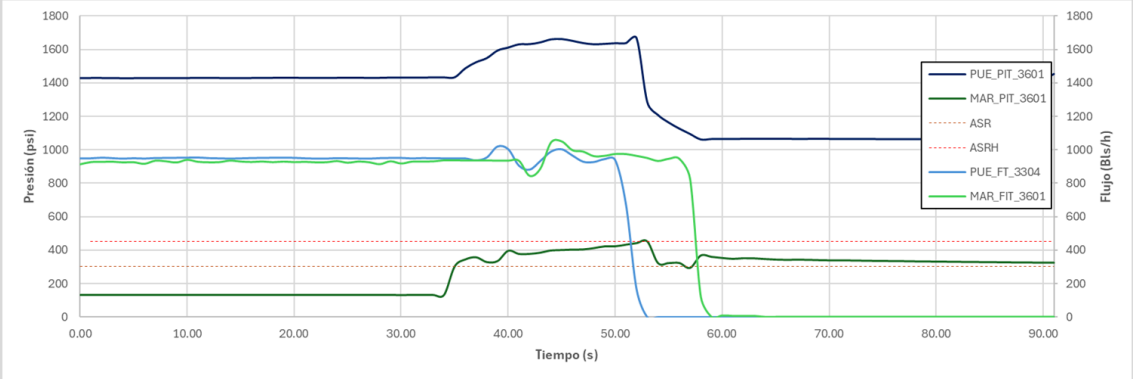


Figura 53. *Comportamiento presión y flujo ante un evento hidráulico bajo el efecto del sistema de control actual (Elaboración propia)*

12. SELECCIÓN MÉTODO COMUNICACIÓN

En la fase 5, se enfoca en la selección de un método de comunicación para las estaciones involucradas en el sistema de control propuesto, por lo que para la implementación de esta propuesta se requiere de una comunicación en tiempo real de las variables identificadas anteriormente, en esta sección se describe el levantamiento realizado a las instalaciones y los requerimientos de telecomunicaciones.

12.1. DIAGNÓSTICO TELECOMUNICACIONES

Para las plantas del sistema se evaluaron las condiciones de los sistemas de telecomunicaciones actuales, encontrando que las plantas cuentan con tecnología de comunicaciones SD-WAN, que las conectan a la red corporativa.

Actualmente no hay interconexión entre las plantas que permita el intercambio de datos operativos, sin embargo, la infraestructura disponible se considera suficiente para realizar las adecuaciones necesarias para la interconexión entre las plantas, que permita la implementación del control y protección de la línea de transporte. Las plantas del sistema cuentan con dos (2) canales de comunicación que trabajan uno como principal y el segundo como respaldo, cada uno con la capacidad de manejar todo el tráfico. En el ancho de banda actual tienen prioridad los datos de SCADA.

Las plantas Puerto Salgar, Mariquita La Parroquia, Fresno y Herveo utilizando los sistemas de telecomunicaciones existentes, deben publicar la información de los estados, variables y alarmas asociadas a su condición operativa, conformando una palabra digital. La información de las palabras digitales de cada planta formará parte de la base de datos del sistema de control y protección de la línea.

En las estaciones se cuenta con comunicación OPC para la transferencia de los datos, dentro de las licencias activas se tiene una licencia de tunnel Matrikon para

leer la base de datos del sistema de control, instalada en una estación colector-dedicada, que se comunica con la estación de ingeniería de la planta.

12.2. PROPUESTA DE TELECOMUNICACIONES

Para la interconexión de las plantas Puerto Salgar, Mariquita La Parroquia, Fresno y Herveo, se propone el esquema de telecomunicaciones mostrado en la Figura 54, el cual debe ser complementado con reglas de configuración en los Firewall o enrutadores existentes, definidas por el área Digital de la empresa, asegurando que haya transferencia de información entre las plantas. Esta actividad deberá solicitarse formalmente al área de telecomunicaciones. Además, deberá adelantarse el trámite para asegurar el cumplimiento de los protocolos de ciberseguridad.

