DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT PARALELO PLANAR TIPO SCARA CON 2 GDL RRRRR PARA FINES DIDÁCTICOS

BRIAN ALEXIS BERNAL ROMERO

JAIRO ORLANDO GRANDE MURCIA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

TECNOLOGÍA EN MECÁNICA INDUSTRIAL

BOGOTÁ DC

2019

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT PARALELO PLANAR TIPO SCARA CON 2 GDL RRRRR PARA FINES DIDÁCTICOS

BRIAN ALEXIS BERNAL ROMERO

JAIRO ORLANDO GRANDE MURCIA

TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE TECNÓLOGO MECÁNICO

PRESENTADO A:

PROYECTO CURRICULAR DE TECNOLOGÍA EN MECÁNICA INDUSTRIAL

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD TECNOLÓGICA

TECNOLOGÍA EN MECÁNICA INDUSTRIAL

BOGOTÁ DC

2019

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Jurado

_____

MSc. Alexander Alvarado Moreno

Bogotá D.C _____ de 2019

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO 4
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 1
2. ESTADO DEL ARTE 2
2.1 Antecedentes: 3
2.2 Temas Actuales de Investigación 8
2.3 Aplicaciones de los Robots Paralelos 9
2.3.1 Mecanizado: 9
2.3.2 Otras Aplicaciones: 14
2.4 Estudios Académicos de los robots paralelos. 15
3. JUSTIFICACIÓN 18
4. OBJETIVOS 20
4.1 Objetivo general 20
4.2 Objetivos específicos 20
5. MARCO TEÓRICO 21
5.1 Traslación pura 21
5.2 Rotación pura 21
5.3 Eslabones juntas y cadenas cinemáticas 21
5.4 Juntas y Cadenas cinemáticas 21
5.5 Grados de Libertad 22
5.6 Robot SCARA paralelo 22
5.7 Cinemática 23
5.7.1 Cinemática Directa 23
5.8 Esfuerzo debido a flexión 26

5.9 Factor de Diseño 28
5.9.1 Materiales dúctiles 28
5.9.2 Materiales frágiles 29
6. PROCESO DE DISEÑO 29
6.1 IDENTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD 30
6.2 PLANTEAMIENTO DE LA META 30
6.3 ESPECIFICACIONES DE FUNCIONAMIENTO Y RESTRICCIONES 30
6.4 ANTECEDENTES TECNOLÓGICOS 31
6.4.1 CONSIDERACIONES IMPORTANTES 32
6.4.2 SINGULARIDADES TIPO 1 33
6.4.3 SINGULARIDADES TIPO 2 34
6.4.4 ROBOT PARALELO RP-5AH 35
6.4.5 DESARROLLO DE UN ROBOT PARALELO DE 5 BARRAS CON UN GRAN ESPACIO DE TRABAJO (DexTAR) 36
6.4.6 DIFERENCIAS ENTRE RP-5AH Y DexTAR 37
6.4.7 ASSEMBLY MODE 39
6.4.8 WORKING MODE 40
6.4.9 RESÚMENES 41
6.5 INGENIERÍA INVERSA 43
6.6 DISEÑO DETALLADO 45
6.6.1 SELECCIÓN DE DIMENSIONES 45
6.6.2 MODELADO 3D 46
6.6.3 ENSAMBLE DE COMPONENTES 49
6.6.4 SIMULACIÓN 55
6.7 SELECCIÓN Y ESPECIFICACIONES DE ACTUADORES 66

6.8 CÁLCULOS. 69
6.8.1 CAPACIDAD DE CARGA PARA LOS ACTUADORES. 69
6.8.2 RESISTENCIA ESTRUCTURAL 75
6.9 ANÁLISIS CINEMÁTICO 80
6.9.1 PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE LA CINEMÁTICA DIRECTA 83
6.10 PROGRAMACIÓN ARDUINO, SECUENCIAS Y CONEXIONES 88
6.10.1 SECUENCIA DE CONTROL PARA MOTORES UNIPOLARES 88
6.10.2 CONEXIÓN MICROCONTROLADOR ARDUINO, DRIVER Y MOTORES PASO A PASO 88
6.10.3 CÓDIGO ARDUINO 91
6.11 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO 94
7. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO 96
7.1 PRUEBA DE PRECISIÓN 96
7.2 CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE 98
8. CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS 101
8.1 Los manipuladores: 102
8.2 Robots de repetición: 102
8.3 Robots con control de computador: 102
8.4 Robots inteligentes: 102
8.5 Micro-robots 102
9. LISTA DE COSTOS DE LA CONSTRUCCIÓN ROBOT SCARA PARALELO CON 2 GDL. 105
10. APÉNDICES 107
10.1 APÉNDICE A 107
10.2 APÉNDICE B 108

10.3 APÉNDICE C 109
11. CONCLUSIONES 110
12. BIBLIOGRAFÍA 112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1 Plataforma de movimiento espacial presentada por J.E. Gwinnett, 1931..... 3
Figura. 2 Robot paralelo patentado por W.L.V. Pollard 4
Figura. 3 Plataforma Original de Gough 1954 Proc.IMechE, 1965-66..... 4
Figura. 4 Primera configuración de la Plataforma de Stewart. a) Representación, b) Prototipo 5
Figura. 5 Plataforma de Stewart a) 3-3, b) 3-6, c) 6-6 6
Figura. 6 Patente de Klaus Cappel (1967) 6
Figura. 7 Robots con 3 GDL con actuadores giratorios, a) Delta, b) Ojo de aguila, c) Capaman 7
Figura. 8 Robots con 3 GDL con actuadores lineales, a) Orthoglide, b) Tricept, c) 3-UPU 8
Figura. 9 Robot VARIAX 10
Figura 10. PM600 de Okuma..... 11
Figura. 11 PKM Tricept en la industria aeroespacial. a) Fresado, b) Soldadura. (PKM Tricept) 13
Figura. 12. Máquinas herramientas en la industria automotriz, X-700R de Leadwell ... 14
Figura 13. Tipos de cadenas cinemáticas, Abierta: robot serial, Cerrada: robot paralelo 22
Figura. 14 Robot paralelo tipo SCARA DexTAR..... 23
Figura. 15 Esquema robot planar SCARA paralelo 2GDL 24
Figura 16. a) Carga de la viga, b) Diagramas, c) Distribución de esfuerzos en la sección. 27
Figura 17 a) .Esquema del primer diseño de un robot industrial propuesto en 1934. b). Robot SCARA construido por Hiroshi Makino en 1980. c). Esquema de un Robot SCARA de doble brazo Hiroshi Makino 1979. 31
Figura 18. Esquema cinemático de un robot SCARA paralelo de 2 GDL. 32
Figura 19. Singularidades Tipo 1 33
Figura 20. Singularidades Tipo 2 34
Figura 21. RP-5AH industrial robot cortesía de Mitsubishi Electric. 35
Figura 22. Espacio de trabajo del robot RP-5H 35

Figura 23. a). Robot DexTAR desarrollado por el equipo del profesor Ilian Bonev. b). Robot DexTAR desarrollado por la compañia “Mecademic” 36
Figura 24. a). Assembly mode positivo para DexTAR. b). Assembly mode negativo para DexTAR. 39
Figura 25. Working modes del robot DexTAR para el assembly mode positivo. 40
Figura 26. Working modes del robot DexTAR para el assembly mode negativo. 41
Figura 27. Componentes principales del robot DexTAR DexTAR desarrollado por el equipo del profesor Ilian Bonev. 43
Figura 28. a). Acople de servomotores, b). Junta entre eslabón proximal y distal. 43
Figura 29. Vista inferior de los eslabones proximal y distal 44
Figura 30. a) Junta eslabón proximal y distal SCARA construido por ITS. b). Junta entre eslabones distal y efector final del SCARA construido por ITS. 45
Figura 31. Interfaz inicial de Siemens NX 10.0® al comenzar un nuevo modelo 3D. 47
Figura 32. Barra de herramientas del ambiente de modelado 3D. 47
Figura 33. a). Crear croquis. b). Sistema coordenado 48
Figura 34. Croquis herramientas de dibujo 2D. 48
Figura 35. Herramientas de modelado 3D. 48
Figura 36. a). Modelo 3D eslabón proximal. b). Modelo 3D Base soporte de motores.. 49
Figura 37. Barra de herramientas del ambiente de ensamble. 50
Figura 38. Ventana de agregar el componente. 50
Figura 39. Ventana de restricciones de ensamble para componentes fijos. 51
Figura 40. Ventana restricciones de ensamble para el icono "Tocar o alinear". 52
Figura 41. Deducción del centro o eje entre dos componentes 53
Figura 42. Contacto de superficies entre dos componentes. 53
Figura 43. Ensamble del robot SCARA paralelo con 2 GDL 54
Figura 44. Llamada del complemento "Diseñador de conceptos de mecatronica". 56
Figura 45. Barra de herramientas del ambiente de "Diseñador de conceptos de mecatrónica" 56
Figura 46. Menú de la herramienta "Cuerpo". 57
Figura 47. Asignación de características de cuerpo rígido para componentes fijos. 57
Figura 48. Asignación de características de cuerpo rígido para componentes móviles. 58

Figura 49. Menú de herramientas "Junta". 59
Figura 50. "Junta fija" conjunto de cuerpos rígidos inmóviles. 59
Figura 51. "Junta de charnela" cuerpos rígidos móviles. 60
Figura 52. "Junta de charnela" cuerpos rígidos móviles en base y asociación. 61
Figura 53. Eje de rotación para una junta de charnela. 62
Figura 54. Punto de anclaje y ángulo de inicio para una junta de charnela 62
Figura 55. Menú de la herramienta "Colisión". 63
Figura 56. Evitar la colisión entre los eslabones proximal. 63
Figura 57. Menú de la herramienta "Actuadores". 64
Figura 58. Control de posición para los eslabones proximal. 64
Figura 59. Operaciones para generar secuencias de movimiento en juntas móviles. ... 65
Figura 60. Editor de secuencias para juntas móviles. 66
Figura 61. Motor a pasos NEMA 23. 67
Figura 62. Especificaciones técnicas motor NEMA 23 67
Figura 63. Grafica Torque vs Velocidad Motor NEMA 23. 68
Figura 64. Transformación a dos cadenas cinemáticas abiertas. 69
Figura 65. Elemento a analizar para la capacidad de carga del motor. 71
Figura 66. Ruta para encontrar propiedades de un eslabon proximal. 71
Figura 67. Propiedad "masa" para un eslabón proximal. 72
Figura 68. Simplificación de la figura 65. 72
Figura 69. Traslación de fuerzas de la Figura 69. 73
Figura 70. Simplificación y tipo de apoyo en el punto A. 75
Figura 71. Diagrama de cuerpo libre y reacciones en el punto A. 76
Figura 72. a.)Diagrama fuerza cortante, b.)Diagrama momento flector 77
Figura 73. Esquema Ilustrativo para la solución de la cinemática directa de DexTAR "Mecademic" 80
Figura 74. Esquema cinemática directa obtenido mediante el software Geogebra. 81
Figura 75. Espacio de trabajo teórico obtenido mediante el software Geogebra 82
Figura 76. Espacio de trabajo real obtenido mediante el software Geogebra. 82
Figura 77. Rango de valores para los ángulos θ1, θ2. Mediante la herramienta Deslizador 83

Figura 78. Configuración de incremento en ángulos, velocidad, y comportamiento de los ángulos θ1, θ2, creciente o decreciente. 84
Figura 79. Llamar la función Hoja de Cálculo de la barra de herramientas principal. 84
Figura 80. Click derecho sobre los parámetros luego click izquierdo sobre Registro en hoja de cálculo..... 85
Figura 81. Tabla de cálculo con los parámetros ya listos a simular. 85
Figura 82. Click derecho sobre los parámetros a simular, luego click izquierdo en Animación. 86
Figura 83. Registro de datos de los ángulos y posición del efector final (x,y) en su primera configuración. 87
Figura 84. Registro de datos de los ángulos y posición del efector final (x,y) en su segunda configuración. 87
Figura 85. Secuencia normal motores unipolares 88
Figura 86. Descripción de terminales y salidas del control del driver L298N. 89
Figura 87. a.) Funcionamiento 6-12 v b.)Funcionamiento 12-35 V. 90
Figura 88. Conexión microcontrolador Arduino, driver L298N, Motor a pasos unipolar. 91
Figura 89. Definición del retardo y los pin que se usaran en la placa Arduino uno 91
Figura 90. Factor de corrección *dato_rx de entrada en grados, valor basado en las ecuaciones (19), (20), (21) 92
Figura 91. Pasos a la derecha respetando la secuencia correcta de todas las bobinas. 92
Figura 92. Pasos a la derecha respetando la secuencia correcta de todas las bobinas. 93
Figura 93. Void que apaga el motor desde que no se le de uso, evita recalentamientos. 93
Figura 94. Elemento mecanismos que se usaron para la fabricación del robot paralelo. 94
Figura 95. Motor paso a paso NEMA 23. 94
Figura 96. Ajuste y ensamble realizado en el taller de soldadura de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas sede Tecnológica. 95
Figura 97. Robot SCARA paralelo con 2 GDL totalmente construido..... 95

Figura 98. Grafica de precisión..... 96
Figura 99.Grafica de posición con diferentes ángulos de inicio. 97
Figura 100. Grafica de incertidumbre eje X. 100
Figura 101. Grafica de incertidumbre eje Y 101
Figura 102. Propiedades de la áreas, momento de inercia módulo de sección..... 107
Figura 103. Propiedades de resistencia de algunos plásticos. 108
Figura 104. Tolerancias para ejes acoplados a rodamientos. 109
Figura 105. Tolerancias para alojamientos de rodamientos. 109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cuadro comparativo de estructuras paralelas y en serie (Serje Martinez & Pacheco Bolivar, 2017), (Silva, 2005). ET/VM: Relación espacio de trabajo/volumen de la máquina 2
Tabla 2 Características robot VARIAX 9
Tabla 3 Características PM600 de OKUMA 10
Tabla 4 Máquinas herramientas de cinemática paralela desarrolladas hasta la fecha .. 12
Tabla 5. Cuadro comparativo dimensiones de RP-5AH vs DexTAR. 38
Tabla 6. Convenciones tipo de giro a realizar por los motores a pasos. 86
Tabla 7. Datos experimentales de precisión a 0 grados. 96
Tabla 8. Datos experimentales de precisión a 180 grados. 97
Tabla 9. . θ_1=90°,θ_2= (0-180°) tabla de datos posición teórica vs real. 99
Tabla 10. Valor de incertidumbre eje X. 99
Tabla 11. Valor incertidumbre para eje Y. 100
Tabla 12. Clasificación de los robots según la AFRI 103
Tabla 13. Clasificación robots por generaciones 104
Tabla 14. Costos para la realización del robot SCARA paralelo 106

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica, cuenta con un laboratorio especializado en robótica; dicho laboratorio sirve como ambiente de investigación y de aprendizaje para todos los proyectos curriculares que son ofrecidos en la facultad. El problema nace luego de evidenciar que dicho laboratorio no tiene la suficiente cobertura en cuanto a robótica paralela se refiere, puesto que solo se cuenta con robótica de estructura tipo serie; de acuerdo a las necesidades actuales de la industria que requieren procesos de manufactura más precisos y veloces, la robótica paralela representa por sus características, una solución real a estas necesidades ; la Universidad Distrital Francisco José de Caldas debe de empezar sus propias investigaciones en cuanto a la robótica paralela, ya que actualmente la investigación de la universidad en dicha materia es muy poca, la idea principal para poder ofrecer una solución tangible a esta problemática es con el desarrollo de un proceso de diseño y construcción adecuado de un robot paralelo planar tipo SCARA, este mecanismo contará con una configuración de 2 GDL y 5 eslabones; esta configuración es la más simple que existe en el campo de robótica paralela; se escoge esta configuración por motivos didácticos, ya que facilita el estudio de dicho campo.

2. ESTADO DEL ARTE

Robot paralelo se define como “Aquellos robots en los que el extremo final está unido a la base por más de una cadena cinemática independiente”, los robots se clasifican en: robots tipo serie y robots manipuladores paralelos. De hecho existe una extraña dualidad entre ambos tipos de mecanismos, ya que un problema de difícil solución para un tipo de estructura, es fácilmente resoluble para el otro tipo de estructura, y viceversa (Zamanov, 1991), (Waldron, 1991). Se mostrará dicha clasificación con sus debidas características, ventajas y desventajas para cada tipo de estructura en la (Tabla 1).

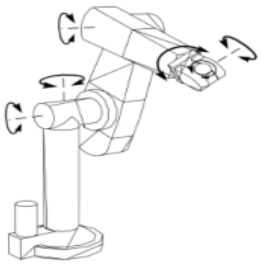
	Tipo Estructura	**Características**	**Ventajas**	**Desventajas**
Robot	Paralela: 	-Base fija y una móvil unida por cadenas cinemáticas cerradas y paralelas.	-Mayor rigidez y precisión. -Relación masa del robot carga a soportar es mucho menor. -Mayores Aceleraciones y velocidades. -Mejor distribución de cargas.	-Espacio de trabajo limitado. -Control complicado - Relación ET/VM: Regular. -Cinemática muy compleja llena de singularidades en las regiones de trabajo.
	Serie: 	-Cadenas cinemáticas abiertas -Antropomórficos	-Mayores espacios de trabajo - Modelos cinemáticos simples. -Control simple -Relación ET/VM: Excelente.	-Rigidez pobre ya que tiene cadenas cinemáticas abiertas a flexión. -Aumento de masas móviles y fuerzas de inercia que aumentan el riesgo de averías.

Tabla 1. Cuadro comparativo de estructuras paralelas y en serie (Serje Martinez & Pacheco Bolivar, 2017), (Silva, 2005). ET/VM: Relación espacio de trabajo/volumen de la máquina[1]

1

2.1 Antecedentes:

- En 1813 Cauchy estudió la rigidez de un octaedro articulado, este fue el primer estudio a estructuras cinemáticas cerradas las cuales conforman un robot paralelo, pero independientemente a esto, el primer robot paralelo del que se tiene registro, es una plataforma en la cual estaban ubicados los asientos de un teatro, para lograr dar una sensación más realista a lo que acontecía en el escenario, sin duda una idea muy visionaria, ya que en el futuro se desarrollaría cines 4D que revive un poco la idea plantada, a pesar de todo esto el mecanismo nunca llegó a construirse. (Zabalza & Ros, 2007)

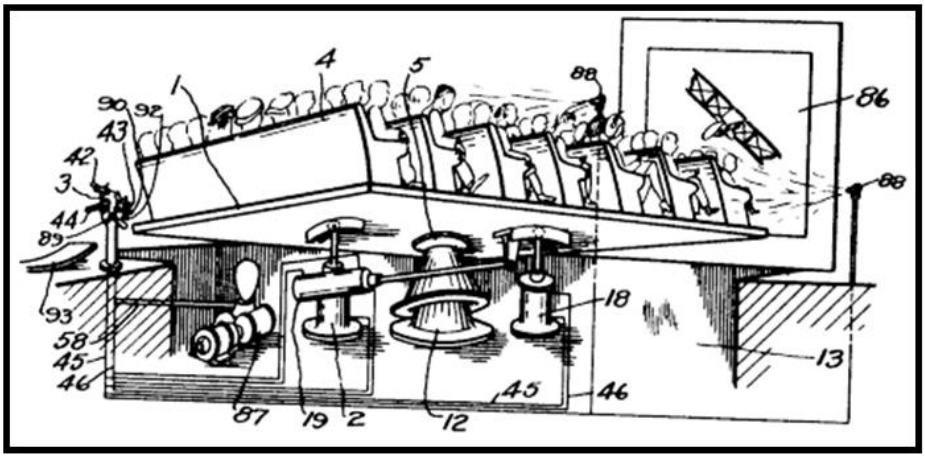


Figura. 1 Plataforma de movimiento espacial presentada por J.E. Gwinnett, 1931[2]

- En 1942 W.L.V Pollar, patentó un robot paralelo (Position-Controlling Apparatus) para pintar automóviles, parece ser que este robot nunca llegó a construirse. (Zabalza & Ros, 2007)

[2] Figura. (1,2,3) tomada de: I.A Bonev, The true origins of parallel robots, [http://www.parallemic.org/Reviews/Review007.html], 2003. (Figura. 1,2,3)

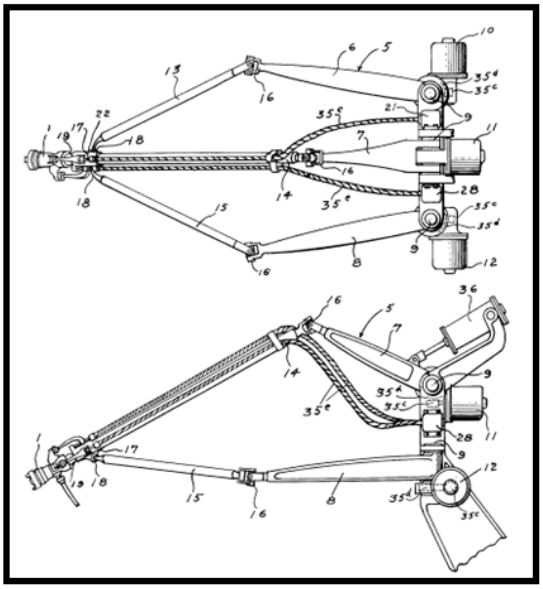


Figura. 2 Robot paralelo patentado por W.L.V. Pollard

- En el año 1947 se desarrolla el hexápodo octaédrico de barras de longuitud variable, creada por el Dr. Eric Gough, creo este robot de 6 GDL, utilizado en la empresa Dunlop para el ensayo de neumáticos de aviación. (Silva, 2005)

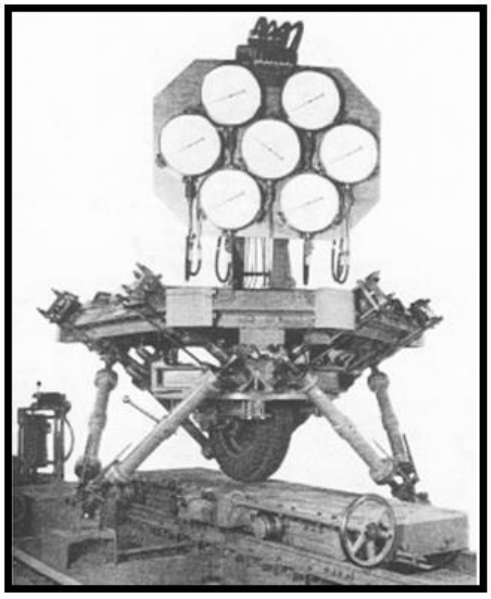


Figura. 3 Plataforma Original de Gough 1954 Proc.IMechE, 1965-66

- A inicios de la década de 1960, y con el auge de la industria aeronáutica, se demandó equipos que pudieran ofrecer entrenamiento adecuado a pilotos de aviones en tierra firme, se estudiaron mecanismos con múltiples grados de libertad que pudiera simular una plataforma muy pesada con grandes cargas dinámicas, y es así como D. Stewart en 1965 presentó una plataforma con 6 GDL para ser utilizada como simulador de vuelo. (Serje Martinez & Pacheco Bolivar, 2017)