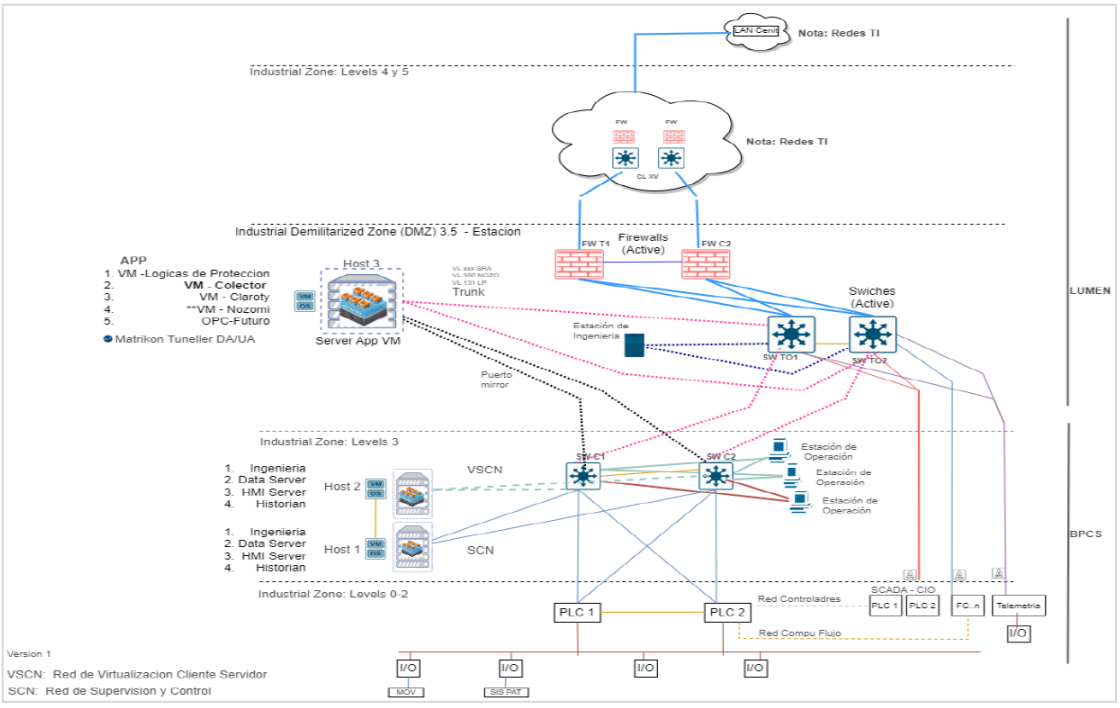


Figura 54. *Esquema de telecomunicaciones propuesto [40]*

Para la comunicación OPC de la planta Puerto Salgar se debe verificar la disponibilidad de puertos en las tarjetas existentes para ser utilizados, de lo contrario se debe adquirir una nueva tarjeta, de tal manera que se configure las variables lógicas de comunicación del sistema propuesto, sin embargo, se

recomienda coordinar con el área de telecomunicaciones, la información del tipo de enlace, ancho de banda y condiciones de arquitectura actuales.

En la planta Puerto Salgar para el sistema de control propuesta, la estación colectora se debe complementar con una nueva licencia Matrikon OPC Data Manager para intercambiar información con las plantas Mariquita La Parroquia, Fresno, Herveo. Las lógicas para control y protección de la línea se deben configurar en el controlador de despacho de la planta Puerto Salgar.

En la planta Puerto Salgar se debe conformar una base de datos con los estados discretos, variables análogas y alarmas con los cuales se debe configurar el sistema de supervisión y control de la línea, como propuesta se sugieren los siguientes:

Tabla 17. *Listado de señales a compartir*

Nombre Variable	Salgar	Mariquita	Fresno	Herveo
Estado Operativo Planta	PUE_BOM_01 0=Apagado 1=Bombeando	MAR_BOM_01 0= Apagado 1= Rebombeando	FRE_BOM_01 0= Apagado 1= Rebombeando	HER_BOM_01 0= Apagado 1= Rebombeando
ASR	N/A	MAR_ASR_01 (300)	FRE_ASR_01 (300)	HER_ASR_01 (330)
ASRH	N/A	MAR_ASRH_01 (450)	FRE_ASRH_01 (450)	HER_ASRH_01 (450)
Presión Despacho Ppal	PUE_PT_3602	MAR_PT_3602	FRE_PT_3605	HER_PT_3606
Presión Despacho Backup	PUE_PT_3602A	MAR_PT_3404	FRE_PT_3602	HER_PT_3603
Presión Recibo Ppal	N/A	MAR_PT_3603	FRE_PT_3601	HER_PT_3601
Presión Recibo Backup	N/A	MAR_PT_3601	N/A	HER_PT_3602
Falla de Ruta de Flujo	PUE_FRUTA_01	MAR_FRUTA_01	FRE_FRUTA_01	HER_FRUTA_01
Falla de Comunicación	PUE_FCOMP_MAR	MAR_FCOMP_PUE	FRE_FCOMP_PUE	HER_FCOMP_PUE
	PUE_FCOMP_FRE	MAR_FCOMP_FRE	FRE_FCOMP_MAR	HER_FCOMP_MAR
	PUE_FCOMP_HER	MAR_FCOMP_HER	FRE_FCOMP_HER	HER_FCOMP_FRE
Falla de Energía	PUE_ET_01KV / FALLA ENERGIA	MAR_ET_01KV / PQM_34500.V_LINE_AVE	FRE_ET_01KV / PQM_6300.V_LINE_AVE	HER_ET_01KV / VOL_LIN_345

12.3. TIEMPOS DESEADOS DE COMUNICACIÓN DEL SISTEMA

Para efectos de simulación de las respuestas de los sistemas se consideran los tiempos de procesamiento en el sistema de control y los de transmisión de datos a través de los canales de comunicación. Con estos tiempos se busca determinar la magnitud de intervalos de tiempo que se tienen para realizar acciones de control y protecciones antes de que un evento hidráulico produzca acciones (disparos a relevo, apagado, cambio de escenario).

Se consideran los tiempos de procesamiento en el sistema de control y los de transmisión de datos a través de los canales de comunicación, según lo mostrado en la tabla 18.

En el sistema de control se considera el tiempo t_{SC}, que permite cuantificar la duración de captura de la variable, desarrollo de la lógica y entrega de dato en módulo de comunicaciones. Esto se requiere en cada controlador (despacho y recibo) y se cuantifica por equipo en 0.7 s.

Tabla 18. *Tiempos en el sistema de control*

Variable	Descripción	Base de cálculo o Fuente.
t_{RC}	Tiempo máximo de retardo del canal.	Información técnica de contratista de servicios de telecomunicaciones.
t_{CC}	Tiempo de transferencia de datos en el canal de comunicación	Información técnica de contratista de servicios de telecomunicaciones
t_{SC}	Tiempo retardo del procesamiento del sistema control.	Información técnica de los fabricantes del sistema de control
t_{TT}	Tiempo de retardo total	t_{TT}= (0,7) * (2) + t_{CC}

Las plantas utilizan los servicios de contratistas de telecomunicaciones que típicamente deben proveer dos canales (principal y secundario), los que pueden ser: dos por microondas, uno por microondas y otro satelital o dos de tipo satelital. La forma de cálculo es la siguiente:

Tiempo retardo del canal lectura + Tiempo retardo del canal confirmación= 2 veces t_{RC} ***(6)***

Si el canal es de Microondas el tiempo máximo de retardo es de t_{RC}=0.112 s

Si el canal es Satelital el tiempo máximo de retardo es de t_{RC} 1.12 s

El tiempo de retardo total calculado es:

$$t_{cc} = 4 * t_{RC}$$

$$t_{TT} = (0,7) * (2) + t_{CC}$$

Para el sistema ODECA los canales de comunicación son por Microondas por lo tanto el tiempo de retardo total del sistema es:

$$t_{CC} = 4 * t_{RC} = 4 * 0.112 \text{ s} = 0,448 \text{ s}$$

$$t_{TT} = (0,7) * (2) + 0.448 = 1.848 \text{ s}$$

A continuación, se muestra los valores de tiempos de retardos calculados para el sistema ODECA:

Tabla 19. *Tiempo retardo telecomunicaciones*

Variable	Tiempo (s)
t_{SC}	1.4
t_{CC}	0.448
t_{TT}	1.848

De esta manera, se estiman que los valores deseados para la comunicación entre el sistema de control y las demás estaciones debe ser cercano a las 1.8 segundos.

13. CONCLUSIONES

El presente trabajo de grado se abordó el diseño y simulación de un sistema de control predictivo de perturbaciones hidráulicas y de proceso en el transporte de hidrocarburos con el objetivo de anticiparse a las variaciones en la presión y flujo en las plantas del sistema de transporte ODECA, de manera autónoma y manteniendo la operación en sus límites seguros, habilitando potencialmente el cumplimiento de la nominación mensual.