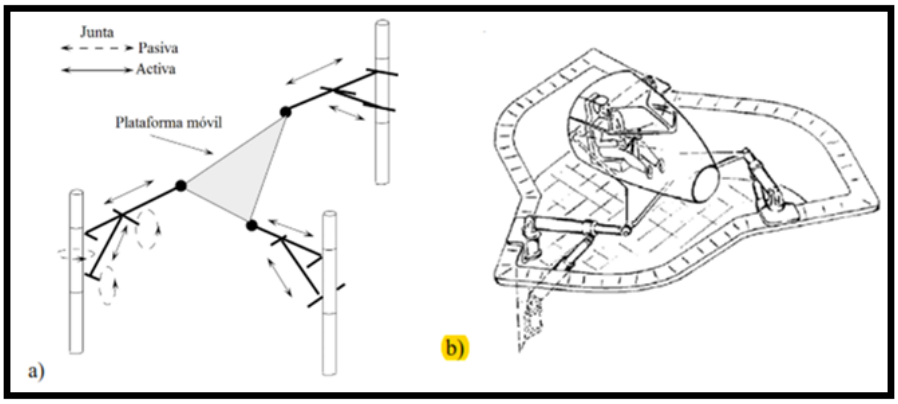


Figura. 4 Primera configuración de la Plataforma de Stewart. a) Representación, b) Prototipo[3]

- Esta primera configuración de la plataforma de Stewart tenía una plataforma triangular unida mediante juntas esféricas a tres actuadores lineales modificables en longitud, y estos actuadores lineales estaban conectados a la base fija mediante juntas universales, a través del tiempo la plataforma de Stewart ha sufrido algunas modificaciones. Una con la base móvil y fija en forma triangular, los actuadores coincidiendo dos a dos en cada vértice de cada base triangular, se denota como: 3-3 (Figura 5a), la otra configuración con una plataforma móvil triangular y los actuadores de igual modo coincidiendo dos a dos en cada vértice pero con 6 puntos distintos contenidos en una base en forma hexagonal, ésta se denota como: 3-6 (Figura 5b), pronto se descubrió que la coincidencia de las juntas esféricas restringía en demasía la movilidad de la plataforma móvil,

[3] Figura. 4 tomada de: (Serje Martinez & Pacheco Bolivar, 2017)

evolucionó una configuración con plataformas con forma hexagonal ambas irregulares se denota como: 6-6 (Figura 5c). (Silva, 2005)

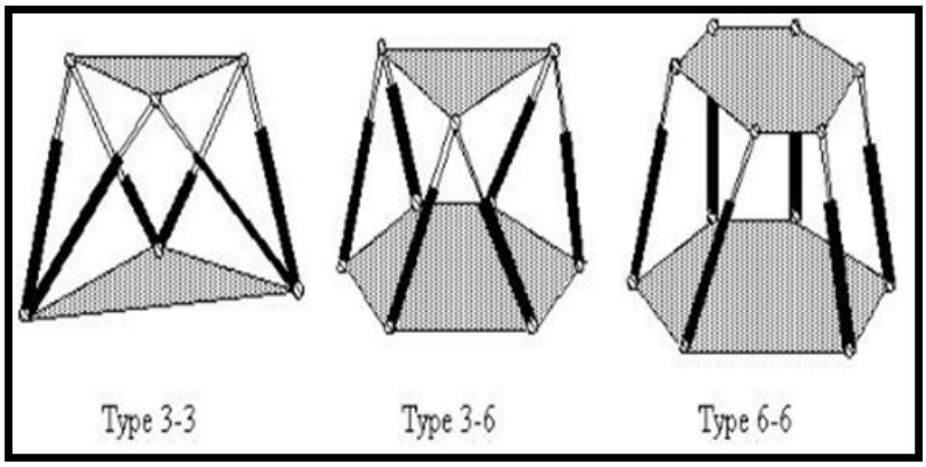


Figura. 5 Plataforma de Stewart a) 3-3, b) 3-6, c) 6-6[4]

- En 1967 K.L Cappel, Propuso un Hexápodo basado en la plataforma de Gough para ser utilizado como simulador de movimiento, lo propuso en 1962 y obtuvo la patente en 1967, Cappel también desarrolló algunos robots paralelos para ensayos de vibración; por ello conjunto a Gough y Stewart es considerado como uno de los pioneros de la robótica paralela.

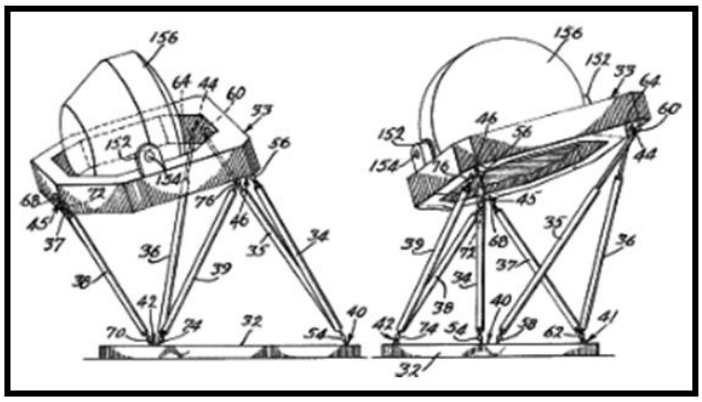


Figura. 6 Patente de Klaus Cappel (1967)[5]

[4] Figura. 5 tomada de : (Silva, 2005) página 47

En esta década de 1960 se consideraron aplicaciones variadas: rociadores de pintura y en la industria de las máquinas-herramientas, pero se rechazaron estas propuestas para trabajar con robots en serie ya que no se contaba con sistemas de control avanzado para trabajar con robots paralelos. (Serje Martinez & Pacheco Bolivar, 2017).

- Más adelante se retomó el interés por los robots paralelos de forma exponencial en el año 1985, se desarrollaron modelos populares con 3 GDL accionados por medio de actuadores giratorios, como el modelo Delta, propuesto por R. Clavel (Figura 7a), El ojo de Águila propuesto por C. Gosselin (Figura 7b), y el Capaman por M. Ceccarelli (Figura 7C). (Zabalza & Ros, 2007)

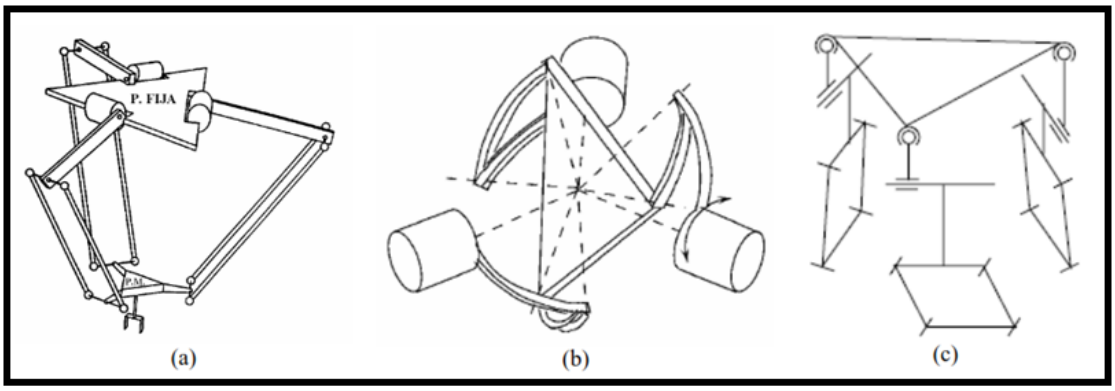


Figura. 7 Robots con 3 GDL con actuadores giratorios, a) Delta, b) Ojo de aguila, c) Capaman[6]

- Manipuladores espaciales con 3 GDL accionados por medio de actuadores lineales, muy similares al delta pero con actuadores lineales. El Orthoglide por P. Wenger y D. Chablat (Ilustración 8a), El Tricept por K.E Neumann (Ilustración 8b), y el 3-UPU por L.W. Tsai (Ilustración 8c). (Zabalza & Ros, 2007)

[5] Figura. 6 tomada de: I.A Bonev, The true origins of parallel robots, [http://www.parallemic.org/Reviews/Review007.html], 2003.
[6] Figura. (7,8) Tomadas de: (Zabalza & Ros, 2007)

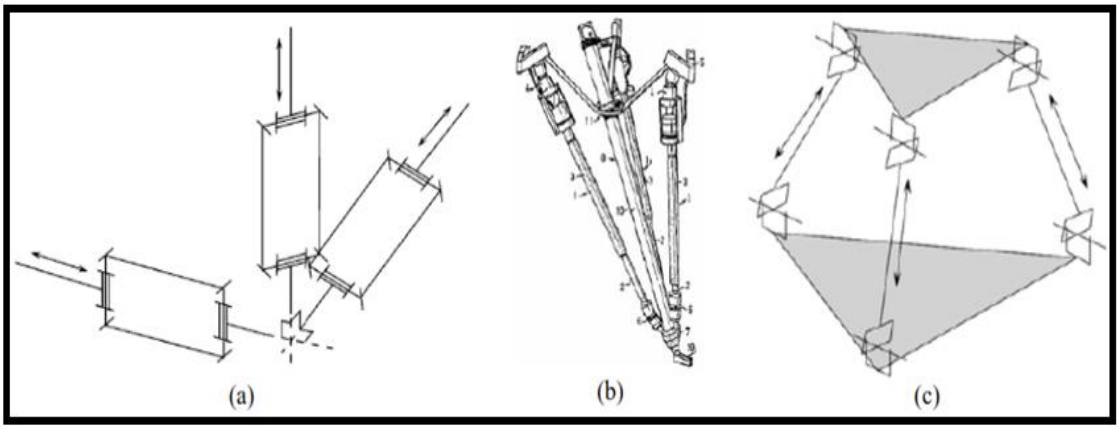


Figura. 8 Robots con 3 GDL con actuadores lineales, a) Orthoglide, b) Tricept, c) 3-UPU

2.2 Temas Actuales de Investigación

En los temas estudiados por los diferentes investigadores como R. Benea, Raymon Clavel, Jean Pierre Merlet, Richard Eugene Stamper, respecto a los manipuladores paralelos, tenemos temas y líneas de investigación que siguen abiertos en la actualidad. (Villate Gaona, 2015)

- Cinemática directa de posición
- Cinemática inversa de posición
- Configuraciones Singulares.
- Espacio de trabajo.
- Análisis cinemático de velocidades y aceleraciones.
- Cálculo estático
- Cálculo dinámico.

2.3 Aplicaciones de los Robots Paralelos

A medida que pasa el tiempo los robots con cinemática paralela han despertado cada vez más el interés por aprovechar todas sus ventajas expuestas en la (Tabla 1), las cuales han permitido ser usados en aplicaciones como: mecanizado, ensamble, simuladores, medicina y otros campos aún más específicos.

2.3.1 Mecanizado:

Las primeras máquinas herramientas de estructura paralela emplearon la plataforma propuesta por Gough, ejemplos como Variax, Okuma, Hexaglide y Eclipse; Operaban con 6 GDL, contaban con gran rigidez y gran capacidad dinámica, pero tenía una destreza muy limitada en cuanto al maquinado, espacio de trabajo muy limitado y muy costoso en componentes y control.

- **Variax Hexacente centro de mecanizado**: Apareció en Europa en 1988, diseñado y construido por Gidding and Lewis (Wisconsin, EE.UU.), primera máquina herramienta de estructura paralela, permite maniobrar con interpolaciones de 5 ejes, no se han vendido muchas unidades al mercado a pesar de que se lograron excelente resultados en cuanto a precisión y rigidez. (Villate Gaona, 2015)

Espacio de Trabajo	630x630x630 +/- 25°
Exactitud	11µm
Velocidad de avance máxima	66 m/min
Aceleración máxima	1g
Husillo principal	40 KW hasta 24000 rev/min

Tabla 2 Características robot VARIAX[7]

[7] Tabla (2,3) tomada de: (Villate Gaona, 2015)



***Figura. 9 Robot VARIAX*[8]**

- **PM600 de OKUMA:** Este centro de mecanizado se desarrolló para lograr una alta productividad y eficiencia de piezas mecanizadas en aluminio, moldes y troqueles, donde normalmente se realizan mecanizados muy complejos que requieren un mecanizado de 5 ejes.

Aplicación	Mecanizado de 5 ejes, Fresado
Arquitectura	Mecanismo prismático, paralelo
Área de trabajo	420x420x400 mm
Aceleración máxima	1.5g
Velocidad de avance máxima	100 m/min
Husillo	12000/30000 rpm
Ángulo de inclinación	*/- 30°

Tabla 3 Características PM600 de OKUMA

[8] Figura. (9,10) tomada de: (Villate Gaona, 2015)



Figura 10. PM600 de Okuma

Con el crecimiento de investigación y desarrollo en cuanto a sistemas de control para estructuras paralelas, se ha fomentado la intención de mecanizar piezas con alta calidad y precisión, y para ello se debía desarrollar máquinas con altas capacidades dinámicas, entre todas las aplicaciones de robot paralelos la que más impacto económico tiene es el campo de las máquinas herramientas, empresas como **Ingersoll, Giddings y Lewis, Hitachi, Seiki** han hecho estudios y fabricado este tipo de máquinas que en su mayoría son centros de mecanizado de 3 y 5 ejes, en la (Tabla 4) se muestra en resumen las maquinas herramientas con estructura paralela construidas y desarrolladas a la fecha.

EUROPA		
Empresa	**Ejes**	**Aplicación**
Demaurex/Delta	3	Manipulador
PKMtricept SL	5	Maquinado, ensamble
Geodetics	6	Maquinado
Carl Zeiss Jena	6	Posicionamiento
Physik, Instrumente	6	Posicionamiento
CMW	6	Maquinado
Lapic Company	6	Medición de coordenadas
Fooke (Triomax)	3	Corte agua/láser
Urane SX (Renault)	3	Taladrado de alta velocidad
Simparalell (Simplex)	5	Maquinado
Starrag Group (Ecospeed 20210)	5	Maquinado
Icon Industries (Tripod 700S)	5	Maquinado
Teknodrom (XT 1100S)	5	Maquinado
Universidad-empresa		
WZL Aachen – Ingersoll	6	Maquinado
FhG Chemnitz – Mikromat	5	Maquinado
IfW Stuttgart – INA (Hexact)	5	Maquinado
ETH Zurich – Mikron (Triaglide)	3	Maquinado
Universidades		
ISW Stuttgart (Linapod)	3	Maquinado
IWF – Hannover	3	Maquinado láser
ETH Zurich (Hexaglide)	6	Maquinado
ITIA – CNR (Acrobat)	6	Maquinado

ESTADOS UNIDOS		
Empresa		
Tornado 2000 (Hexel)	6	Maquinado
Rotapod (Hexel)	6	Maquinado
Variax (Giddings and Lewis)	6	Maquinado
ASIA		
Universidad-empresa		
Eclipse – Universidad de Seul	6	Maquinado
Leadwell (X-700R)	6	Maquinado
Okuma	6	Maquinado
HexaM	6	Maquinado
Honda Engineering	3	Maquinado
Fanuc Robotics (F-200i)	6	Soldadura

Tabla 4 Máquinas herramientas de cinemática paralela desarrolladas hasta la fecha[9]

Estudios realizados por Geldar, Patel, Pandilov, Son, Tlusty entre otros, analizaban y almacenaban información acerca de la evolución de los robots paralelos al mismo tiempo que comparaban su desempeño frente a sus competidoras de estructura en serie, entre sus hallazgos se pudieron evidenciar robots con estructura híbrida (serial-paralela), estas estructuras se benefician de las ventajas de ambas configuraciones y mitigan las deficiencias de ambas configuraciones; estudios realizados por Son, dice que las estructuras híbridas pueden ganar mucho espacio de trabajo sin comprometer mucho la rigidez y precisión del robot. (Serje Martinez & Pacheco Bolivar, 2017)

[9] Tabla 4 tomada de: (Serje Martinez & Pacheco Bolivar, 2017)

- **Tricept (Híbrido):** Robot desarrollado por Neos Robotics bajo la patente de Neumann, donde se alcanzan 3GDL en su configuración paralela y adicionalmente contiene una muñeca de configuración en serie que aporta más grados de libertad con el fin de aumentar la destreza de la máquina. Este tipo de máquinas han sido del interés de compañías como **Boeing y Airbus**, que se especializan en la industria aeroespacial, industria que requiere el maquinado de elementos muy complejos ya que mucho de ellos requieren un 80% de remoción del material de la totalidad del mismo, con centros de maquinado de 5 ejes o más (Serje Martinez & Pacheco Bolivar, 2017).

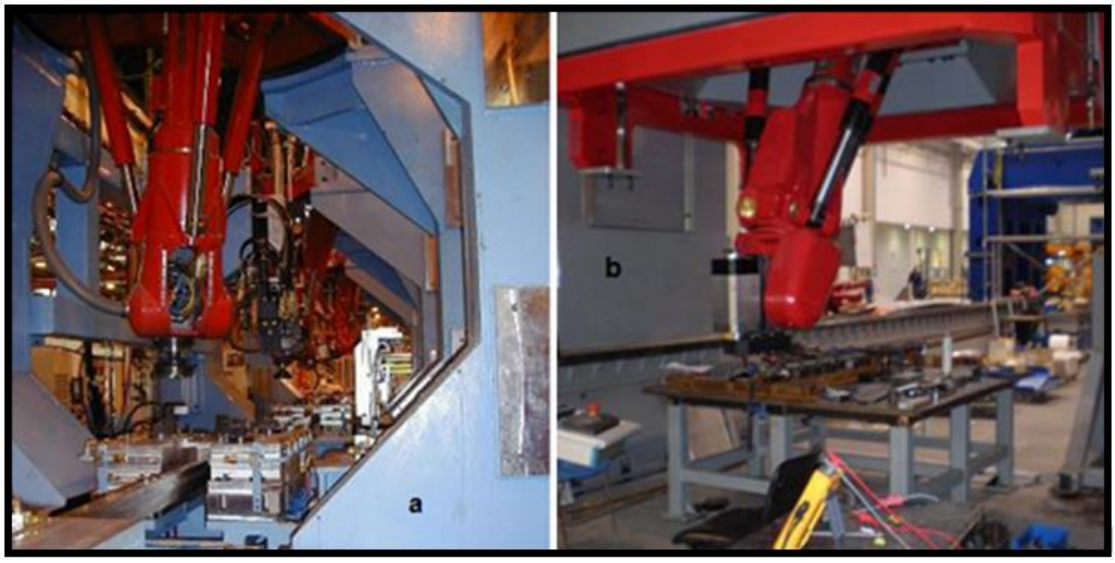


Figura. 11 PKM Tricept en la industria aeroespacial. a) Fresado, b) Soldadura[10]. (PKM Tricept)

Los robots paralelos también tienen presencia en el sector automotriz que requiere equipos muy flexibles en cuanto a manufactura donde se busque un equilibrio en desempeño y costos operacionales, las estructuras paralelas juegan un papel importante en maquinados muy complicados como el mecanizados de camisas para bloques de motores de automotores, las empresas interesadas en esta tecnología son **Volswagen, Audi, Leadwell y Renault.**

[10] Figura. 11. tomada de (PKM Tricept), http://www.pkmtricept.com/aplicaciones/

Los robots paralelos también tiene aplicaciones interesantes en el campo del micro maquinado y la impresiones 3D.



Figura. 12. Máquinas herramientas en la industria automotriz, X-700R de Leadwell[11]

2.3.2 Otras Aplicaciones:

- Simuladores de vuelo con estructuras Stewart-Gough.
- Dispositivos médicos y tele operación, robots paralelos planares con fines terapéuticos.
- Posicionador de telescopio, panel solar, satélites y antenas.
- Manipuladores de ensamble y soldadura, dentro de esta aplicación destaca principalmente el robot paralelo tipo DELTA.

[11] Figura. 12 tomada de http://www.exechonworld.com/videolist.htm

2.4 Estudios Académicos de los robots paralelos.

En la (Tabla 4) se listan los robots paralelos que se han construido hasta la fecha, en materia del mecanizado, algunos de ellos desarrollados por empresas y algunos otros por equipos conformados por empresas y universidades. Como información complementaria se citará a continuación algunos trabajos académicos que se han realizado en torno del mundo de la robótica paralela.

- **Control visual de robots paralelos. Análisis, desarrollo y aplicación a la plataforma robotenis.**

  Autor, Luis Ángel Silva, Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, España, año 2005. El documento nos expone que, la mayoría de los robots usados a nivel industrial; son usados en un espacio de trabajo adecuado a los robots, esto quiere decir que son entornos estructurados con presencia de objetos cuya posición y orientación es perfectamente conocida, el problema surge cuando el entorno no es estructurado y es dinámico, no estático; el autor tiene como objetivo diseñar y construir una plataforma innovadora basada en un robot paralelo, que utilice la información suministrada por un sistema de visión, para modelar el entorno y lograr el control de las trayectorias del sistema robótico, en entornos dinámicos; procesando la información a grandísimas velocidades.

- **Diseño de una plataforma robótica paralela de 6 DOF para asistente quirúrgico en cirugías de reconstrucción cráneo-facial.**

  Autor, Daniel Andrés Ramírez Rodríguez, Tesis maestría en ingeniería de automatización industrial, Universidad Nacional de Colombia, año 2010. El documento muestra detalladamente el proceso de diseño mecánico y sistema de sujeción de la plataforma; de acuerdo a las especificaciones de diseño. Esta tesis parte de una necesidad identificada; que no había sido solucionada en

nuestro país, ya que todas las cirugías de reconstrucción cráneo-facial debían hacerse manualmente; dejando así el resultado final en manos de la habilidad del cirujano; el autor explota el nivel de precisión y todas las características ventajosas que tienen los robots paralelos, para darle solución a esta problemática.

- **Diseño y construcción de prototipo para mecanizado multiejes en materiales blandos utilizando arquitectura Stewart-Gough.**

Autor, Francisco Javier Villate Gaona, Tesis master en ingeniería automatización industrial, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, año 2015. El documento muestra el paso a paso el diseño de una plataforma paralela de 5 DOF, para el mecanizado multiejes de materiales blandos. Es un robot paralelo diseñado y fabricado en su totalidad en el laboratorio de mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia; laboratorio en el cual reside actualmente la plataforma, este trabajo tiene un impacto teórico, ya que hace un aporte al estudio para centros de mecanizado de 5 DOF con estructura paralela, a las técnicas de control, y a la simulación del mismo en un ambiente virtual; pero también tiene un impacto práctico, gracias a la minimización del ruido generado; la reducción de las vibraciones; la reducción del coste energético; entre otras, que propician el ambiente adecuado para que estas estructuras sean utilizadas en demasía en líneas de producción.

- **Diseño y simulación de un controlador de posición basado en modos deslizantes para un robot tipo SCARA paralelo.**

Autor, Christian Gustavo Morales Muñoz, Tesis de ingeniería electrónica y control, Escuela Politécnica Nacional, Quito Ecuador, año 2017. El documento tiene como objeto el desarrollo de un controlador basado en modos deslizantes para un robot tipo SCARA paralelo; el cual se encarga de controlar la posición

del efector final, el diseño del controlador se basa del modelo cinemático del robot, a partir de su configuración geométrica. Todo esto se logra con la ayuda de algunas aplicaciones como: Simulink el cual puede supervisar el comportamiento de cada controlador; Autodesk Invetor para modelar los eslabones en 3d, y el software Unity 3D, el cual simula un ambiente industrial para poder observar el comportamiento del robot en este ambiente, para evitar que el robot en la vida real caiga en configuraciones de agarrotamiento y singularidad en un espacio de trabajo real.

3. JUSTIFICACIÓN

El mundo moderno, en el cual habitamos, la industria día tras día tiene exigencias productivas cada vez más grandes; encaminando al sector productivo a procesos automatizados, para ello la industria se ve beneficiada por el uso de todo tipo de robots. El presente documento hace énfasis en los estudios realizados en materia de robótica paralela, puesto que la robótica con estructuras paralelas aportan ventajas muy interesantes; gracias a sus características inherentes, esta materia de estudio es relativamente nueva, y tiene mucho campo de investigación por sondear, y aún por descubrir, dado que el uso industrial de los robots paralelos aún es limitado, gracias a que todavía no igualan la destreza mecánica; la relación, espacio de trabajo versus masa volumen, de los robots con estructura tipo serie; por ello es importante, el estudio e investigación académica de los robots paralelos, en todas las instituciones universitarias del país y del mundo.

Con la importancia ya expuesta del uso de los robots paralelos a nivel industrial, es importante que la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica, empiece a absorber y a generar todo conocimiento concerniente a la robótica paralela, de esa manera el presente proyecto, busca ampliar la cobertura del laboratorio de robótica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica, con el diseño y construcción de un robot paralelo planar tipo SCARA; robot basado en un robot comercial desarrollado por la compañía “Mecademic” llamado DexTAR. La idea principal, para su construcción es reutilizar elementos electrónicos usados anteriormente en ensambles de máquinas fotocopiadoras; ensambles que han sido dados de baja por el cambio de máquinas fotocopiadoras más modernas. Adicionalmente para tal fin, se empleará tecnologías de fácil acceso; usando Arduino para el control de los actuadores.

ya que actualmente el laboratorio sólo cuenta con robótica de tipo serie, la implementación aditiva de robótica paralela; aumentará el interés y desarrollo de la robótica paralela en la Facultad por parte de la comunidad universitaria; ya que esta comunidad distribuida por diferentes proyectos curriculares; todos afines a la automatización y a la robótica, pueden hacer uso del robot SCARA paralelo de 2 GDL (Configuración más simple y didáctica), para implementar infinidad de aplicaciones útiles en el campo de la tecnología, con la visión, de que el estudiantado de la Universidad, desarrolle a futuro soluciones prácticas en el campo de la robótica paralela, y por qué no, soluciones con robótica híbrida (Estructura tipo serie + Estructura tipo paralela); soluciones que se usan para resaltar las ventajas de ambas configuraciones en una aplicación industrial.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Diseño y construcción de un robot didáctico de estructura paralela bidimensional tipo SCARA de 2 GDL (Grados de libertad); basado en el robot comercial DexTAR desarrollado por la compañía “Mecademic”, con artefactos electrónicos reciclados, y tecnologías de fácil acceso, con el fin de ampliar la cobertura en el laboratorio de robótica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica.

4.2 Objetivos específicos

- Definir las dimensiones adecuadas del robot SCARA paralelo a diseñar, de acuerdo a las restricciones de diseño.
- Modelar todas las piezas que constituyen el robot SCARA paralelo y simular el funcionamiento del robot como conjunto usando el software Siemens NX 10.0®
- Interpretar el análisis de la posición vs giro (Cinemática Directa), con la obtención de una matriz de puntos en el espacio.
- Reconocer y delimitar el espacio de trabajo del robot SCARA paralelo; con base a los resultados obtenidos de la cinemática directa.
- Realizar la programación en la tarjeta de control Arduino.
- Seleccionar adecuadamente los actuadores, teniendo en cuenta las posibles aplicaciones que se puedan desarrollar a futuro en el laboratorio de robótica.
- Construir el robot SCARA paralelo, y la base donde funcionará el mismo.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 Traslación pura

Es el movimiento más normal y simple que puede realizar cualquier cuerpo rígido en todos sus puntos describen trayectorias paralelas (curvas o rectas). Una línea de referencia trazada en el cuerpo cambia su posición lineal pero no su orientación angular. (Norton, 2000)

5.2 Rotación pura

El cuerpo tiene un punto (centro de rotación), el cual no tiene movimiento dependiente al marco de referencia que permanece fijo, los demás puntos del cuerpo describen arcos respecto a este centro de rotación. Una línea de referencia trazada en el cuerpo, y que pasa por su centro, cambia únicamente su orientación angular. (Norton, 2000)

5.3 Eslabones juntas y cadenas cinemáticas

En la búsqueda de la cinemática de mecanismo y de la cinemática en el campo de la robótica siempre se debe de iniciar con un estudio y una investigación del tema de (Diseño de eslabonamientos), los eslabones son los elementos básicos de todo mecanismo. (Norton, 2000)

5.4 Juntas y Cadenas cinemáticas

Las juntas se definen como la conexión entre dos o más eslabones, y las cadenas cinemáticas son arreglos de eslabones y juntas que se comunican con el fin de producir un movimiento controlado en respuesta de un movimiento suministrado, componentes de una cadena cinemática:

- **Manivela:** Eslabón que realiza una revolución completa y se encuentra pivoteada a la bancada.
- **Balancín:** Eslabón que tiene una rotación oscilatoria y que también se encuentra pivoteado a la bancada.
- **Biela:** Eslabón que tiene movimiento complejo, es decir realiza simultáneamente un movimiento de rotación y traslación, y no esta pivoteado a la bancada.
- **Bancada:** Eslabón o grupos de eslabones que se encuentra fijos anclados, con respecto a algún marco de referencia.

5.5 Grados de Libertad

Se define como el número de entradas que se necesita para proporcionar con la finalidad de crear una salida predecible, es decir un movimiento de salida controlado. En la determinación de grados de libertad se pueden clasificar los dos tipos de cadenas cinemáticas existentes (cadena cinemática abierta y cerrada), las cadenas cinemáticas cerradas pueden tener uno o más grados de libertad mientras que una cadena cinemática abierta siempre tendrá más de un grado de libertad. (Norton, 2000)

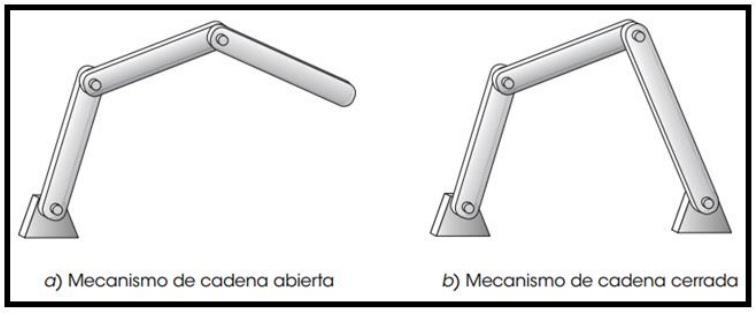


Figura 13. Tipos de cadenas cinemáticas, Abierta: robot serial, Cerrada: robot paralelo[12]

5.6 Robot SCARA paralelo

Compuesto por 5 eslabones unidos entre sí para forma una cadena cinemática cerrada, usados normalmente en aplicaciones de pick and place, el SCARA paralelo nace de la unión de dos robots SCARA tipo serie; la unión de estos dos forman una cadena

[12] Figura 13. Tomada de: (Norton, 2000)

cinemática cerrada, actualmente existe un robot comercial desarrollado por la compañía “Mecademic” llamado DexTAR. (Morales Muñoz, 2017)



Figura. 14 Robot paralelo tipo SCARA DexTAR[13]

5.7 Cinemática

En el campo de la robótica, la cinemática se encarga del estudio de los movimientos de los robots, en el estudio cinemático no se toman en cuenta las fuerzas y momentos que generan estos movimientos, el modelo cinemático de un robot paralelo, determina las relaciones que coexisten entre las posiciones, velocidades y aceleraciones de las articulaciones, motores y efector final.

5.7.1 Cinemática Directa

La cinemática directa se encarga de determinar la orientación y/o posición del efector final en base de los valores numéricos de los ángulos articulares y la geometría de los eslabones que componen el mecanismo, en resumen, conociendo las variables

[13] Figura. 14. tomada de http://www.simplebotics.com/2014/06/this-is-dextar-the-educational-parallel-robot-system.html

articulares que tiene el robot en cierto instante de tiempo, se puede determinar la posición que tiene el efector final en ese instante de tiempo.

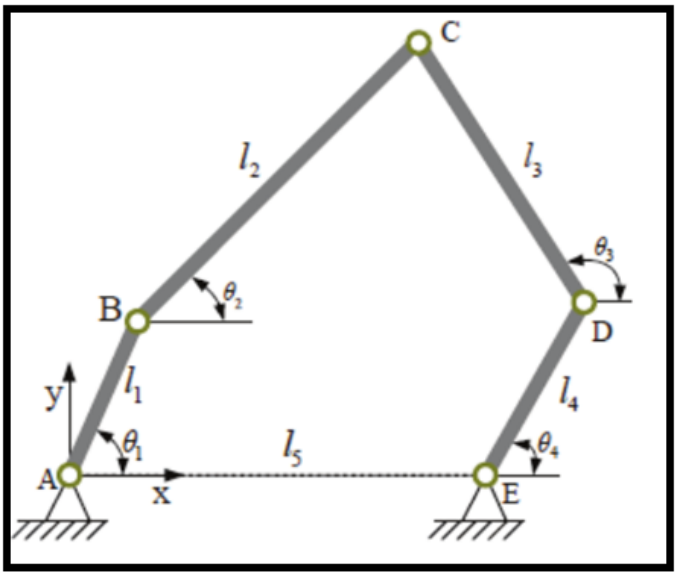


Figura. 15 Esquema robot planar SCARA paralelo 2GDL[14]

La ilustración 14 muestra el esquema de un robot SCARA paralelo de 2 GDL, donde:

$l_1, l_2, l_3, l_4\ y\ l_5$ Representan las longitudes de los eslabones.

$\overrightarrow{AB}, \overrightarrow{BC}, \overrightarrow{CD}, \overrightarrow{DE}\ y\ \overrightarrow{EA}$ Respectivamente a las longitudes

$\theta_1, \theta_2, \theta_3\ y\ \theta_4$ Son los ángulos de rotación de cada articulación con respecto al eje x, el origen de coordenadas se encuentra en el punto A y el efector final en el punto C.

La meta es encontrar la posición del punto C con respecto a A, el análisis cinemático se puede considerar como si tuviéramos dos cadenas cinemáticas abiertas y seriales que conforman una cerrada, $\overrightarrow{ABC}\ y\ \overrightarrow{AEDC}$, se tendrían dos caminos distintos para encontrar la posición de C.

Pero antes de encontrar la posición de C, debemos de encontrar las proyecciones de todos los 5 eslabones tanto en el eje X y el eje Y.

[14] Figura. 15. tomada de : (Morales Muñoz, 2017)

$$\overrightarrow{AB} \rightarrow \overrightarrow{AB_x} = l_1(\cos\theta_1) \;\; y \;\; \overrightarrow{AB_y} = l_1(\sin\theta_1) \quad (1)$$

$$\overrightarrow{BC} \rightarrow \overrightarrow{BC_x} = l_2(\cos\theta_2) \text{ y } \overrightarrow{BC_y} = l_2(\sin\theta_2) \quad (2)$$

$$\overrightarrow{CD} \rightarrow \overrightarrow{CD_x} = l_3(\cos\theta_3) \;\; y \;\; \overrightarrow{CD_y} = l_3(\sin\theta_3) \quad (3)$$

$$\overrightarrow{DE} \rightarrow \overrightarrow{DE_x} = l_4(\cos\theta_4) \;\; y \;\; \overrightarrow{DE_y} = l_4(\sin\theta_4) \quad (4)$$

$$\overrightarrow{EA} \rightarrow \overrightarrow{EA_x} = l_5 \quad (5)$$

El eslabón $\overrightarrow{EA}$ solo tiene proyección en el eje X, para cada cadena cinematica serial la suma de estas proyecciones nos entrega, la posición en X y en Y del efector final, de esta manera las ecuaciones cinemáticas del robot paralelo quedan definidas así:

- **Cadena cinemática $\overrightarrow{ABC}$:**

$$X = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_2) \quad (6)$$

$$Y = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_2) \quad (7)$$

- **Cadena cinemática $\overrightarrow{AEDC}$**:

$$X = l_4 \cos(\theta_4) + l_3 \cos(\theta_3) + l_5 \quad (8)$$

$$Y = l_4 \sin(\theta_4) + l_3 \sin(\theta_3) \quad (9)$$

5.8 Esfuerzo debido a flexión

Una viga es un elemento que soporta cargas transversales a su eje. Estas cargas producen momentos de flexión en la viga, las cuales a su vez causan el desarrollo de esfuerzos de flexión. Los esfuerzos de flexión son esfuerzos normales, esto es, son de tensión o de compresión. El esfuerzo cortante máximo en una sección transversal de una viga está en la parte más alejada del eje neutro de la sección. En ese punto, la fórmula de la de la flexión muestra como resultado el esfuerzo (Robert L. Mott, 2006):

$$\sigma = \frac{Mc}{I}$$

Dónde:

M = Magnitud del momento de flexión en esa sección

I = Momento de inercia del área transversal con respecto al eje neutro

c = Distancia del eje neutro a la fibra más alejada, en la sección transversal de la viga

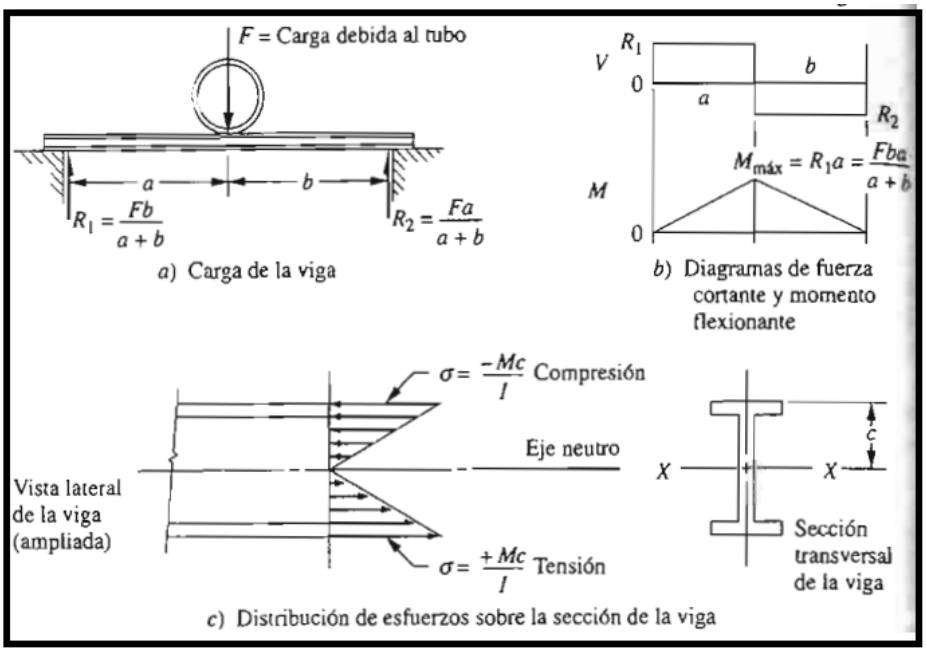


Figura 16. a) Carga de la viga, b) Diagramas, c) Distribución de esfuerzos en la sección[15].

$$S = \frac{I}{c}$$

La relación *I/c* depende sólo de la geometría del área transversal de la viga, y por lo tanto *S* también es una propiedad dependiente únicamente de la geometría de la sección, entonces la fórmula de la flexión se transforma en:

$$\sigma = \frac{M}{S}$$

Comúnmente se acostumbra a definir un esfuerzo de diseño σ cualquiera, y si se conoce el momento de flexión máximo se despeja *S*, y a partir de ele se pueden determinar rápidamente las dimensiones necesarias de la viga.

En el libro (Robert L. Mott, 2006) al final en sus anexos apéndice 1 se muestran las propiedades de las áreas y entre ellas la forma de encontrar *S* para distintas secciones transversales.

[15] Figura 16. Tomada de: (Robert L. Mott, 2006) página 106.

5.9 Factor de Diseño

El término factor de diseño, **N,** es una medida de la seguridad relativa de un componente bajo la acción de una carga. En la mayor parte de los casos, la resistencia del material con que se fabricará el componente se divide entre el factor de diseño para determinar un esfuerzo de diseño δ_d, que a veces se llama esfuerzo admisible o permisible. Entonces, el esfuerzo real que se desarrolla en el componente debe de ser menor que el esfuerzo de diseño. (Robert L. Mott, 2006).

El diseñador debe de determinar cuál será el valor razonable de **N** para su diseño. Con frecuencia, el valor de factor de diseño o del esfuerzo de diseño está definido por códigos establecidos por organizaciones de normalización, como la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos (American Society of Mechanical Enginners), y muchas otras organizaciones y asociaciones. Algunas empresas también han adoptado sus propias políticas para especificar factores de diseño basados en su experiencia como empresa en proyectos similares.

En el Libro (Robert L. Mott, 2006) se emplean los siguientes alineamientos para la determinación del valor **N** dependiendo de las propiedades del material:

5.9.1 Materiales dúctiles

- **N = 1.25 a 2.0.** El diseño de estructuras bajo carga estáticas, para las que haya un alto grado de confianza en todos los datos de diseño.
- **N = 2.0 a 2.5.** Diseño de elementos de máquina bajo cargas dinámicas con una confianza promedio en todos los datos de diseño.
- **N = 2.5 a 4.0.** Diseño de estructuras estáticas o elementos de máquina bajo cargas dinámica con incertidumbre acerca de las cargas, propiedades de los materiales, análisis de esfuerzos o el ambiente.
- **N = 4.0 o más.** Diseño de estructuras estáticas o elementos de máquinas bajo cargas dinámicas, con incertidumbre en cuanto a alguna combinación de cargas, propiedades del material, análisis de esfuerzos o el ambiente. El deseo de dar

una seguridad adicional a componentes críticos puede justificar también el empleo de estos valores.

5.9.2 Materiales frágiles

- **N = 3.0 a 4.0.** Diseño de estructuras bajo cargas estáticas donde haya un alto grado de confianza en todos los datos de diseño.
- **N = 4.0 a 8.0.** Diseño de estructuras estáticas o elementos de máquinas bajo cargas dinámicas, con incertidumbre acerca de cargas, propiedades de materiales, análisis de esfuerzos o el ambiente.

6. PROCESO DE DISEÑO

Para la construcción del robot SCARA paralelo planar con 2 GDL (GDL: Grados de libertad) RRRRR (R hace referencia al tipo de junta revoluta R, es decir que el robot a construir usará 5 juntas de tipo revoluta en cada conexión de sus eslabonamientos), se utiliza una serie de pasos muy comunes al momento de diseñar un mecanismo o maquina en concreto. El presente documento toma como referencia el libro (Diseño de maquinaria de Robert L. Norton; segunda edición; página 8) donde se aprovechan muchos de estos conceptos para el proceso de diseño y se añaden algunas modificaciones en relación al mecanismo a diseñar.

6.1 IDENTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD

Actualmente en el campo de la mecatrónica y de la automatización se viene prestando especial interés en el estudio, investigación e innovación en relación con la robótica paralela, de esta manera se busca impulsar la idea de masificar cada vez más dicha robótica para fines industriales. La Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad tecnológica, cuenta con un laboratorio especializado en robótica el cual dispone de robótica de estructura tipo serie pero no dispone de robótica de estructura paralela.

6.2 PLANTEAMIENTO DE LA META

En suma de reconocer todo el interés que produce la robótica paralela, este proyecto tiene como meta proporcionar un prototipo básico de estructura paralela con fines didácticos al laboratorio de robótica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica con el fin de incentivar en la comunidad universitaria la investigación e innovación en dicho campo haciendo eficiente uso de la interdisciplinaridad.

6.3 ESPECIFICACIONES DE FUNCIONAMIENTO Y RESTRICCIONES

- El robot paralelo planar tipo SCARA con 2 GDL debe de ocupar como máximo un área máxima del 35% correspondiente a un área base de un 1 m^2
- El robot paralelo plana tipo SCARA con 2 GDL tiene que ser construido con artefactos electrónicos reciclados; ejemplo (actuadores, controladores, fuente de alimentación).
- El robot paralelo tipo SCARA con 2 GDL debe de ser un prototipo con fines didácticos, por ende requiere de procesos de fabricación no muy especializados y económicos.

6.4 ANTECEDENTES TECNOLÓGICOS

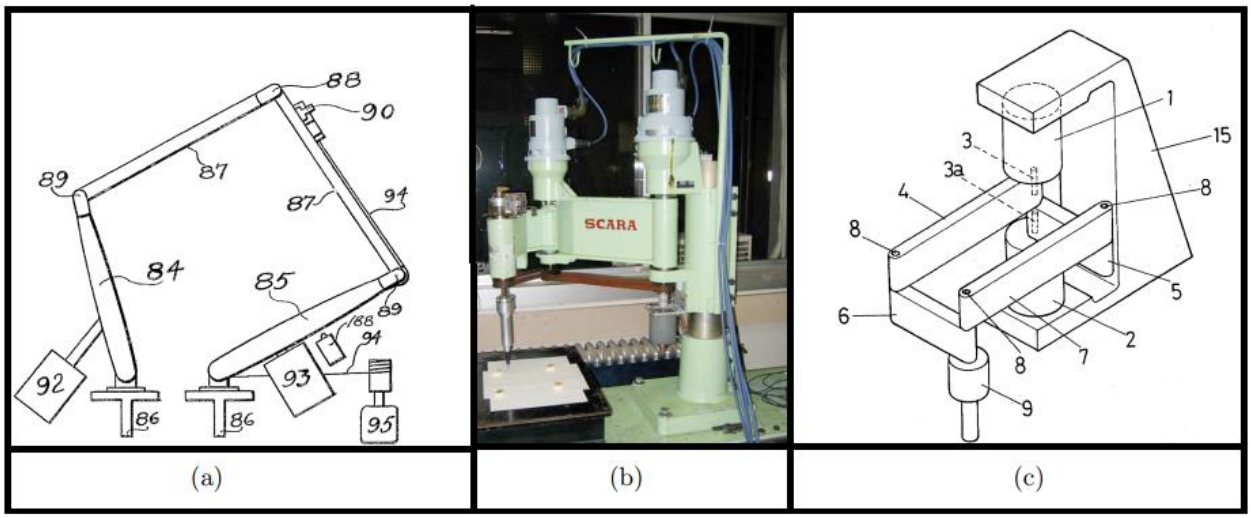


Figura 17 a) .Esquema del primer diseño de un robot industrial propuesto en 1934. b). Robot SCARA construido por Hiroshi Makino en 1980. c). Esquema de un Robot SCARA de doble brazo Hiroshi Makino 1979.[16]

(Figura 17.a) es un esquema de una patente estadounidense, la cual muestra un pantógrafo diseñado en ese año para fines industriales, esta patente tiene como característica principal ser muy similar en su estructura al robot desarrollado por la compañía “Mecademic” llamado DexTAR mostrado en el presente documento (Figura 14), el objetivo del proceso de diseño desarrollado en este documento es diseñar un robot SCARA paralelo planar con 2 GDL basándose fuertemente en el desarrollo y funcionamiento de DexTAR . Muchos años después en 1978 Hiroshi Makino de la Universidad de Yamanashi Japón, invento el ahora muy popular robot SCARA de estructura tipo serie. Uno de los primeros prototipos construidos de este robot se muestra en (Figura 17.b) construido por el Profesor Hiroshi Makino.

En 1985 Donald C. Fyler del Charles Stark Draper Laboratory en estados unidos llego con la idea de usar un mecanismo de 5 barras, dijo que el doble brazo es la mejor alternativa a la configuración del SCARA de estructura tipo serie que solo contaba con un brazo.