A continuación, se encuentran descritas las principales conclusiones de cada fase:

13.1. EVALUACIÓN DEL PROCESO

El análisis de históricos permitió identificar que las variables más críticas a controlar en las perturbaciones hidráulicas y de proceso son las presiones de descarga de cada una de las estaciones de bombeo (Puerto Salgar, Mariquita, Fresno y Herveo). El control regulatorio de cada estación compuesto por tres PID sobre el flujo, presión de succión y presión de descarga, son útiles para los arranques y cambios de esquema operativos, sin embargo, no son capaces de actuar como una capa de protección para evitar sobrepresiones en las demás estaciones.

La empresa cuenta con una red de documentación robusta, que permite identificar claramente los parámetros de operación, los parámetros de control y las especificaciones de cada uno de los equipos, facilitando la construcción de gemelos digitales del proceso.

13.2. SELECCIÓN DEL MODELO DE CONTROL

En la selección del modelo dinámico del transporte de hidrocarburos para la estación ODECA, se evaluaron estrategias de deducción del modelo a partir del fenómeno físico utilizando la dinámica de la onda hidráulica, la caída de presión a lo largo del tramo de tubería y el aumento de presión por cada bomba; y se utilizó la

estrategia de muestreo experimental a partir de históricos. De las dos estrategias usadas se encuentra que el muestreo experimental es una aproximación acertada con el 99% de ajuste de los datos en comparación con el modelo dinámico.

Por otro lado, el muestreo experimental representa una buena opción al permitir capturar la complejidad de sistemas reales bajo esquemas de modelado relativamente sencillos, además, de presentar la facilidad de ajuste continuo con nuevos datos, mejorando su precisión y utilidad a lo largo del tiempo. Sin embargo, al ser una aproximación se pueden tener escenarios no contemplados que un modelo más riguroso como el de fenómeno físico si tuviese.

13.3. SIMULACIÓN DEL SISTEMA E INTEGRACIÓN DEL CONTROL

Teniendo en cuenta los resultados de la simulación, se logró determinar tres parametros relevantes para el sistema de control predictivo como lo son, alarma de succión remota, la presión de descarga resultante de la ASR y el factor de reducción de presión de la descarga.

La integración del control a la simulación, se realizo de la misma manera en que se realizaría en una implementación en campo, haciendo uso del software de control y automatización de cada una de las plantas del sistema de transporte, presentandose como una opción económica y agil a través del uso de diagramas de bloques funcionales.

13.4. EVALUACIÓN DEL SISTEMA

De acuerdo con el resultado de los tiempos de retardos se puede evidenciar que se pueden ejecutar acciones de control antes de que el evento hidráulico se refleje en la planta siguiente, debido a que los tiempos de comunicación y ejecución de las lógicas de control son inferiores que los de la perturbación.

La implementación de dos parámetros para el control del sistema (ASR y ASR_H) ante la situación más crítica como lo es, la perdida de ruta de flujo permite realizar

diferenciaciones, por lo que, se consideran viables en la prevención de las perturbaciones hidráulicas y de proceso.

Por último, se observa que ante una perturbación el sistema de control propuesto interrumpe la tendencia de aumento de presión en el recibo en 19 segundos, luego con los permanentes ajustes a la presión de descarga de Puerto Salgar se logra salir de la zona de ASR en 42 segundos y un comportamiento estacionario luego de 2 minutos aproximadamente, evitando el disparo de PSV y la parada no programada.

13.5. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE COMUNICACIÓN

La infraestructura de la empresa se considera suficiente para realizar las adecuaciones necesarias para la interconexión entre las plantas, que permite la implementación del control y protección de la línea de transporte.

Las plantas del sistema cuentan con dos canales de comunicación que permiten tener redundancia, cada uno con la capacidad de manejar todo el tráfico. Para realizar el intercambio se debe complementar con una nueva licencia Matrikon OPC, reglas de ciberseguridad definidas por la empresa para permitir lectura y escritura de datos y el aprovechamiento de la licencia de tunnel Matrikon para leer la base de datos del sistema de control, instalada en la estación Puerto Salgar como colector dedicado, para que se comunique con la estación de ingeniería de las plantas del sistema.