[16] Figura 17. Tomada de: (Mecademic, 2014-2015)

El profesor Makino también desarrolló una mejora al diseño del robot SCARA que inventó, esta mejora consistía en dotar al robot de dos brazos en vez de uno solo (Figura 17.c), convirtiendo así el robot en un mecanismo de cadena cinemática cerrada, lo que quiere decir que obtiene como resultado un robot paralelo; la ventaja principal de esta mejora es que sus dos actuadores rotatorios están fijos a una bancada, en efecto el robot puede ser construido con partes móviles mucho más ligeras.

6.4.1 CONSIDERACIONES IMPORTANTES

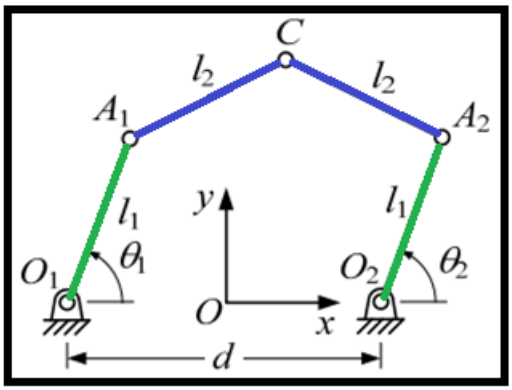


Figura 18. Esquema cinemático de un robot SCARA paralelo de 2 GDL.[17]

La (Figura 18) muestra el esquema cinemático de un robot SCARA paralelo con 2 GDL, es decir tiene dos entradas de movimiento controlado O_1 y O_2 donde están ubicados los actuadores rotarios; ***d*** es la distancia correspondiente entre los ejes de los rotores de cada actuador los cuales están fijos a un eslabón de bancada; l_1 líneas en verde, cada una está unida a O_1 y O_2 hasta A_1 y A_2 respectivamente, se conocen como **eslabones proximal**, puesto que son los más cercanos a los actuadores, θ_1y θ_2 son los ángulos que puede describir cada eslabón proximal; l_2 líneas en azul, de A_1 al punto ***C*** y de A_2 a ***C*** respectivamente (el punto ***C*** es donde estará ubicada una herramienta final cualquiera, donde el robot puede realizar un sin fin de operaciones), se conocen como **eslabones distal**, puesto que son los eslabones más lejanos a los actuadores.

[17] Figura 18. Tomada de: (Bourbonnais & Bonev, 2010)

Es bien conocido que el ***workspace,*** en español **(espacio de trabajo)** de un robot paralelo es generalmente más pequeño que el espacio de trabajo de un robot de estructura tipo serie de dimensiones similares. Se define espacio de trabajo al área o volumen (depende de si se habla de un robot espacial 3D o planar 2D), donde el robot puede funcionar satisfactoriamente, fuera de esta área o volumen el robot no puede operar. En ocasiones el espacio de trabajo de un robot paralelo se ve segmentado por singularidades, las singularidades son configuraciones donde la rigidez inherente de un robot cambia repentinamente, la mayoría de los robots paralelos presentan dos principales tipos de singularidades. (Bourbonnais & Bonev, 2010)

6.4.2 SINGULARIDADES TIPO 1

La singularidad tipo 1 también llamada singularidad tipo serie, es donde el efector final es decir el punto ***C*** pierde un grado de libertad, este tipo de singularidad se presenta cuando el punto ***C*** se encuentra trabajando en la frontera que delimita el espacio de trabajo.

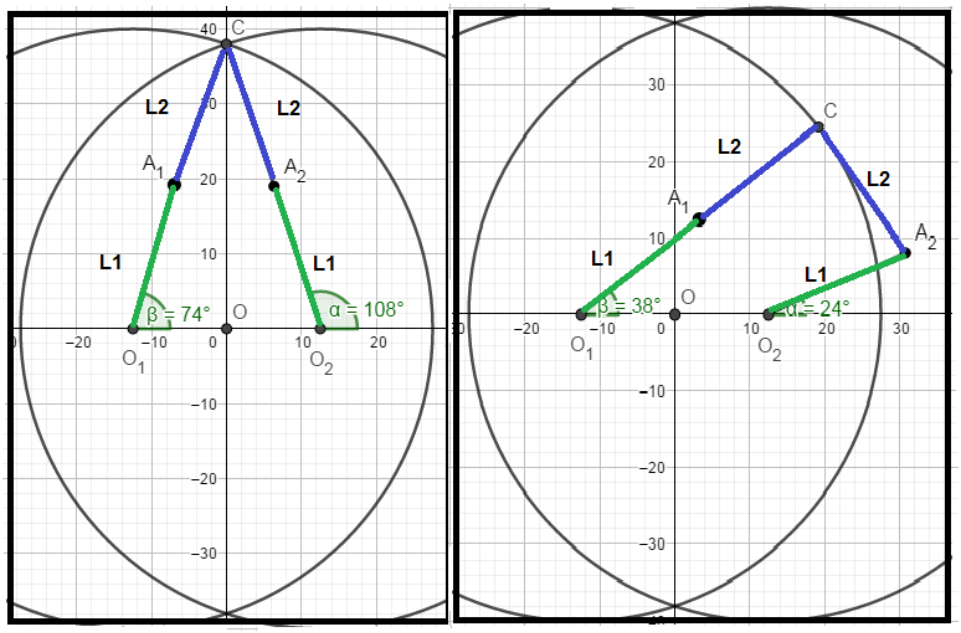


Figura 19. Singularidades Tipo 1[18]

[18] Figura 19. Elaboración propia. Hecho con el software Geogebra.

La (Figura 19) Utiliza la misma nomenclatura que la (Figura 18), y está representada con la misma convención de colores que tienen el mismo significado para ambas figuras.

6.4.3 SINGULARIDADES TIPO 2

La singularidad tipo 2 también llamada singularidad paralela, tiene una configuración más compleja, que la singularidad tipo 1, ya que los actuadores rotatorios no pueden soportar la fuerza y momento que se ejercen en el efector final ***C***, este tipo de singularidad siempre se encuentra dentro del espacio de trabajo, es decir el efector final ya no está en la frontera del espacio de trabajo.

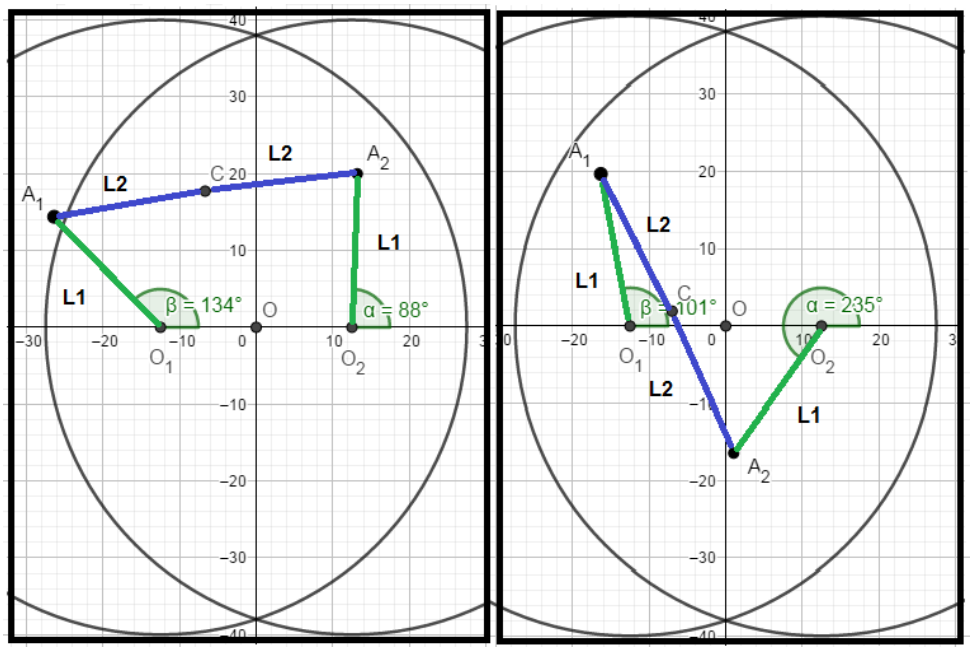


Figura 20. Singularidades Tipo 2[19]

La (Figura 20) Utiliza la misma nomenclatura que la (Figura 18), y está representada con la misma convención de colores que tienen el mismo significado para ambas figuras.

[19] Figura 20. Elaboración propia. Hecho con el software Geogebra

6.4.4 ROBOT PARALELO RP-5AH



Figura 21. RP-5AH industrial robot cortesía de Mitsubishi Electric.[20]

La primera compañía en la actualidad en construir y comercializar a nivel industrial un robot SCARA paralelo con doble brazo fue Mitsubishi Electric en el año 1998. El robot fue diseñado por Mr.Norio Kadaira, la empresa presentó el producto como un robot de alta velocidad y alta precisión, orientado a aplicaciones de ensamblaje, pintura y soldadura.

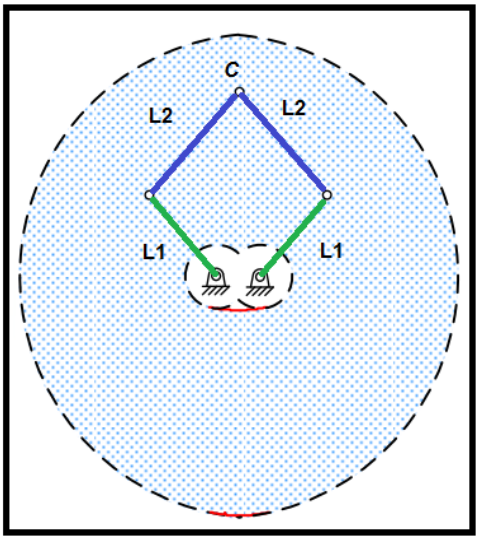


Figura 22. Espacio de trabajo del robot RP-5H

[20] Figura 21 y 22. Tomada de : (Bourbonnais & Bonev, 2010)

La (Figura 22) Utiliza la misma nomenclatura que la (Figura 18), y está representada con la misma convención de colores que tienen el mismo significado para ambas figuras, en base a la (Figura 18), el robot RP-5AH cuentas con las siguientes características:

- $\boldsymbol{l_1}$**=** 200 mm
- $\boldsymbol{l_2}$**=** 260 mm
- $\boldsymbol{d}$**=** 85

La (Figura 22) muestra el espacio de trabajo teórico del robot RP-5AH, se define espacio de trabajo a un área que excluye las interferencias mecánicas. Con líneas discontinuas de color negro representa la frontera del espacio de trabajo y las zonas donde se pueden presentar singularidades de tipo 1, y las líneas continuas de color rojo representa las zonas de singularidad tipo 2, en la (Figura 22) se ve un espacio de trabajo muy bien optimizado, puesto que las singularidades de tipo 2 están casi ausentes. Pero en la práctica el espacio de trabajo útil del robot RP-5AH es mucho más pequeño debido a las interferencias mecánicas.

6.4.5 DESARROLLO DE UN ROBOT PARALELO DE 5 BARRAS CON UN GRAN ESPACIO DE TRABAJO (DexTAR)

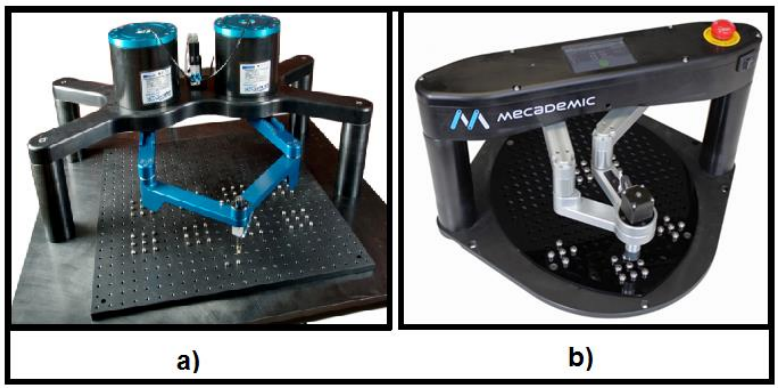


Figura 23. a). Robot DexTAR desarrollado por el equipo del profesor Ilian Bonev. b). Robot DexTAR desarrollado por la compañia "Mecademic"[21]

[21] Figura 23.a) Tomada de: (Bourbonnais & Bonev, 2010), Figura 25.b) Tomada de: (Mecademic, 2014-2015)

Ambos robots son en realidad una mecanismo de 5 barras, los dos llevan la designación de DexTAR siglas en ingles de: (Dexterous Twin-Arm Robot), lo cual traduce al español (Robot hábil de dos brazos).

La (Figura 23. a) muestra el primer robot DexTAR que se desarrolló, gracias a: Lucas Campos, Francis Bourbonnais, Ilian A. Bonev y Pascal Bigras en École de technologie supérieure (ETS), Montreal, QC, Canada. Este prototipo funciona con enormes servomotores de accionamiento y un actuador lineal neumático, controlado desde un computador mediante el software MathWorks' xPC Target™.

La (Figura 23. b) muestra el robot DexTAR desarrollado por la compañía "Mecademic" este desarrollo está fuertemente influenciado por el desarrollo del robot mostrado en (Figura 23. a) este es un robot mucho más compacto, tanto en sus eslabones como en elementos electrónicos, utiliza dos servomotores 90 W maxon© y un motor a pasos que funciona linealmente, su controlador está dentro de la misma base del robot, el robot DexTAR desarrollado por "Mecademic" utiliza los mismos postulados e ideas del robot DexTAR desarrollado por el equipo del Profesor Ilian A. Bonev, a continuación explicará en que se diferencia el robot DexTAR a otros robots SCARA paralelos de 5 barras desarrollados anteriormente principalmente al robot RP-5AH.

6.4.6 DIFERENCIAS ENTRE RP-5AH Y DexTAR

Para poder explicar la diferencia sustancial entre estos dos tipos de robots se debe de empezar explicando una serie de puntos importantes.

En el documento (Bourbonnais & Bonev, 2010) los autores explican que la tarea fundamental de la robótica paralela es optimizar el espacio de trabajo y reducir a un máximo posible las singularidades de tipo 2, se dice que teóricamente el diseño óptimo de un robot SCARA paralelo de 5 barras es aquel que tenga las siguientes dimensiones:

- $\boldsymbol{l_1 = l_2 = l}$
- $\boldsymbol{d = 0}$

Todas estas dimensiones ya definidas en la (Figura 18). Es decir sus eslabones proximal y distal deben de tener la misma longitud, y las distancia entre los ejes rotatorios de los actuadores debe de ser 0, este diseño estaría libre de toda singularidad y obtendría la mayor área en el espacio de trabajo, esto en teoría, pero realmente este diseño no puede construirse y si se pudiese su espacio de trabajo no sería tan grande como parece, en realidad su espacio de trabajo sería un anillo, es decir un disco con un agujero.

En la siguiente tabla se evidencia una comparación en las medidas entre el robot RP-5AH y el robot DexTAR desarrollado por el equipo del Profesor Ilian A. Bonev, todas las medidas ya definidas en la (Figura 18), para luego explicar que efectos acarrean estas diferencias.

ROBOT RP-5AH	ROBOT DexTAR
$\boldsymbol{l_1 = 200\,mm}$	$\boldsymbol{l_1 = 230\,mm}$
$\boldsymbol{l_2 = 260\,mm}$	$\boldsymbol{l_2 = 230\,mm}$
$\boldsymbol{d = 85\,mm}$	$\boldsymbol{d = 275\,mm}$

Tabla 5. Cuadro comparativo dimensiones de RP-5AH vs DexTAR.[22]

Nótese que en el robot RP-5AH $\boldsymbol{l_1 \neq l_2}$ y $\boldsymbol{d < l_1}$, con estas dimensiones en teoría el espacio de trabajo sería más grande pero como se dijo anteriormente realmente esto no es así, puesto que al ser $\boldsymbol{d < l_1}$, los eslabones proximal no son capaces de movilizarse entre los dos actuadores rotatorios y generarían interferencia mecánicas y como consecuencia de esto no se podría usar la totalidad del espacio de trabajo teórico.

A diferencia del robot DexTAR que $\boldsymbol{l_1 = l_2}$ y $\boldsymbol{d > l_1}$, en análisis si $\boldsymbol{l_1 = l_2}$ el espacio de trabajo seria mayor, al contrario de tener el caso de $\boldsymbol{l_1 \neq l_2}$, y si $\boldsymbol{d > l_1}$ los proximal links pueden movilizarse libremente entre los dos actuadores rotatorios, evitando así muchas interferencias mecánicas, Esta es la diferencia substancial entre ambos robots.

[22] Tabla 5. Elaboración propia.

El objetivo a nivel industrial es eliminar las singularidades de tipo 2, una opción es usar actuadores de una capacidad mucho mayor a la necesaria, sin embargo, esto trae mayor complejidad al problema de control y trae consigo un costo adicional muy grande si se fabrica el robot a gran escala, el uso de esta opción vendría muy acertado si se requiere un movimiento continuo, tal como en operaciones de mecanizado donde es de vital importancia el menor tiempo entre trayectoria de un punto A hacia un punto B.

Pero si las restricciones de uso nos permiten que solo las posiciones puntuales del efector, punto ***C*** deben de ser precisas más no el camino entre dos posiciones, se pueden involucrar las singularidades de tipo 2 en el diseño.

Pero sin importar que $\boldsymbol{l_1 = l_2}$, el robot DexTAR no puede aún estar libre de las singularidades tipo 1 y tipo 2, es acá donde los autores del documento (Bourbonnais & Bonev, 2010) se plantean la siguiente pregunta. ¿Cómo habilitar a DexTAR para que pueda operar a través de todo tipo de singularidad para hacer un uso óptimo y completo del espacio de trabajo teórico? La solución que postula el autor en el documento (Bourbonnais & Bonev, 2010) es trabajar con algo llamado **assembly mode** y **working mode.**

6.4.7 ASSEMBLY MODE

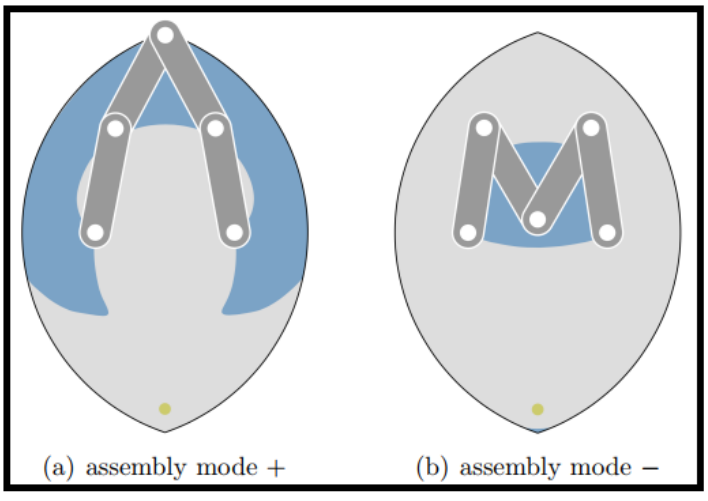


Figura 24. a). Assembly mode positivo para DexTAR. b). Assembly mode negativo para DexTAR.[23]

[23] Figura 24. Tomada de: (Mecademic, 2014-2015)

Assembly mode lo cual se traduce como (modos de ensamble), son configuraciones distintas para los mismos ángulos de rotación de los actuadores $\boldsymbol{\theta_1}$ y $\boldsymbol{\theta_2}$ ángulos que se definen en la (Figura 18). Cada assembly mode tiene sus respectivo working mode.

6.4.8 WORKING MODE

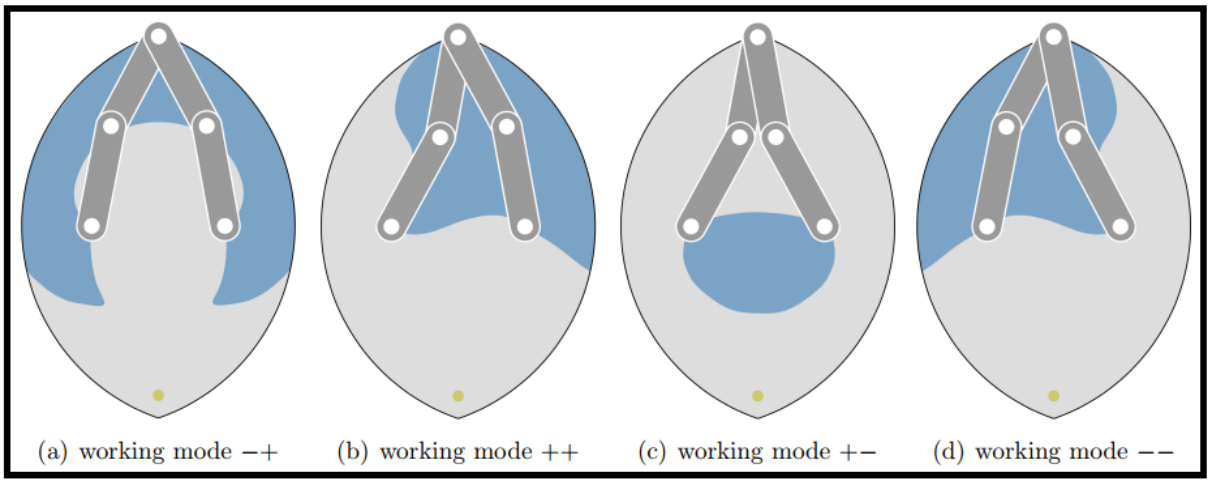


Figura 25. Working modes del robot DexTAR para el assembly mode positivo[24].

Working mode lo cual se traduce como (modos de trabajo), son el resultado de la cinemática directa o inversa, cada assembly mode cuenta con 4 working modes. En cada working mode mostrado en la (Figura 25) presenta singularidades de tipo 2 las cuales se representan en áreas de color gris, y las áreas de color azul representa el espacio de trabajo donde el robot puede operar en cada uno de los working mode mostrados. El autor enuncia que es posible alcanzar cualquier punto del espacio o gran parte de él, sin comprometer la precisión y la rigidez de DexTAR, simplemente cambiando cuando se requiera de modos de trabajo, es decir programando un código de control que ordene a DexTAR cambiar de un working mode a otro cuando se deseé llevar el efector final a un punto en específico, cambiar de un working mode a otro solo se logra cuando DexTAR opere por singularidades de tipo 1, para ello se debe de tener total control de todas las articulaciones de DexTAR.