Por otro lado, de acuerdo con el resultado de los tiempos de retardos de la infraestructura existente, se puede evidenciar que se pueden ejecutar acciones de control antes de que el evento hidráulico se refleje en la planta aguas arriba o aguas abajo.

14. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CENIT, «Informe integrado de gestión sostenible,» Bogotá, 2022.

[2] CENIT, «Instructivo mesa técnica de factor de servicio,» Bogotá, 2023.

[3] Organización Latinoamericana de Energía, «Situación del consumo energético a nivel mundial y para América Latina y el Caribe,» Quito, 2022.

[4] Unidad de Planeación Minero Energética, «Resolución No. 000714 de 2023,» Bogotá, 2023.

[5] M. Farahani y D. Rahmani, «Production and distribution planning in petroleum supply chains regarding the impacts of gas injection and swap,» *Energy,* vol. 141, pp. 991-1003, 2017.

[6] O. Castiblanco Urrego y D. J. Cardenas Romay, «Importancia del transporte de hidrocarburos y su realidad en Colombia,» *Inventum,* vol. I, nº 18, pp. 77-89, 2023.

[7] J. G. Speight, Handbook of petroleum product analysis, 2a ed., John Wiley & Sons, 2015.

[8] Ecopetrol, Normas de ingeniería de oleoductos, Bogotá, 1997.

[9] J. E. Otero Ramos, Instrumentación industrial en instalaciones petroleras, 2013.

[10] Instrumentation Society of America, 5.1 Instrumentation, Symbols and Identification, 2022.

[11] Brother Filtration, «Filtración en el sector Midstream,» Wuhan, 2022.

[12] Kimray, Inc, «Medición de líquidos y gases para petróleo y gas,» Texas, 2023.

[13] A. Córdoba y A. Custodio, «Diseño y Construcción de un Transmisor de Temperatura Basado en Interfaz Digital Directa,» *LACCEI,* 2010.

[14] Ecopetrol, «El petróleo y su mundo,» *Unidad de Comunicaciones Corporativas de Ecopetrol,* p. 37, 2014.

[15] American Petroleum Institute, 685 - Sealless Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical, and Gas Industry Process Service, US, 2022.

[16] Secretaria de comercio y fomento industrial, Funtioning for centrifugal pumps, México, 1971.

[17] American Petroleum Institute, 674 - Displacement Pumps - Reciprocating, Texas, 2022.

[18] Ingeniería de fluidos, Protección anti ariete, Buenos Aires, 2020.

[19] M. Rodríguez, «Vibraciones en tuberías de hidrocarburos,» p. 9, 2024.

[20] Rockwell Automation, «Arquitectura Controllogix: PLC DE ROCKWELL AUTOMATION,» p. 18, 2023.

[21] B. Lipták, Instrument Engineers' Handbook, Vol. 2: Process Control and Optimization, vol. II, CRC Press, 2023.

[22] J. Gómez, Industrial Automation and Control Systems: Practical Approaches, Springer, 2022, pp. 145-150.

[23] E. F. Camacho y C. Bordons, Model Predictive Control, 5th ed., Springer, 2020.

[24] S. J. Qin y T. A. Badgwell, «A survey of industrial model predictive control technology,» *Control Engineering Practice,* vol. 11, nº 7, pp. 733-764, 2020.

[25] A. Bemporad, M. Morari y V. Dua, «The explicit linear quadratic regulator for constrained systems,» *Automatica,* vol. 38, nº 1, pp. 3-20, 2020.

[26] M. A. Cisneros Tafur, «Estrategias avanzadas de control óptimo y predictivo discreto aplicadas al sistema de bombeo de petróleo por accionamiento mecánico.,» p. 125, 2021.

[27] J. A. Prada, «Controlador predictivo basado en modelo no lineal (nmpc) para optimizar de forma automática y segura, la operación de un pozo petrolero con sistema de levantamiento artificial con bomba electro-sumergible.,» 2018.

[28] J. H. Viljoen, C. J. Muller y I. K. Craig, «Hybrid nonlinear model predictive control of a cooling water network,» *Control Engineering Practice,* vol. 97, pp. 50-62, 2020.

[29] N. Armin, H. Heidarifar, M. Shahbakhti, C. Robert Koch y B. Hoseinali, «Model Predictive Control of Internal Combustion Engines: A Review and Future Directions,» *Energies,* vol. 14, nº 19, pp. 51-62, 2021.