[24] Figura 25. Tomada de: (Mecademic, 2014-2015)

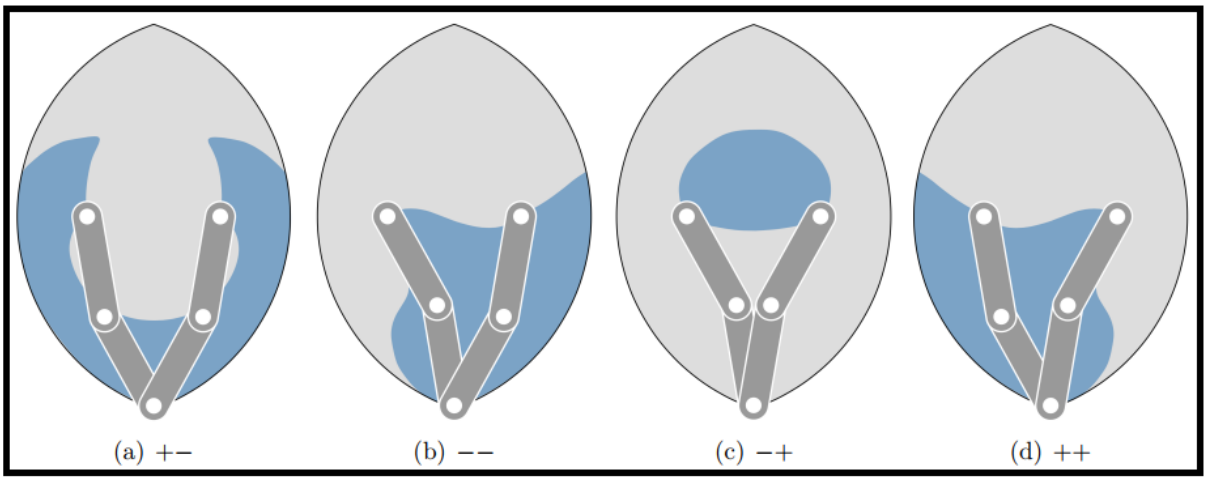


Figura 26. Working modes del robot DexTAR para el assembly mode negativo.[25]

Cambiando continuamente entre el assembly mode positivo a negativo y viceversa y a su vez ir cambiando entre los diferentes working modes para cada assembly mode, es posible aprovechar en su totalidad el espacio de trabajo a diferencia del robot SCARA paralelo de 5 barras RP-5AH.

6.4.9 RESÚMENES

- Para robot SCARA paralelo a diseñar en el presente documento se utilizará las dimensiones que maneja el autor $\boldsymbol{l_1 = l_2 = l}$ **y** $\boldsymbol{d > l}$**.**
- Para el robot SCARA paralelo a diseñar en el presente documento solo se estudiará y usará el assembly mode positivo, puesto que usar el negativo requiere una programación más compleja y se necesitarían más grados de libertad ya sea en $\boldsymbol{A_1}$, $\boldsymbol{A_2}$ o en ***C,*** puntos definidos en la (Figura 18), para que el cambio entre assembly modes sea controlado y preciso.
- Para el robot SCARA paralelo a diseñar en el presente documento, se realizará una programación básica para tarjetas controladoras Arduino, mediante datos que se obtendrán de la cinemática directa, para realizar una programación de trayectorias abiertas, es decir el robot no seguirá un trayectoria ya programada, solo describirá los ángulos de rotación $\boldsymbol{\theta_1}$ y $\boldsymbol{\theta_2}$ que se le ordene mediante la interfaz gráfica del software Arduino 1.8.5.

[25] Figura 26. Tomada de: (Mecademic, 2014-2015)

- Para el robot SCARA paralelo a diseñar en el presente documento, se diseñará con materiales económicos y con procesos de manufactura económicos, en este caso los eslabones proximal y distal se fabricarán de acrílico estándar maquinado por rayo láser, sus juntas se diseñarán en aluminio maquinados por procesos de arranque de viruta en un torno mecánico, se piensa en estos materiales en su fase de diseño gracias a su bajo peso y economía.
- Para el robot SCARA paralelo a diseñar en el presente documento, solo se realizará un estudio estático y un estudio cinemático de un mecanismo de 5 barras, este estudio será suficiente para construir un prototipo con fines didácticos. Si por el contrario se busca el diseño de un robot con fines industriales y de fabricación a gran escala se va a requerir de un estudio dinámico de velocidades y aceleraciones para luego seleccionar espesores de juntas y eslabones mínimos y actuadores con especificaciones exactas para así reducir costos al máximo, como solo se construirá un prototipo no es necesario un estudio tan profundo en la fase de diseño.

6.5 INGENIERÍA INVERSA

La ingeniería inversa es un procedimiento cuyo enfoque central es descubrir el funcionamiento o resultado de un producto que ya está materializado para mejorarlo revisarlo o simplemente adaptar ese funcionamiento y/o resultado en un proyecto propio. En este caso se quiere estudiar los elementos que hay presentes en algunos de los robots DexTAR.

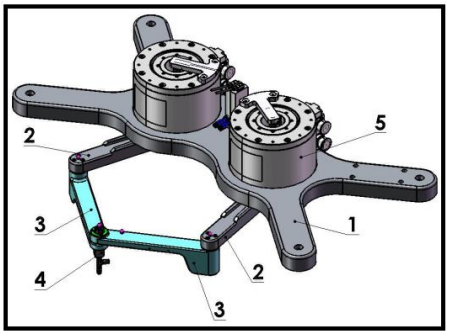


Figura 27. Componentes principales del robot DexTAR DexTAR desarrollado por el equipo del profesor Ilian Bonev.[26]

En la (Figura 27) se señalan las principales partes de este robot DexTAR**. 1)** Base para motores,**2)** Eslabones proximal, **3)** Eslabones distal, **4)** Efector final, **5)** servo-motores.

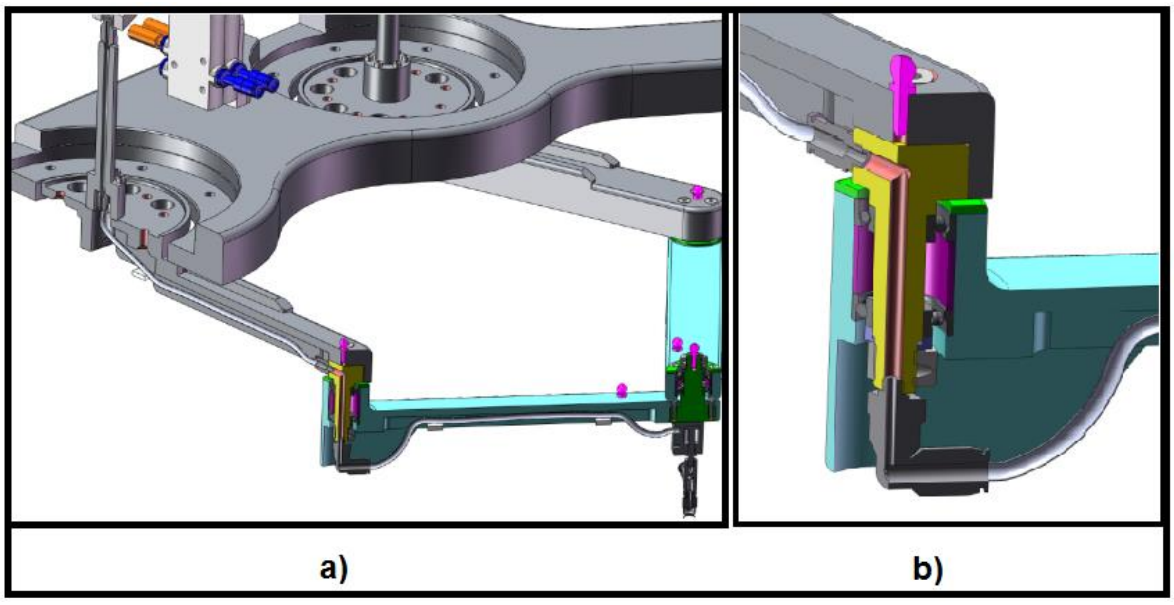


Figura 28. a). Acople de servomotores, b). Junta entre eslabón proximal y distal.[27]

[26] Figura 27. Tomada de: (Bourbonnais & Bonev, 2010)

En la (Figura 28. a) se muestra una vista de sección del acople entre los servomotores y los eslabones proximal, se nota como el eje del actuador tiene un agujero concéntrico a este donde se conecta una manguera usada en neumática, la manguera viaja hasta el punto donde se encuentra el efector final para accionar una ventosa, esta configuración se usa de esta forma para evitar obstrucciones.

En la (Figura 28. b) se muestra una vista de sección detallada donde se nos explica cómo es la junta entre los eslabones proximal y distal, se evidencia de igual manera un agujero concéntrico al eje que conecta ambos eslabones, para facilitar el tránsito de aire, se ve un elemento que facilita la rodadura entre elementos, y como el eslabón proximal esta fijamente atornillado al eje principal para aumentar así su rigidez y evitar deslizamientos entre elementos cuando este gire sobre su propio eje.

A continuación se analizará los elementos internos de un robot SCARA paralelo construido en ITS mecatronico instituto técnico superiore,

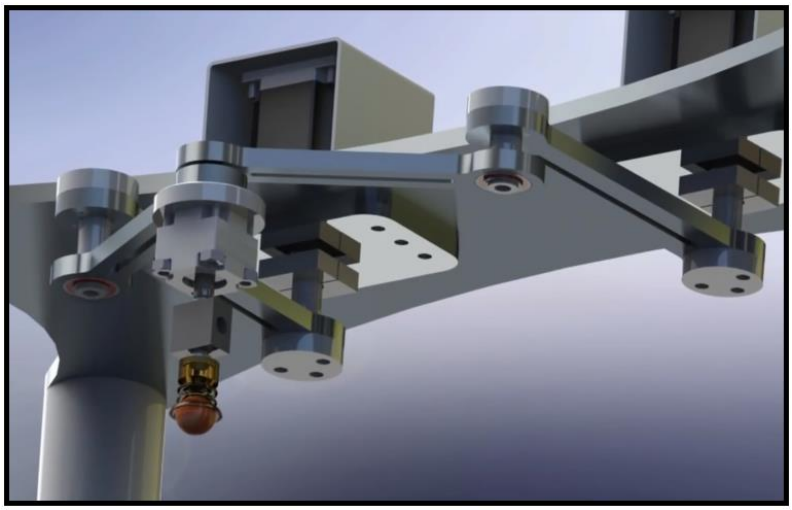


Figura 29. Vista inferior de los eslabones proximal y distal[28]

La (Figura 29) muestra otra forma del como los eslabones proximal y distal pueden estar asegurados a sus elementos rodantes y actuadores.

---

[27] Figura 28. Tomada de: (Bourbonnais & Bonev, 2010)
[28] Figura 29 y 30. Tomadas de la dirección web: https://bit.ly/2TgFLz4

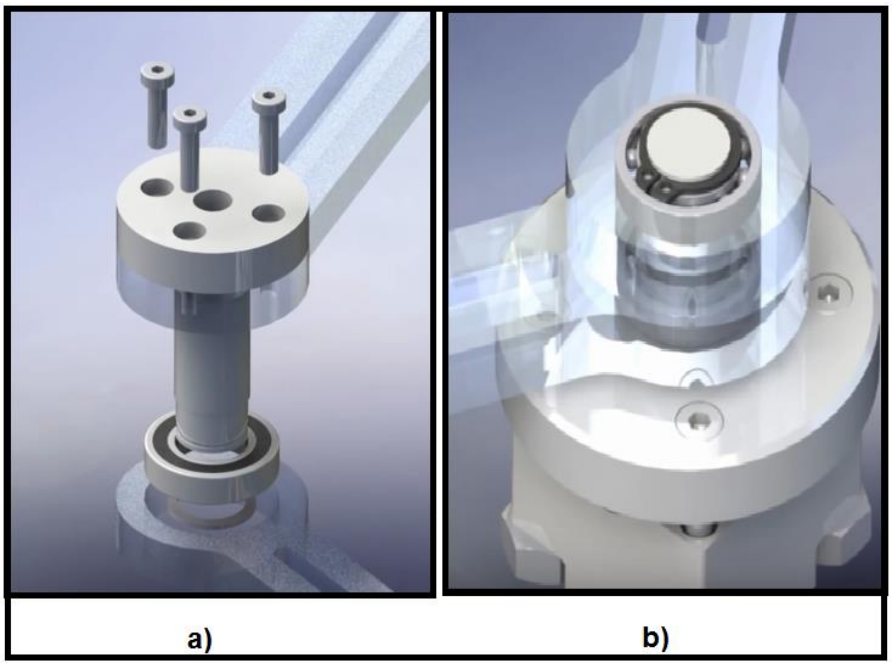


Figura 30. a) Junta eslabón proximal y distal SCARA construido por ITS. b). Junta entre eslabones distal y efector final del SCARA construido por ITS.

La (Figura 30. a) detalla la junta entre un eslabón proximal y distal, se evidencia que el disco el cual es atornillado al eslabón proximal y el eje que transmite movimiento rotatorio a ambos eslabones son una misma pieza, dando mayor rigidez y precisión al conjunto. En la (Figura 30. b) se muestra la junta entre los dos eslabones distal y el efector final del robot SCARA, se ve como sus elementos de rodadura en este caso rodamiento de bolas esta fijo mediante el uso de anillos de seguridad ensamblado en el eje que actúa como junta, este método es de gran utilidad para el diseño del robot SCARA paralelo de 2 GDL propuesto en el presente documento, debido a su sencillez a su economía y efectividad.

6.6 DISEÑO DETALLADO

6.6.1 SELECCIÓN DE DIMENSIONES

Es necesario seleccionar adecuadamente las dimensiones fundamentales del robot SCARA paralelo a diseñar, llevando presente la geometría del mecanismo de 5 barras del cual está compuesto este robot SCARA paralelo y las restricciones de

funcionamiento de dicho robot ya anteriormente mencionadas. Con ayuda del software Siemens NX 10.0® en un ambiente de modelado 3D, se logró encontrar estas dimensiones fundamentales ya definidas en la (Figura 18).

- $\boldsymbol{l_1 = l_2 = l = 110\ mm}$
- $\boldsymbol{d = 160\ mm}$

Para conocer estas dimensiones se debió realizar un proceso iterativo, proceso que no se explica en esta sección, solo se especifica las dimensiones fundamentales del mecanismo.

6.6.2 MODELADO 3D

Por medio del ambiente de modelado 3D que ofrece Siemens NX 10.0® se logró hacer un modelado de cada una de las partes físicas del robot con sus dimensiones fundamentales las cuales se seleccionaron mediante un proceso iterativo.

Al abrir el software empezamos con la siguiente ruta: Archivo -> Nuevo, a continuación el software nos ofrece en un primer momento una serie de opciones.

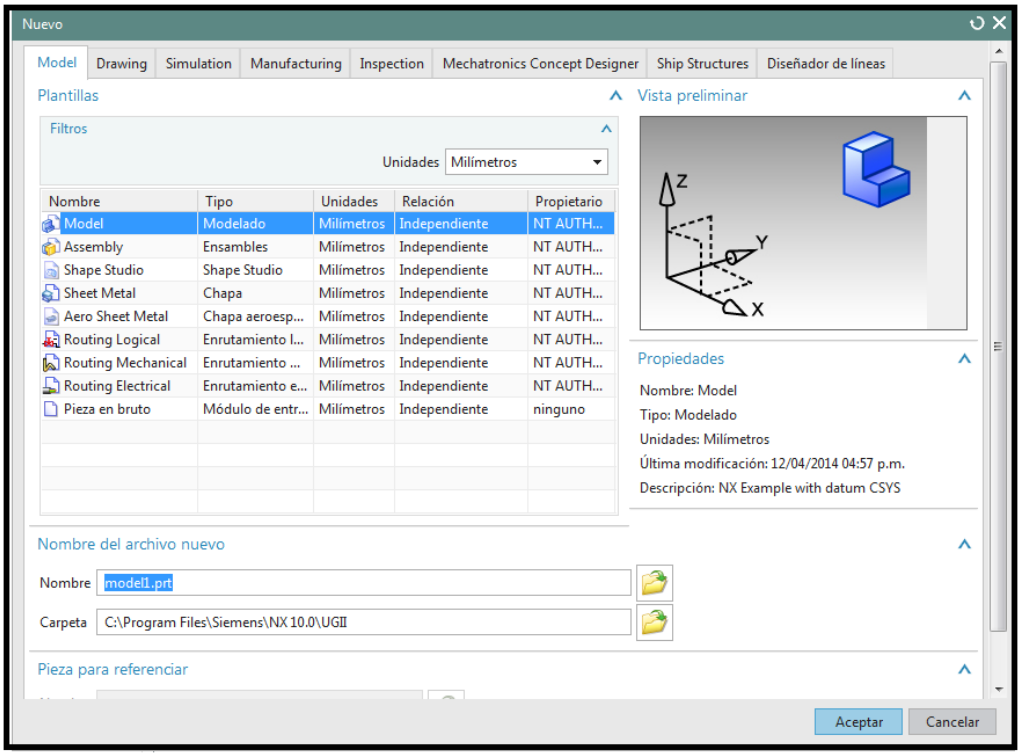


Figura 31. Interfaz inicial de Siemens NX 10.0® al comenzar un nuevo modelo 3D.

En este caso se debe de escoger la opción de Model, el software nos permite desde un principio definir el nombre del archivo y la carpeta de guardado donde se encontrará el archivo, siendo así una interfaz muy práctica.

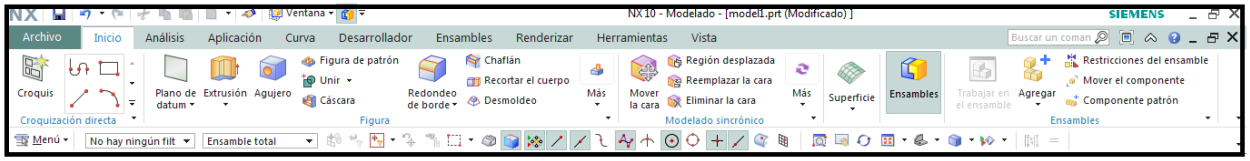


Figura 32. Barra de herramientas del ambiente de modelado 3D.

En esta barra de herramientas se encuentra todas las operaciones que permite modelar cada una de los componentes del robot SCARA paralelo.

En esta interfaz lo primero que se debe de hacer es seleccionar el icono  “Croquis”, icono del cual se desprende la siguiente pantalla:

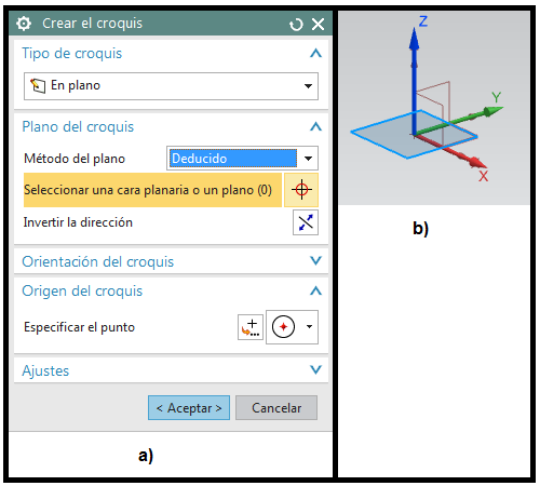


Figura 33. a). Crear croquis. b). Sistema coordenado

La ventana de la (Figura 33.a) permite configurar nuestro croquis con opciones especificas tales como la orientación, origen y tipo de croquis, En la (Figura 33. b) permite escoger el plano de referencia con el cual se desea modelar determinado componente.

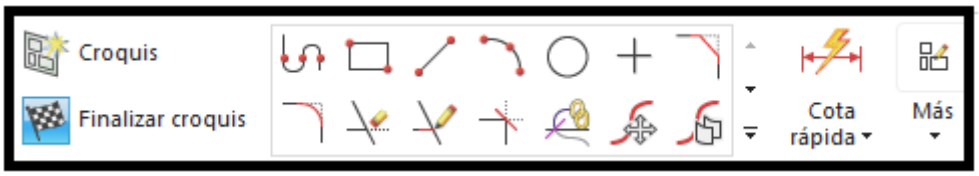


Figura 34. Croquis herramientas de dibujo 2D.

Después de haber seleccionado el plano de trabajo para realizar el croquis, el software nos ofrece una serie de herramientas que se muestran en la (Figura 34), estas mismas permiten dibujar los componentes en 2D para proceder a modelarlos en 3D. Una vez terminado el dibujo 2D en el entorno de croquis procedemos a seleccionar el icono  .

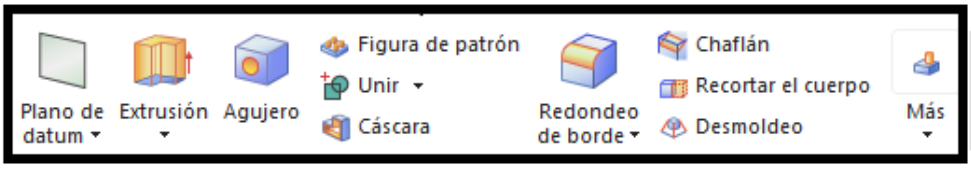


Figura 35. Herramientas de modelado 3D.

El icono  “Extrusión” mostrado en la (Figura 35) permite dar volumen al dibujo 2D previamente dibujado, y ya logrado este objetivo se puede realizar diferentes operaciones al componte tales como taladros, roscas, biseles, redondeos etc.

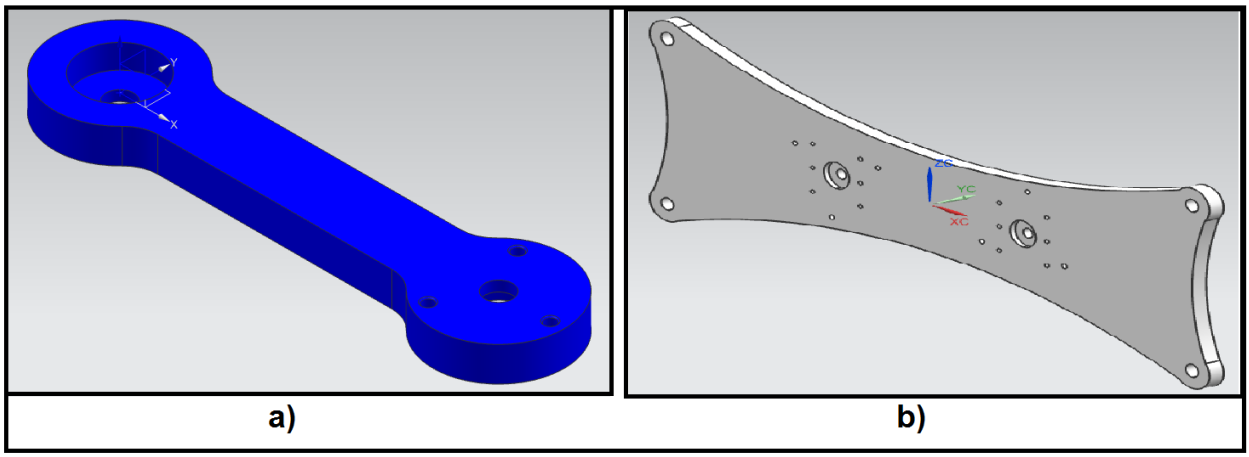


Figura 36. a). Modelo 3D eslabón proximal. b). Modelo 3D Base soporte de motores.

Al realizar todos los pasos descritos con anterioridad, se termina obteniendo un resultado como el que se evidencia en la (Figura 36.a, b), estos son componentes pertenecientes del robot SCARA paralelo con 2 GDL diseñado en este documento. Al final del documento en el Anexo # 1 están disponibles los planos de fabricación correspondientes a todos los componentes que fueron modelados en este ambiente 3D, aportando al detalle todas las dimensiones de los mismos.

6.6.3 ENSAMBLE DE COMPONENTES

Al obtener el modelado 3D de todos los componentes correspondientes al robot SCARA paralelo de 2 GDL. Se procede a realizar el ensamble de todos estos componentes, es decir crear un solo conjunto de componentes, dándole forma a la máquina. El software Siemens NX 10.0® permite realizar la operación de ensamble de forma muy intuitiva, a continuación se describe algunos pasos importantes que permiten hacer una primera toma de contacto del cómo se realiza un ensamble en este software.

Al abrir el software empezamos con la siguiente ruta: Archivo -> Nuevo, a continuación el software nos ofrece en un primer momento una serie de opciones. Mostradas ya anteriormente en la (Figura 31) a diferencia que ahora debemos de seleccionar la opción de Assembly.



Figura 37. Barra de herramientas del ambiente de ensamble.

En la barra de herramientas mostrada en la (Figura 37) están todas las operaciones necesarias para ensamblar el robot SCARA paralelo de 2 GDL a diseñar y así dar forma al mismo. Se selecciona el icono  ”Agregar” para poder empezar a ensamblar todos los componente modelados en 3D, hecho esto el software mostrará la siguiente pantalla:

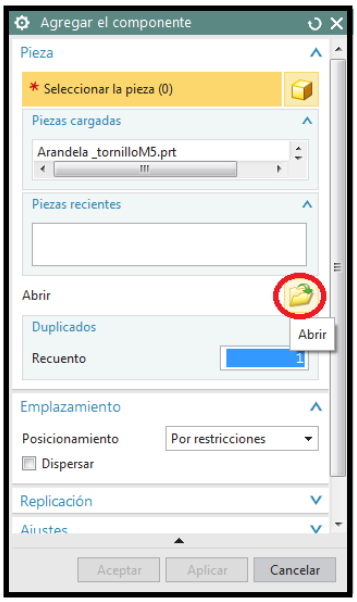


Figura 38. Ventana de agregar el componente.

Dela ventana mostrada en la (Figura 38) se selecciona el icono resaltado en rojo  “Abrir”, para poder seleccionar cada componente de la máquina a ensamblar, es de vital importancia que todos estos componentes estén contenidos en una sola carpeta para

evitar inconvenientes en el ensamble, al momento de seleccionar nuestro componente y hacer click en aceptar el software nos muestra esta nueva ventana:

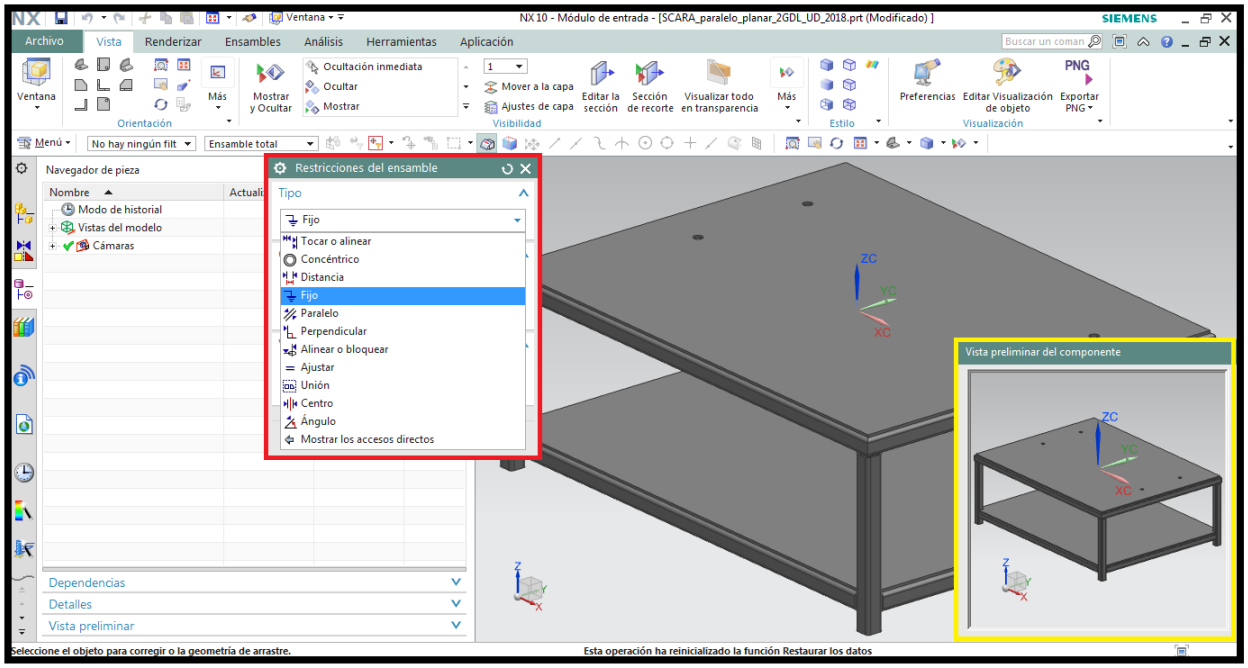


Figura 39. Ventana de restricciones de ensamble para componentes fijos.

En la (Figura 39) en marco rojo se muestra una ventana llamada “Restricciones del ensamble” en ella existen diferentes opciones, en este caso se selecciona la opción con el icono “Fijo”, puesto que siempre a la hora de ensamblar se debe de empezar por la base de toda la máquina, en este caso la mesa que actúa como bancada o componente inmóvil del robot SCARA paralelo de 2 GDL, desde la mesa se empieza a ensamblar todo el conjunto, en la ventana de la (Figura 39) también se encuentra un recuadro en amarillo que corresponde a una ventana llamada “Vista preliminar del componente” lo cual permite tener un mejor control del componente para ubicar cualquier restricción en este caso la restricción en algún punto de su volumen, seguido a esto nos ubicamos de nuevo en la barra de herramientas del ambiente de ensamble (Figura 37) y volvemos a seleccionar el icono ”Agregar”, y así volver a

seguir el proceso de la (Figura 38) seleccionando el icono para poder seguir añadiendo componentes al ensamble.

En el momento de tener ubicada la base de la máquina, se procede a ensamblar todos los demás componentes, con base a la (Figura 39) más específicamente a la ventana en el recuadro rojo llamada “Restricciones del ensamble”, seleccionamos el icono ”Tocar o alinear” lo cual llevará a la siguiente ventana:

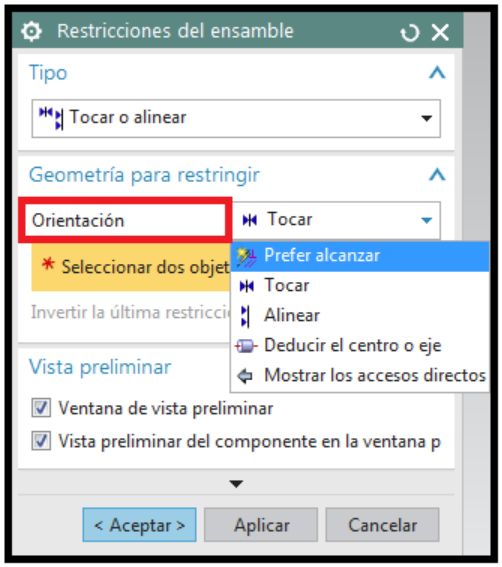


Figura 40. Ventana restricciones de ensamble para el icono "Tocar o alinear".

La (Figura 40) muestra la ventana de restricciones de ensamble para el icono “Tocar o alinear”, en la zona del recuadro rojo llamado “Orientación” es posible hacer uso de diferentes opciones para relacionar dos componentes entre sí en el mismo proceso de ensamble, es decir puede generar contacto entre superficies de dos componentes seleccionando el icono ”Tocar”, o que dos piezas estén alineadas en un mismo eje seleccionando el icono “Deducir el centro o eje”, en las siguientes figuras se muestra un ejemplo.

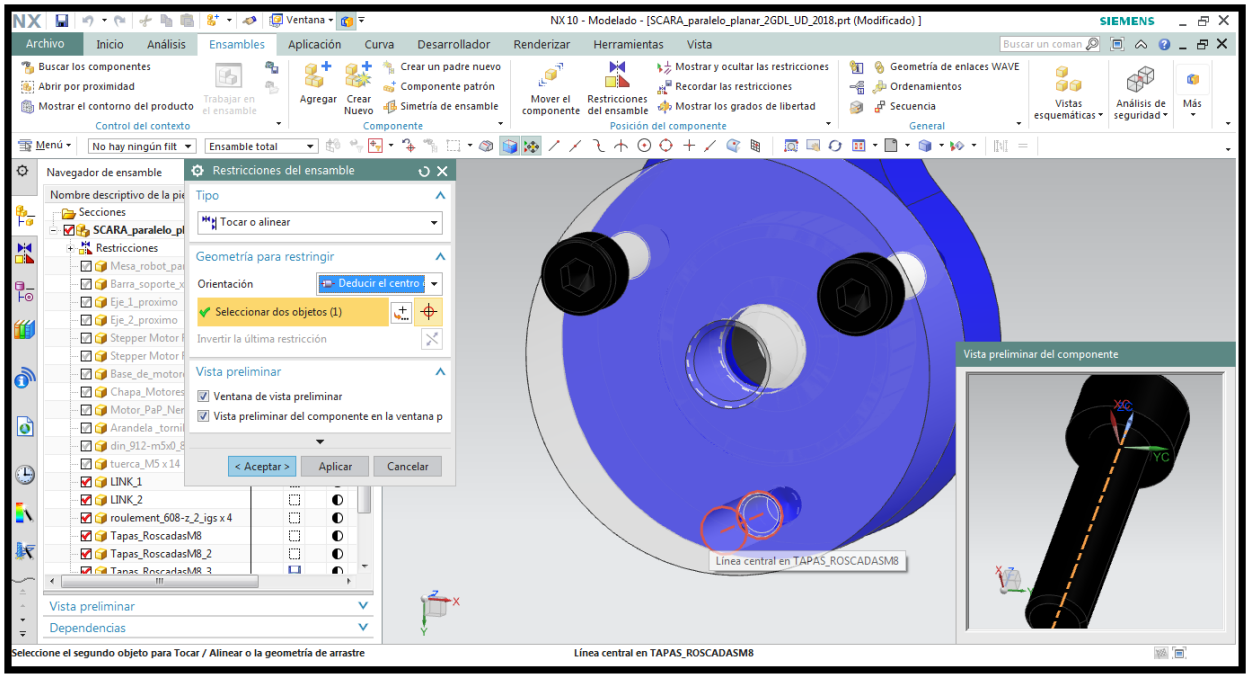


Figura 41. Deducción del centro o eje entre dos componentes

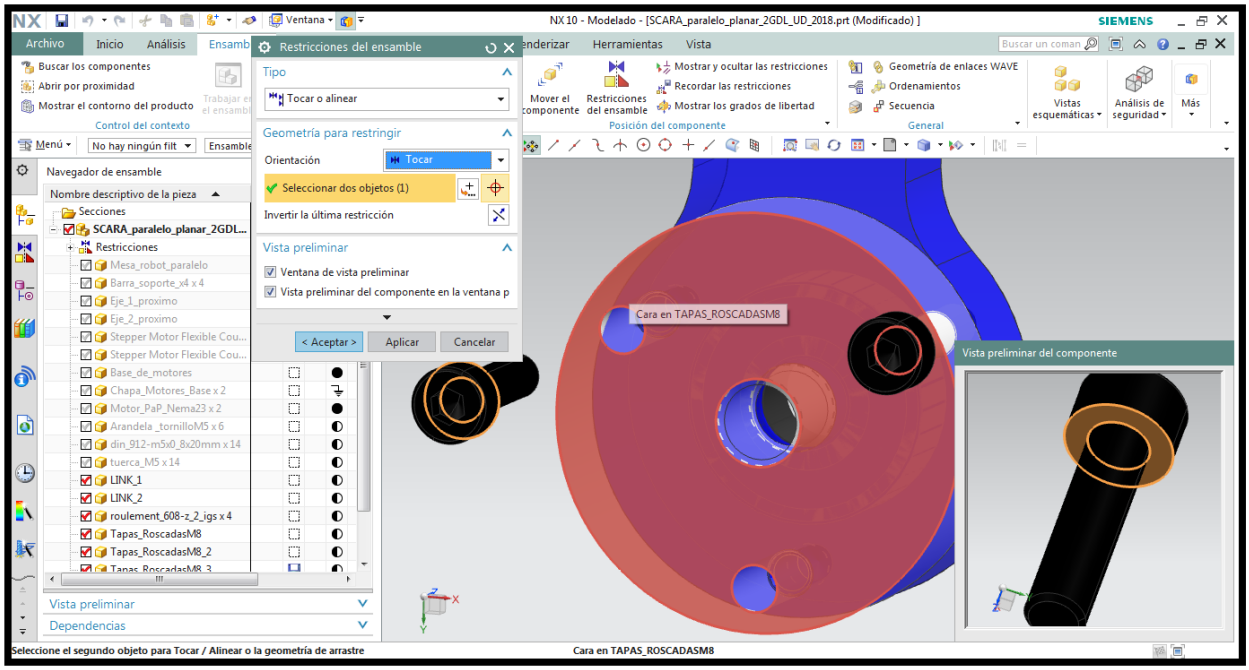


Figura 42. Contacto de superficies entre dos componentes.

Realizando el ensamble entre dos componentes, se nota que en la ventana de la (Figura 41) se hace uso del icono , primero se selecciona el eje de rotación del componente mostrado en la ventana llamada “vista preliminar del componente “ en este

caso un tornillo Allen, a continuación debe de relacionarse el eje de rotación de este componente con el eje de rotación o centro de otro componente, se selecciona con el puntero la línea central del componente TAPAS_ROSCADASM8, componente visualizado en el espacio de dibujo general de la (Figura 41), al aceptar dicha restricción entre estos dos componentes ambos estarán concéntrico bajo el mismo eje de rotación o línea central. Para poder terminar el ensamble entre el tornillo Allen y el componente TAPAS_ROSCADASM8, se presta especial atención en la ventana de la (Figura 42) se hace uso del icono primero se selecciona la superficie deseada del componente mostrado en la ventana llamada “vista preliminar del componente “ en este caso el tornillo Allen, a continuación debe de relacionarse la superficie seleccionada del tornillo Allen con una superficie del componente TAPAS_ROSCADASM8, es así como se relacionan restricciones entre dos componentes distintos de forma satisfactoria que lleva a un correcto ensamble, se debe de realizar el mismo procedimiento con el resto de componentes, para obtener el ensamble final del diseño de un robot SCARA paralelo con 2 GDL propuesto en el presente documento.

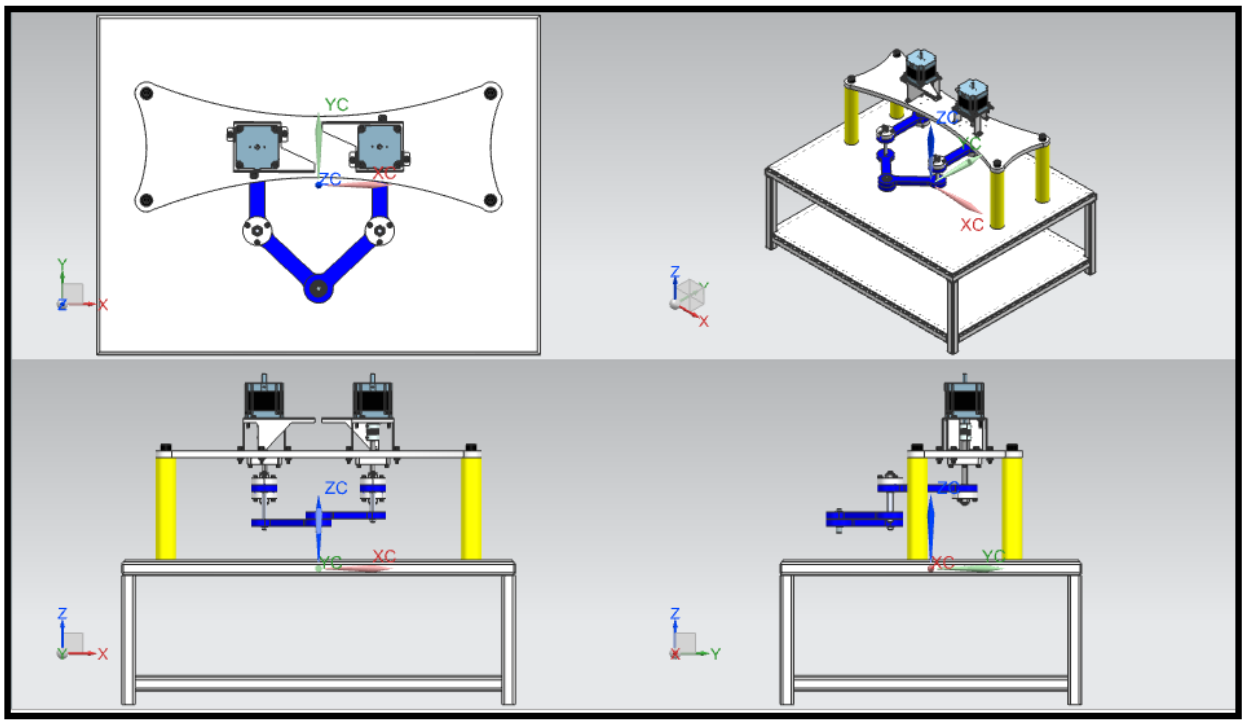


Figura 43. Ensamble del robot SCARA paralelo con 2 GDL.

La (Figura 43) muestra el ensamble final del robot SCARA paralelo de 2 GDL en 4 diferentes vistas, siendo este el resultado de todo el procedimiento anteriormente descrito, en el Anexo # 1 del presente documento está disponible el plano de conjunto y plano en explosivo señalando cada uno de sus componentes para entender de una forma mucho más clara el funcionamiento del robot.

6.6.4 SIMULACIÓN

El proceso de diseño detallado continua una vez obtenido el ensamble de los componentes modelados en 3D en su totalidad, dejando como resultado el ensamble final del robot SCARA paralelo el cual le da forma al mismo, la simulación tiene como objetivo dar vida a dicho ensamble final, la simulación de este robot SCARA paralelo se lleva a cabo desde el software Siemens NX 10.0® mediante un complemento llamado “”Diseñador de conceptos de mecatrónica” este complemento tiene un enfoque multidisciplinar en cuanto al diseño de máquinas, el cual elimina todos los obstáculos existentes entre ingenieros electrónicos, mecánicos de software y automatización, el diseñador de conceptos de mecatrónica ofrece una solución integral a problemas de diseño ingenieril mediante una colaboración multidisciplinar que permite diseñar en menos tiempo y con un alto estándar de calidad, debido a que desde una misma simulación los diseñadores pueden controlar aspectos mecánicos de las máquinas a diseñar tales como: características de cuerpo rígido, definición de tipos de junta, restricción de movimientos controlando los GDL de cada componente, asignado materiales a dichos componentes, restringiendo o permitiendo colisiones, también se puede controlar aspectos de tipo electrónico tales como el funcionamiento de diferentes tipos de actuadores, sensores, micro controladores etc., y por último los diseñadores pueden proporcionar una programación a todos los dispositivos electrónicos tales como los PLC (Controlador lógico programable) o micro controladores para que la maquina pueda funcionar tal y como se simuló virtualmente en el software Siemens NX 10.0®, en resumen este complemento acaba con la costumbre de que los ingenieros diseñen cada uno por su lado, ofreciendo una herramienta que integra y diversifica los saberes que se necesitan en el complicado proceso de diseño de máquinas, reduciendo así en

un máximo la probabilidad de fracaso en el funcionamiento final de la máquina a diseñar.

Para el diseño del robot SCARA paralelo con 2 GDL, solo se usará un enfoque mecánico, para comprobar que el robot no presente colisiones entre sus componentes y pueda funcionar fluidamente y saber si es factible construir un prototipo en base a esta simulación.

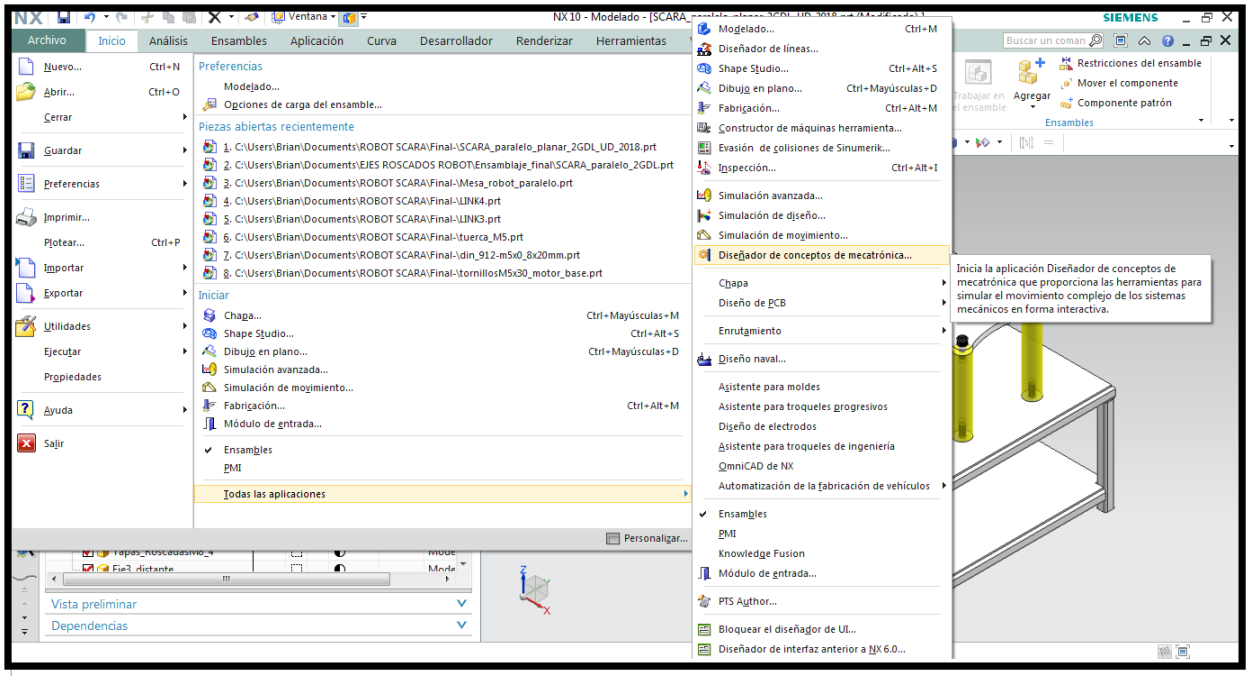


Figura 44. Llamada del complemento "Diseñador de conceptos de mecatronica".

Para llamar el complemento de “Diseñador de conceptos de mecatrónica” se debe de tener abierto el archivo del ensamble final y seguir la ruta tal como se muestra en la (Figura 44), Archivo ->Propiedades ->Todas las aplicaciones ->Diseñador de conceptos de mecatrónica, a continuación se podrá trabajar con el complemento.

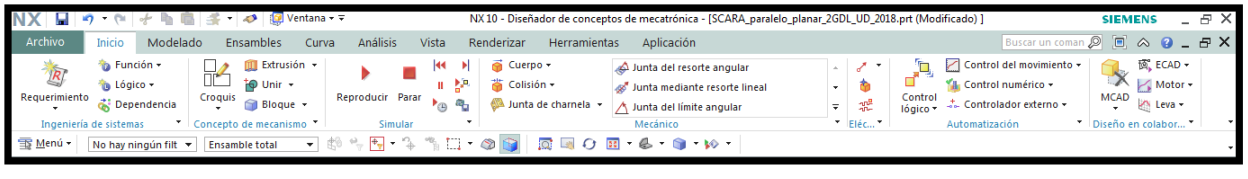


Figura 45. Barra de herramientas del ambiente de "Diseñador de conceptos de mecatrónica".