[30] N. Molina, «Estudio del efecto del golpe de ariete en estaciones de bombeo, oleoductos, y los sistemas inherentes de prevención de fallas, para evitar daños ecológicos,» p. 125, 2020.

[31] C. H. K. Reddy Et Al., «Data Acquisition in SCADA Systems: A Survey,» *IEEE Transactions on Industrial Informatics,* vol. 15, nº 7, pp. 4363-4375, 2019.

[32] D. A. D. Oliviera Et Al., «Cloud Storage in Big Data Analytics,» *IEEE Cloud Computing,* vol. 7, nº 5, pp. 12-20, 2020.

[33] A. G. D. C. Mehta et al., «Real-Time Big Data Processing with Apache Kafka,,» *IEEE Access,* vol. 8, pp. 123456-123465, 2020.

[34] M. R. Beg, S. K. Gupta y P. Kumar, «Implementation of Honeywell Uniformance PHD for process data management in oil and gas industries,» *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management,* pp. 1205-1209, 2017.

[35] J. M. Smith et al., «Industrial Communication Networks: A Review of Standards and Protocols,» *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* vol. 68, nº 5, pp. 3993-4004, 2021.

[36] R. C. H. K. N. Ali et al., «Security in Cloud Computing: A Survey,» *IEEE Access,* vol. 9, pp. 103568-103588, 2021.

[37] H. R. T. H. Khokhar et al., «Sensor Calibration and Data Integrity in Industrial IoT Systems,» *IEEE Internet of Things Journal,* vol. 8, nº 14, pp. 11370-11382, 2021.

[38] P. A. Brown et al., «Designing Secure Communication Systems for Industrial Applications,» *IEEE Transactions on Industrial Informatics,* vol. 15, nº 8, pp. 4731-4740, 2019.

[39] S. K. M. A. Khan et al., «Data Quality in Big Data: A Survey,» *IEEE Access,* vol. 8, pp. 78099-78115, 2020.

[40] Ecopetrol, Instructivo operacional del sistema de transporte, 2019. [Confidencial]

[41] Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), Resolución No. 222. Bases sobre las cuales la comisión efectuará los estudios para determinar la metodología tarifaria para la remuneración del transporte de combustibles líquidos y GLP por ductos, Bogotá, D.C., 2015.

[42] C. Ramírez, P. López y D. Vásquez, «Data-Driven Predictive Control Strategies for Hydrocarbon Pumping Applications,» *IEEE Trans. Automation Sci. Eng.,* vol. 18, nº 2, pp. 742-752, 2022.

[43] D. Pérez, S. Ortiz y F. Morales, «Deep Learning-Based Predictive Control for Industrial Oil Pumping: Benefits and Challenges,» *IEEE Internet Things,* vol. 8, nº 5, pp. 3505-3514, 2021.

[44] E. López, M. Sánchez y R. Delgado, «Comparative Analysis of Model-Based and Data-Driven Predictive Control in Petroleum Pumping Systems,» *IEEE Trans. Ind. Inform.,* vol. 17, nº 1, pp. 234-244, 2021.

[45] S. Haykin, Neural Networks and Learning Machines, 3rd ed. ed., Pearson, 2009.

[46] C. Cortes y V. Vapnik, «Support-vector networks,» *Machine Learning,* vol. 20, nº 3, pp. 273-297, 1995.

[47] Y. LeCun, Y. Bengio y G. Hinton, «Deep learning,» *Natura,* vol. 521, nº 553, pp. 436-444, 2015.

[48] A. González, M. R. Torres y L. F. Hernández, «Model Predictive Control in Hydrocarbon Pumping Systems: A Review of Analytical Approaches,» *IEEE Trans. Ind. Electron,* vol. 68, nº 2, pp. 1253-1261, 2021.

[49] B. Martínez, R. Silva y J. Gómez, «Analytical Models for Predictive Control in Oil Pumping: Advances and Challenges,» *IEEE Control Syst. Mag.,* vol. 41, nº 4, pp. 47-56, 2020.

[50] J. Maciejowski, Predictive Control with Constraints, Prentice Hall, 2002.

[51] W. D. Seider, Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation, Wiley, 2016.

[52] R. F. Ortega Rodriguez, «Diseño e instalación de un sistema de protección catódica para controlar la corrosión en el fondo de los tanques de almacenamiento de hidrocarburos,» *UTP,* pp. 1-134, 2019.