La (Figura 45) muestra la barra de herramientas principal, en este punto se procede a seleccionar el icono  “Cuerpo”, luego se desplegará una ventana con una serie de opciones:

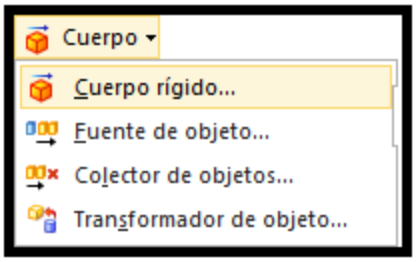


Figura 46. Menú de la herramienta "Cuerpo".

Como se muestra en la (Figura 46) se debe de seleccionar la opción de cuerpo rígido, una vez seleccionada se procede a seleccionar componentes de la interfaz de ensamble:

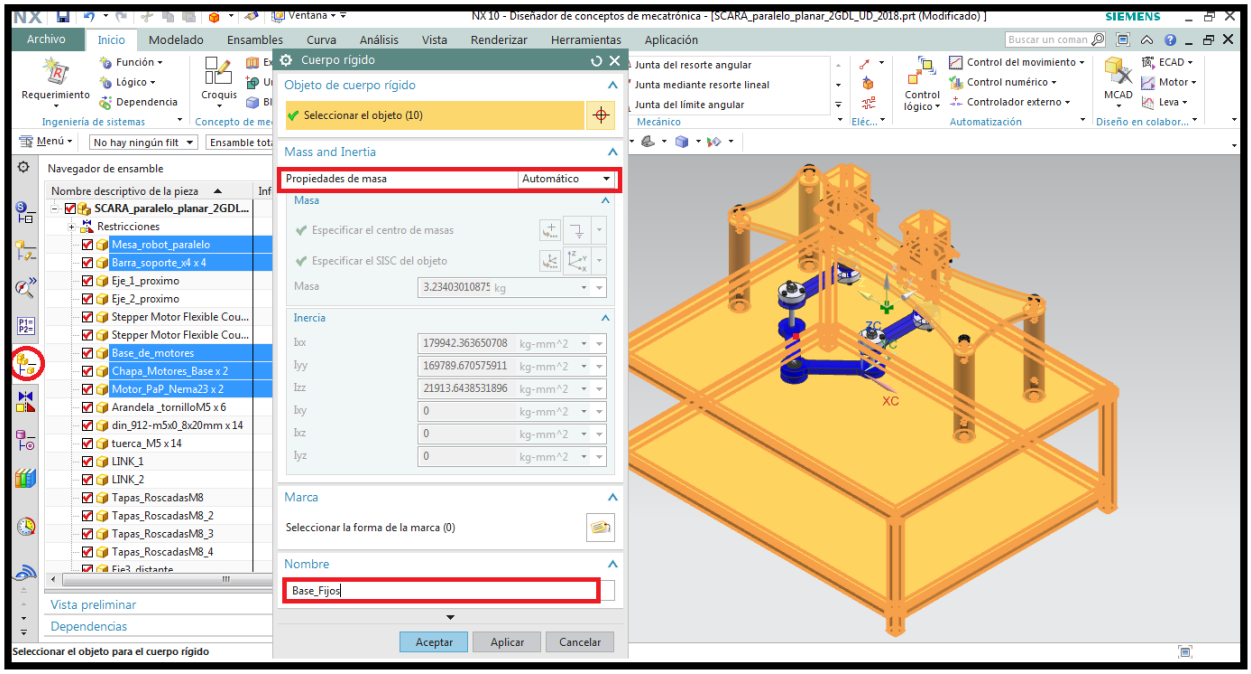


Figura 47. Asignación de características de cuerpo rígido para componentes fijos.

Tal y como muestra la (Figura 47) aparece una ventana llamada “Cuerpo rígido” donde se selecciona cada componente que no debe de tener ningún tipo de movilidad, mediante el icono visto en un círculo rojo  llamado “Navegador de ensamble”, se

puede seleccionar todos los componentes inmóviles, los componente seleccionados se pueden ver resaltados en color azul claro,(Figura 47). A este conjunto de componentes inmóviles se les llama en este caso Base_Fijos.

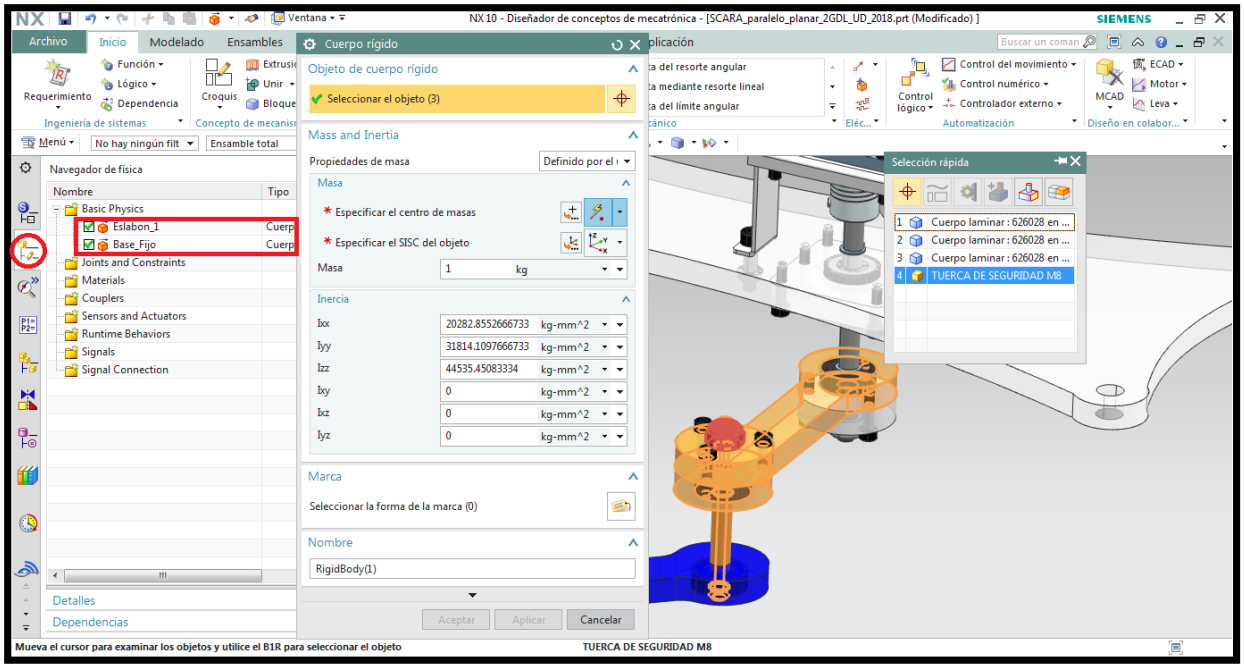


Figura 48. Asignación de características de cuerpo rígido para componentes móviles.

El paso a seguir es asignar características de cuerpo rígido a todos los componentes móviles del robot, los eslabones proximal y distal son los componentes móviles principales del robot, pero estos eslabones son móviles gracias a otros componentes secundarios que interactúan con ellos, es necesario incluir estos componentes secundarios a los eslabones proximal y distal para formar un solo cuerpo rígido tal y como se muestra en la (Figura 48), se puede tener control de los cuerpos rígidos ya asignados anteriormente seleccionando el icono visto en un círculo rojo  “Navegador de física” , en un rectángulo rojo se puede verificar que conjunto de componentes se han seleccionado como cuerpos rígidos ya que seleccionando alguno de ellos se permite hacer modificaciones a estas asignaciones.

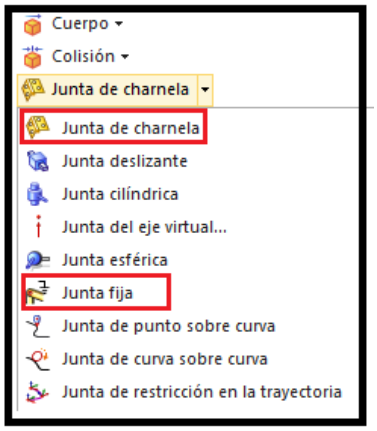


Figura 49. Menú de herramientas "Junta".

Después de definir todos los conjuntos de cuerpo rígido, dotando cada componente de masa y por ende susceptible al efecto de la gravedad, gracias a la asignación de material hecha a cada componente modelado en 3D, se procede a asignar a cada conjunto de cuerpo rígido un tipo de junta, para ello se debe de navegar en la barra de herramientas mostrada en la (Figura 45) y desplegar el menú que se visualiza en la (Figura 49), seguido a esto se selecciona el icono  "Junta fija".

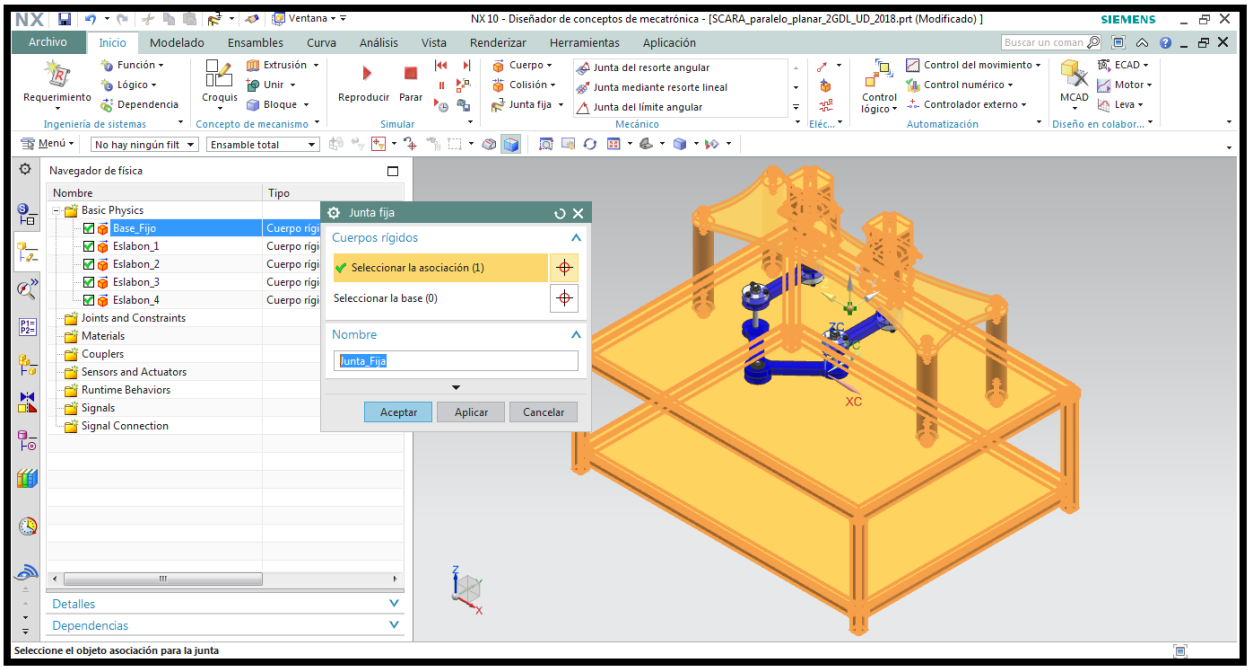


Figura 50. "Junta fija" conjunto de cuerpos rígidos inmóviles.

La (Figura 50) muestra una ventana llamada “Junta fija” donde se debe de seleccionar el conjunto de cuerpos rígidos anteriormente designado con el nombre de “Base_Fijos”, seleccionando el “Navegador de física”  . Como consecuencia todo este conjunto de cuerpos rígidos “Base_Fijos” no tendrán ningún GDL y permanecerá estático y evitara que al momento de reproducir la simulación este conjunto de cuerpos rígidos caigan al vacío a causa de la aceleración gravitacional, esta operación recibe el nombre de “Junta_Fija”.

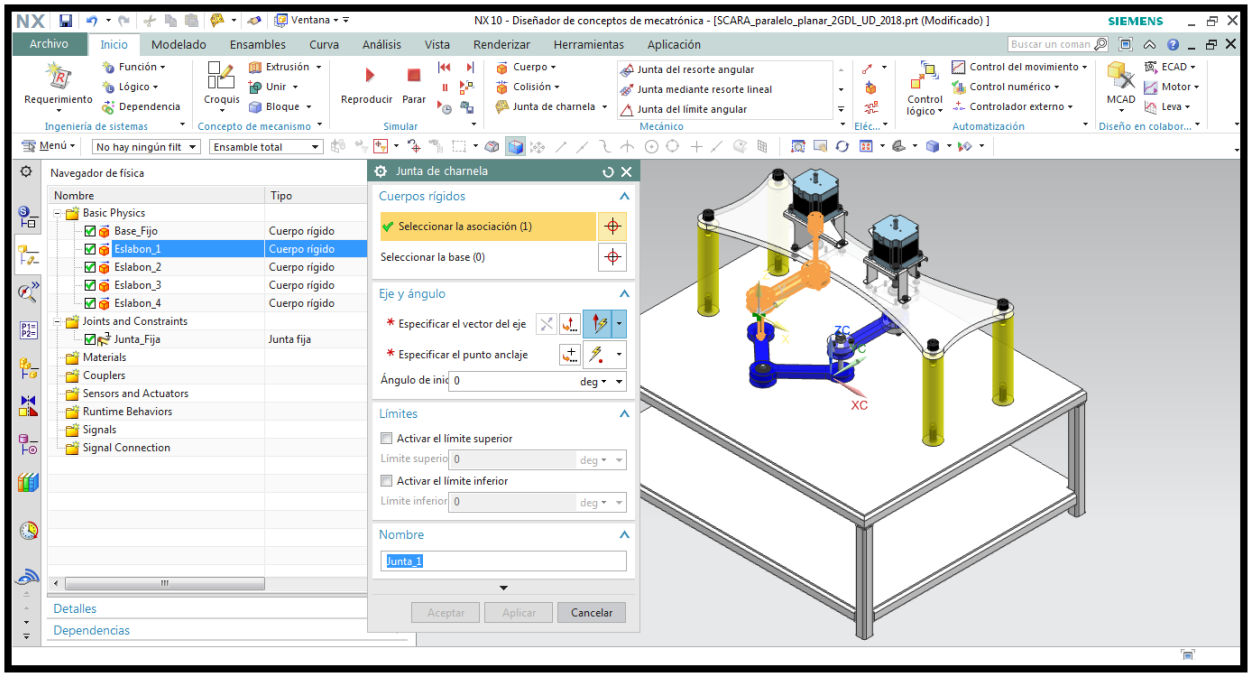


Figura 51. "Junta de charnela" cuerpos rígidos móviles.

Al terminar de definir por completo la junta fija del robot SCARA paralelo, se sigue el proceso definiendo las juntas móviles del robot, para ello se selecciona el icono “Junta de charnela” en este caso se maneja este tipo de junta por su simplicidad ya que simula el movimiento de una bisagra, pero en realidad puede seleccionarse otros tipos de juntas. Para definir estas juntas móviles se debe seleccionar el conjunto de cuerpos rígidos móviles los cuales se asignaron en la (Figura 48) en relación a los eslabones proximal y distal, este conjunto de cuerpos rígidos móviles se selecciona a través del “Navegador de física”  , esta selección se resalta en color azul claro en la (Figura 51), esta misma figura muestra una ventana muy importante llamada “junta de

charnela", donde la selección hecha en color azul claro corresponde a un cuerpo rígido de asociación, como es una junta de charnela y simula el movimiento de una bisagra, este cuerpo rígido de asociación debe de moverse respecto a otro cuerpo rígido base como se muestra en la siguiente figura:

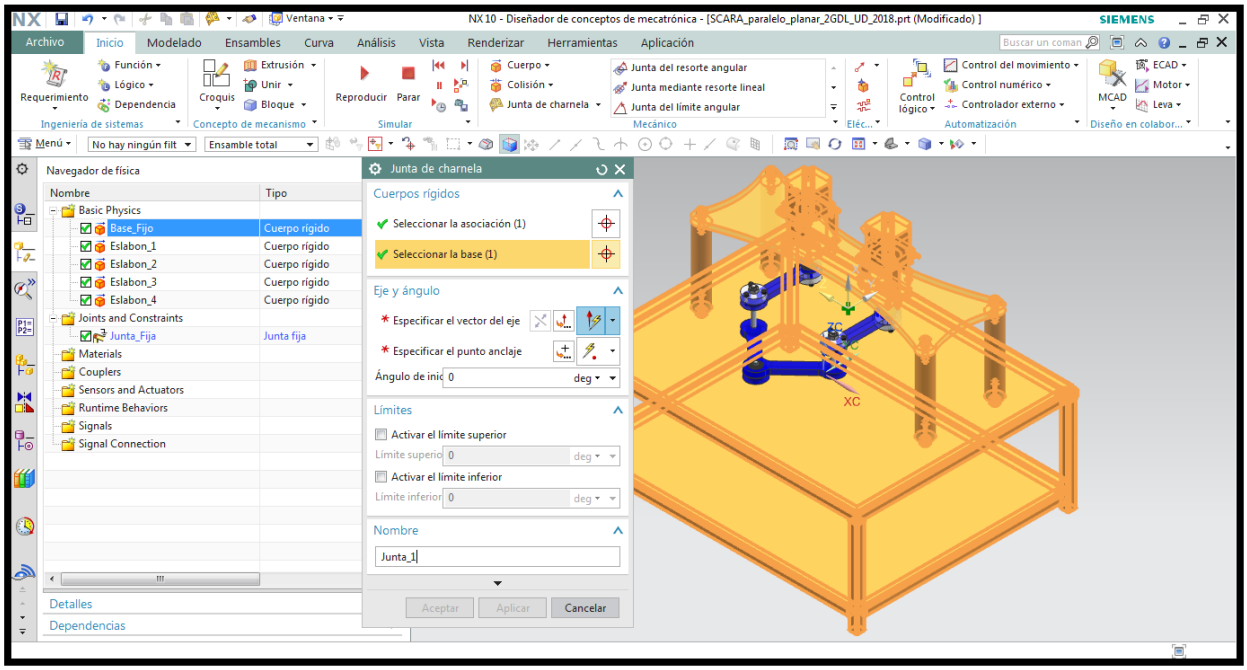
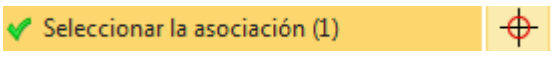
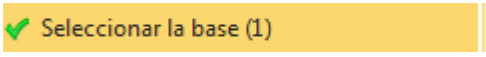


Figura 52. "Junta de charnela" cuerpos rígidos móviles en base y asociación.

Ahora en la ventana llamada "junta de charnela" de la (Figura 52) se evidencia una selección de cuerpo rígido llamado "Base_Fijos" selección hecha en color azul claro, esta selección corresponde al cuerpo rígido base, es decir, la selección de cuerpo rígido hecha en la (Figura 51) 

se moverá en relación a un cuerpo rígido seleccionado en la (Figura 52) 

, para terminar de definir en su totalidad la "Junta de charnela" , esta junta se llama "Junta_1".

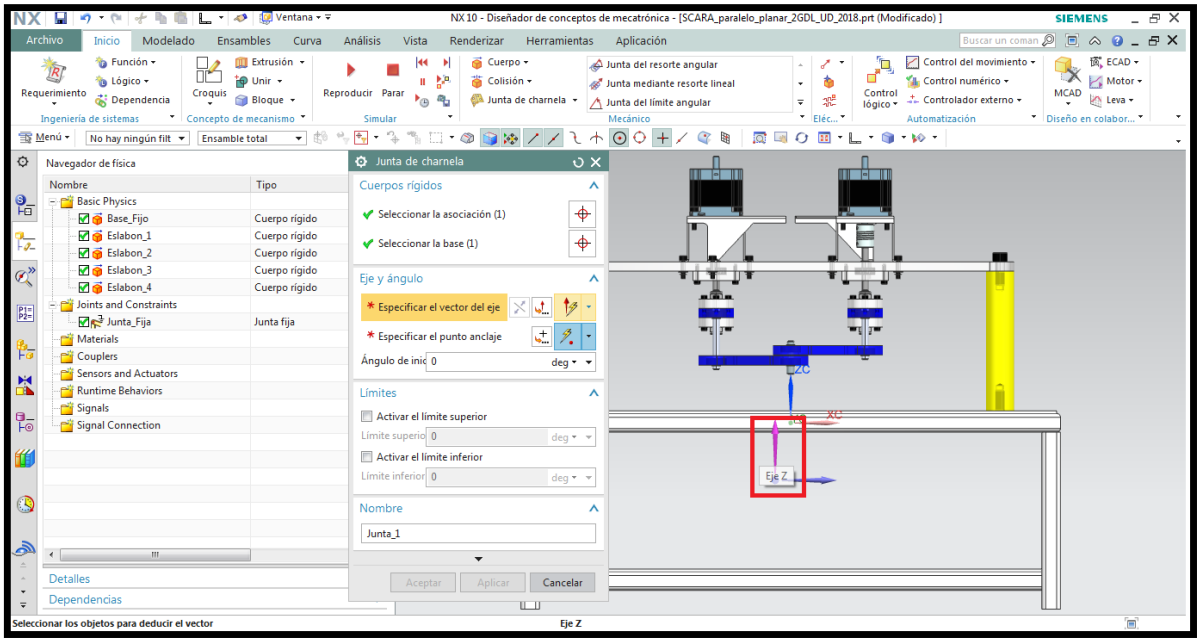
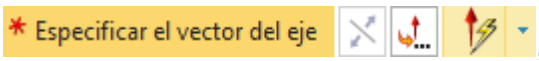


Figura 53. Eje de rotación para una junta de charnela.

La junta de charnela anteriormente definida, necesita moverse respecto a un eje de rotación tal y como se muestra en la ventana de la (Figura 53). 

, se lleva el cursor donde se resalta un rectángulo rojo y se selecciona como eje de rotación de la junta charnela el eje z.

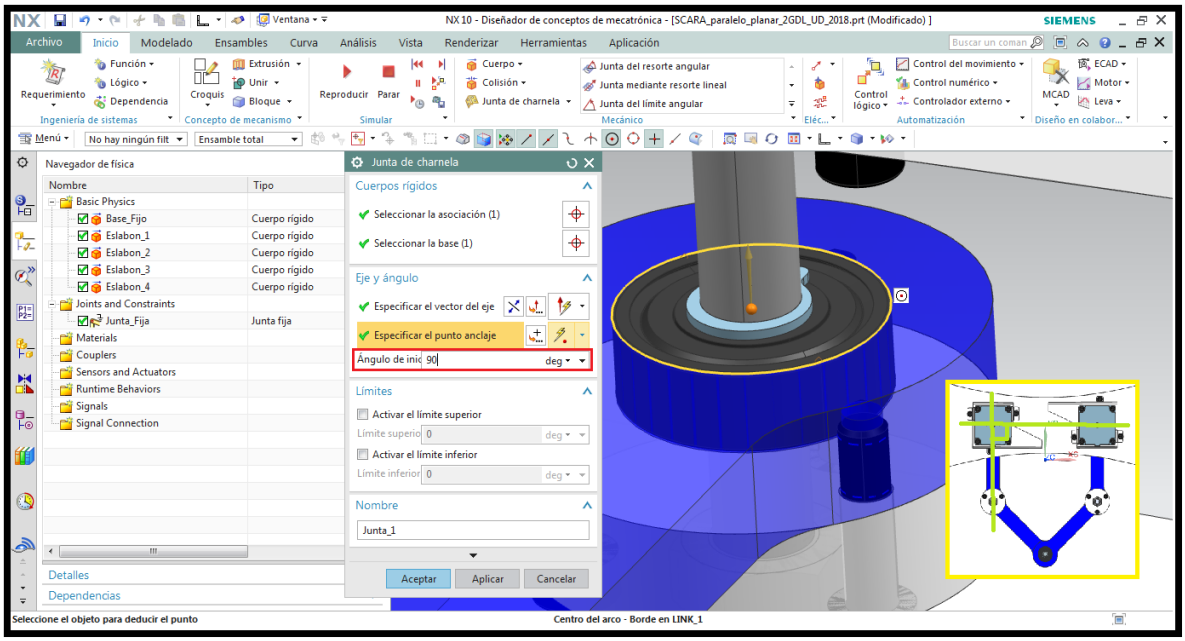
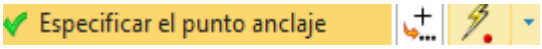


Figura 54. Punto de anclaje y ángulo de inicio para una junta de charnela

La (Figura 54) indica que se debe de seleccionar el 

de la junta de charnela, en este caso se debe de seleccionar el eje de rotación del eslabón proximal, en donde se llega el torque transmitido por los actuadores rotatorios (Motores a pasos), también en esta misma ventana se puede especificar el ángulo inicial de la junta charnela, definiendo así el ángulo inicial de los eslabones proximal como se muestra en el recuadro de color amarillo de la (Figura 54).

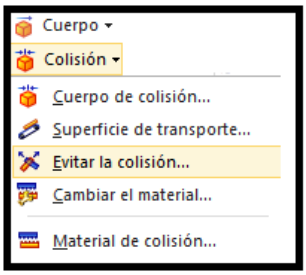


Figura 55. Menú de la herramienta "Colisión".

La (Figura 45) muestra la barra de herramientas principal, en este punto se procede a seleccionar el icono “Colisión”, luego se selecciona la opción evitar la colisión tal como se muestra en la (Figura 55).

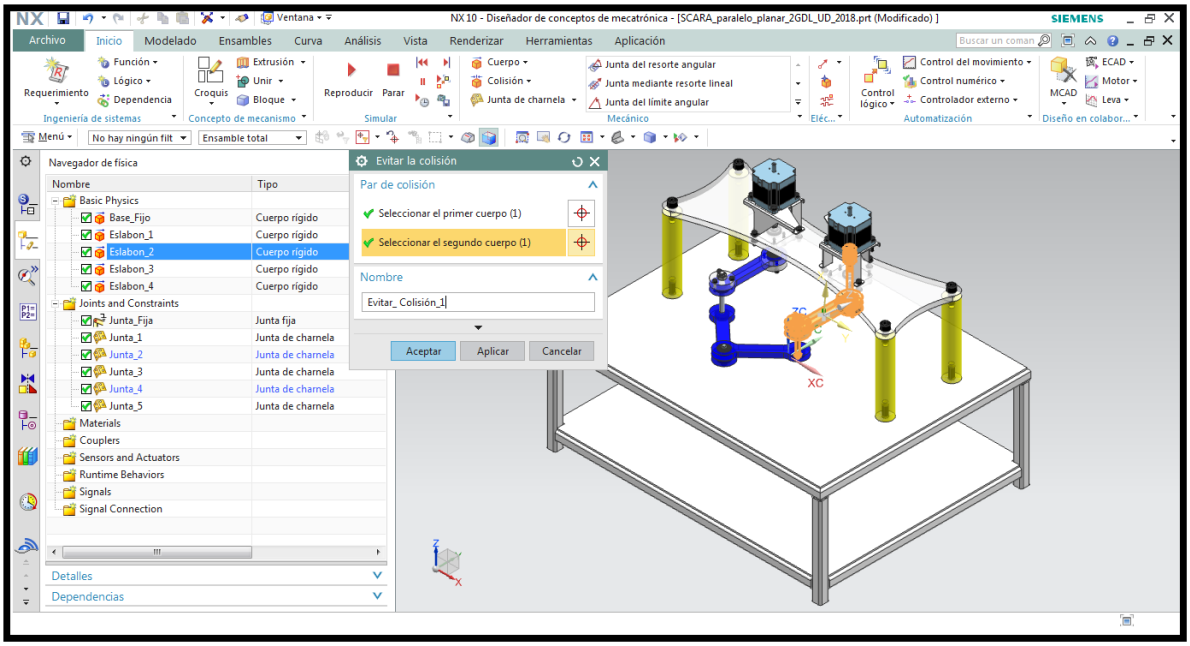


Figura 56. Evitar la colisión entre los eslabones proximal.

En el diseño del robot SCARA paralelo de 2 GDL, es de vital importancia evitar las colisiones entre los dos eslabones proximal, para ello se debe de seleccionar el cuerpo rígido correspondiente a cada eslabón proximal, tal como se indica en la (Figura 56).

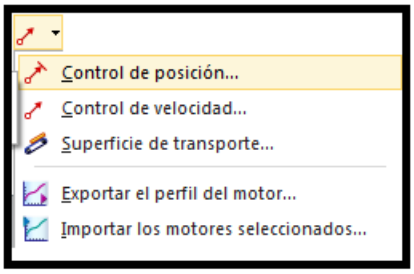


Figura 57. Menú de la herramienta "Actuadores".

La (Figura 45) muestra la barra de herramientas principal, en este punto se procede a seleccionar el icono “Actuadores”, luego se selecciona la opción “control de posición” (Figura 57) la cual tiene como objetivo mover objetos a lo largo de un eje hasta una posición dada.

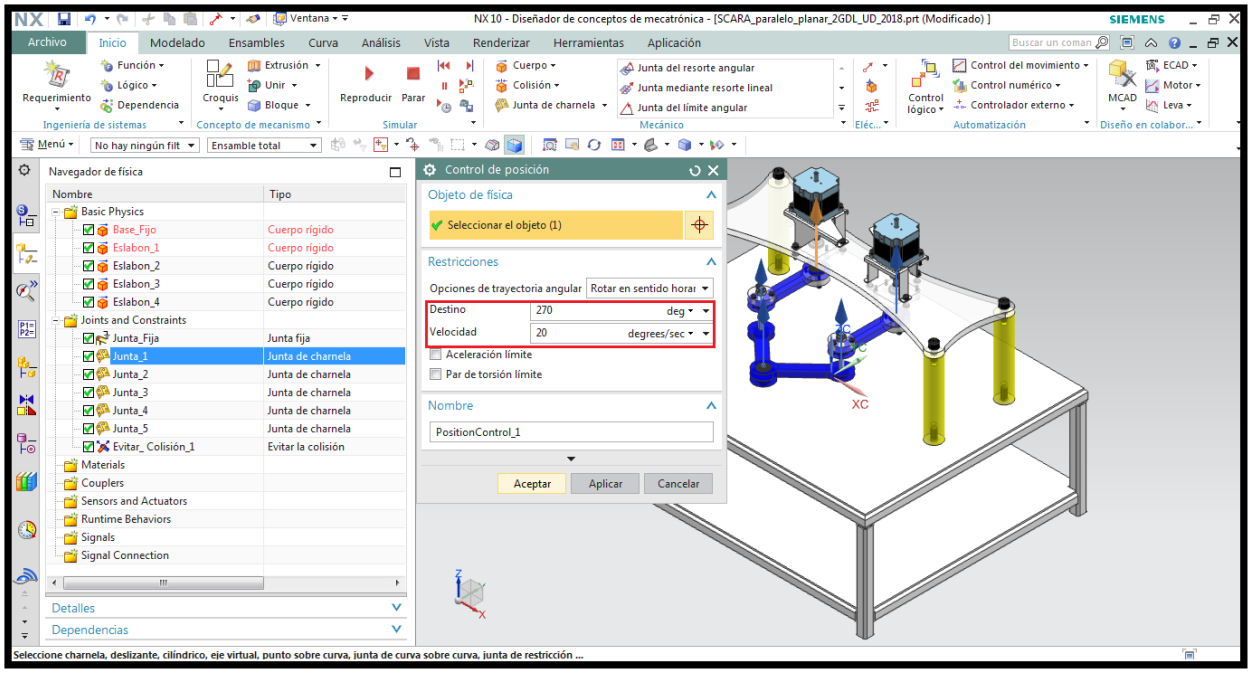


Figura 58. Control de posición para los eslabones proximal.

Luego de seleccionar la opción “control de posición” se visualiza una ventana nueva llamada “control de posición” la cual se indica en la (Figura 58) la cual permite añadir restricciones a una junta móvil, en ese caso a la junta móvil de charnela “Junta_1”,

estas juntas móviles solo corresponden a los eslabones proximal, ya que son los únicos eslabones que reciben movimiento directamente de los motores paso a paso, selección resaltada en color azul claro tal y como se indica en la (Figura 58) 

, en esta misma ventana de “control de posición” es posible configurar el sentido de giro, el ángulo de destino respecto al ángulo ya definido en la (Figura 54), y la velocidad deseada para completar ese ángulo de barrido.

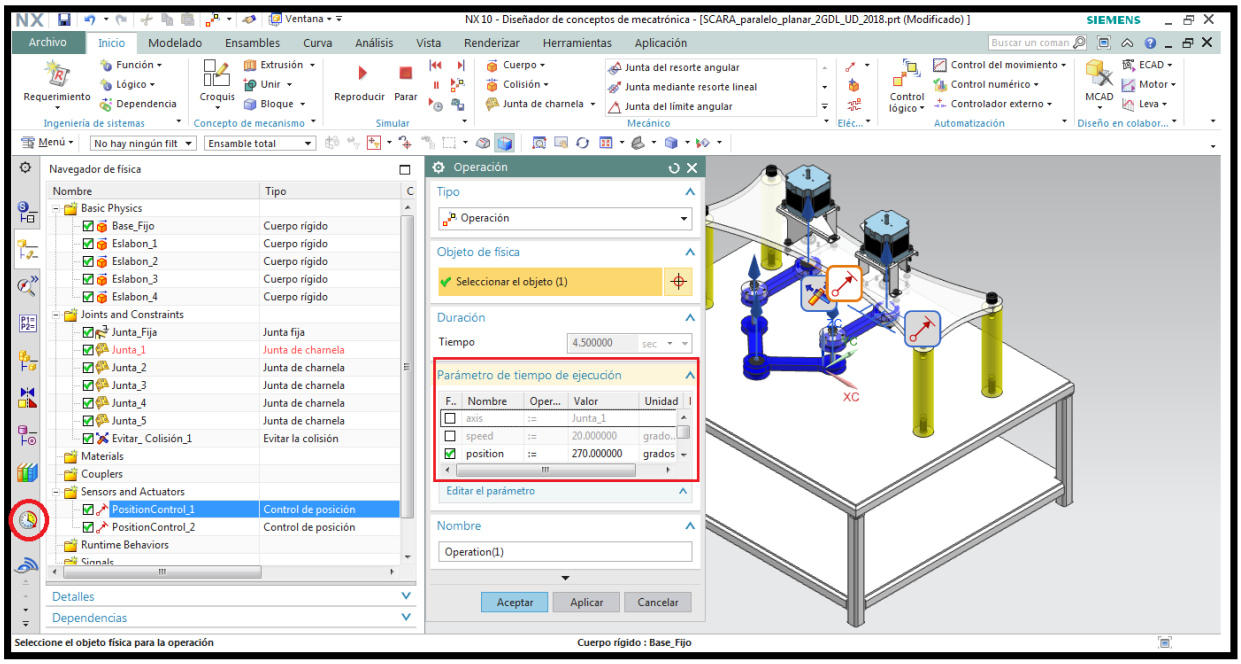


Figura 59. Operaciones para generar secuencias de movimiento en juntas móviles.

La (Figura 45) muestra la barra de herramientas principal, en este punto se procede a seleccionar el icono “Control lógico”, luego seleccionar la opción -> Operación, después seleccionar estos iconos, el software presenta una ventana como la que se indica en la (Figura 59), en esta figura se debe de seleccionar un actuador en este caso 

, una vez seleccionado el software crea una operación en la cual es posible cambiar algunas variables ya definidas en la (Figura 54), a continuación se selecciona el icono encerrado en una circunferencia roja la cual se indica en la (Figura 59) ”Editor de secuencia” este icono tiene como principal objetivo llevar al usuario a la siguiente ventana:

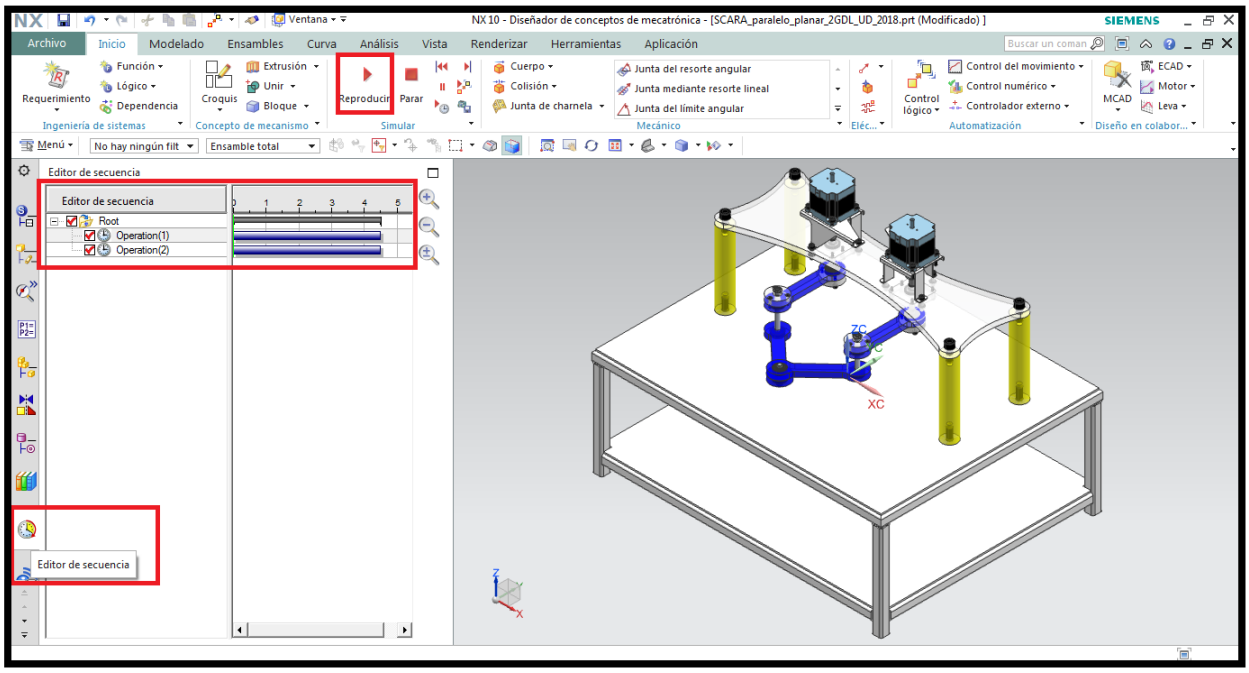
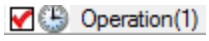


Figura 60. Editor de secuencias para juntas móviles.

La (figura 60) muestra la cantidad de operaciones que pueden existir en la simulación de una máquina,  cada una de estas puede ser copiada, pegada y modificada en el espacio del editor de secuencias con el fin de generar una mayor combinación de movimientos al seleccionar el icono  "Reproducir", la barra azul visualizada en (Figura 60)  representa la duración de una operación en particular, y la barra  representa la totalidad de tiempo que puede llevar una simulación con x operaciones.

Anexo al presente documento se aporta un video donde se muestra diferentes trayectorias realizadas por el robot SCARA paralelo, dicha simulación está libre de colisiones e interferencias mecánicas, es decir que es factible construir un prototipo en base a este diseño.

6.7 SELECCIÓN Y ESPECIFICACIONES DE ACTUADORES.

La selección de los actuadores rotatorios en este caso motores paso a paso tipo NEMA está sujeto a una de las restricciones de diseño, la cual es usar componentes electrónicos o actuadores reciclados y dados de baja, estos actuadores hacían parte de máquinas fotocopiadoras que ya no están en uso, de acuerdo a esto tenemos:

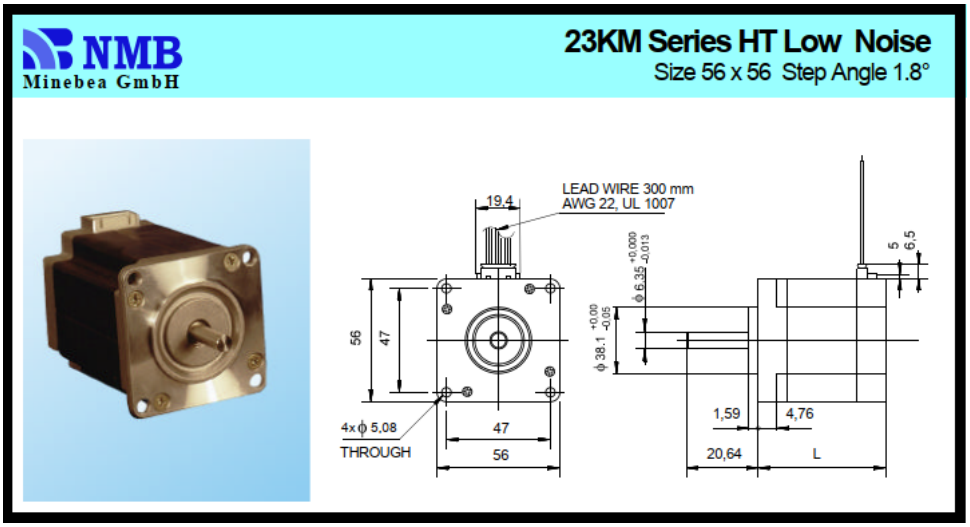


Figura 61. Motor a pasos NEMA 23.

La (Figura 61) muestra las dimensiones más importantes en la geometría del motor a pasos NEMA 23, este número representa una nomenclatura de estandarización para el tamaño de los motores, siendo 23 un número variable, se determinó que el motor es geométricamente apto para funcionar con el resto del conjunto del robot SCARA paralelo a construir por medio de un acople flexible tal como se muestra en la sección de diseño detallado.

NMB Partnumber	Step Angle [Deg]	Drive Mode	Holding Torque [Ncm]	Current per Phase [A]	Resistance per Phase [Ω]	Inductance per Phase [mH]	Detent Torque [Ncm]	Rotor Inertia [gcm²]	Weight [g]	L [mm]
23KM-K213V	1.8	Unipolar	40	2.0	1.3	1.9	2.0	150	470	42
23KM-K263V	1.8	Bipolar	46	2.0	1.3	3.6	2.0	150	470	42
23KM-K307V	1.8	Unipolar	58	2.0	1.5	2.4	3.0	230	590	50
23KM-K308V	1.8	Bipolar	63	2.0	1.5	3.8	3.0	230	590	50
23KM-K033V	1.8	Unipolar	74	3.0	0.9	1.7	4.0	280	680	54
23KM-K043V	1.8	Bipolar	84	3.0	0.9	2.4	4.0	280	680	54
23KM-K101V	1.8	Unipolar	103	3.0	1.0	1.8	5.0	400	900	67
23KM-K102V	1.8	Bipolar	118	3.0	1.0	2.5	5.0	400	900	67
23KM-K732V	1.8	Unipolar	118	1.5	4.2	8.0	6.0	440	1,050	76
23KM-K733V	1.8	Unipolar	118	3.0	1.1	3.8	6.0	440	1,050	76
23KM-K743V	1.8	Bipolar	133	3.0	1.1	5.6	6.0	440	1,050	76
23KM-K723X	1.8	Bipolar	158	3.5	0.7	2.4	6.0	440	1,050	76

General Specification

Step Angle Accuracy:	5%
Temperature Rise:	80°C max.
Ambient Temperature Range:	-20° to +50°C
Insulation Resistance:	100 MΩ min. 500 VDC
Insulation Class:	B (130°C)
Dielectric Strength:	500 VAC for 1 min.
Radial Play:	0.02 mm max. (450 g load)
End Play:	0.08 mm max. (450 g load)

Options

Rear Shaft, Encoder, Gearbox, Connector Assembly

Winding Diagram

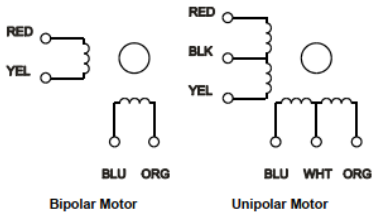


Figura 62. Especificaciones técnicas motor NEMA 23

Se tiene en la (Figura 62) que el motor tiene una precisión de Angulo recorrido por paso de 1.8° grados por paso, lo cual lo hace aceptable para la aplicación de nuestro robot SCARA paralelo de 2 GDL, es decir que en las pruebas de funcionamiento se trabajará con ángulos exactos múltiplos de 1.8°.

El motor NEMA 23 es un motor unipolar de 6 cables, el hecho de que sea unipolar no afecta negativamente en la instalación y control de los mismos.

El fabricante también aporta el orden de las bobinas, las cuales deben de tener un orden de funcionamiento, ya que deben de describir un movimiento angular constante ya sea en dirección horaria o anti- horaria, el orden de las bobinas es:

- Amarillo
- Azul
- Rojo
- Naranja
- Negro y Blanco son comunes.

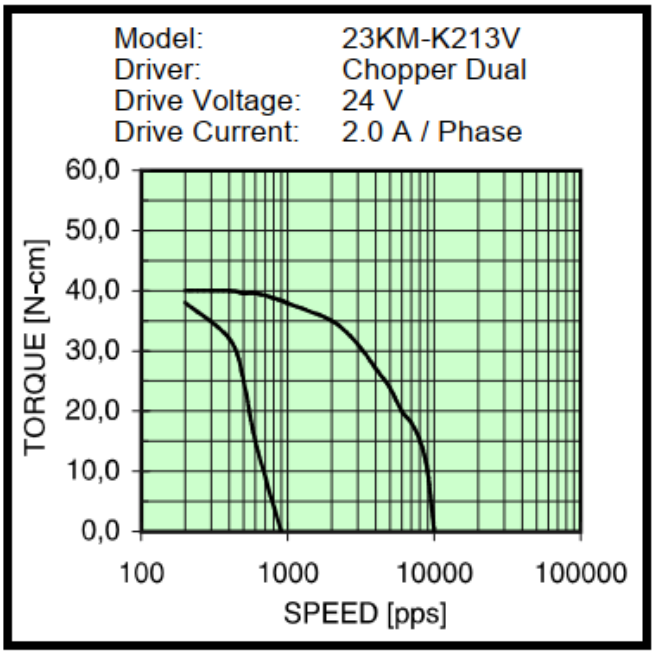


Figura 63. Grafica Torque vs Velocidad Motor NEMA 23.[29]

[29] Figura 61, 62 y 63. Tomadas de: (NMB Minebea GmbH)

El fabricante muestra en la (Figura 63) una gráfica de Torque vs Velocidad para el motor NEMA 23 seleccionado, se quiere que los motores tengan la capacidad de mover todo el conjunto del robot SCARA paraelo para ello se necesita de un alto rendimiento del torque, el fabricante recomienda usar un voltaje de 24 V (voltios) de suministro al driver del motor a pasos, ya que así el motor aportará su máximo torque (0.4 Nm), pero para ello el motor debe de funcionar a bajas velocidades, lo cual no es un problema puesto que el robot SCARA paralelo está diseñado con fines didácticos y de investigación.

6.8 CÁLCULOS.

6.8.1 CAPACIDAD DE CARGA PARA LOS ACTUADORES.

Para el correcto análisis de todos los cálculos, se debe de elegir un método para estudiar toda la cadena cinemática cerrada que conforma el robot SCARA paralelo de 2 GDL (Figura 18), y con base a esa figura tenemos que:

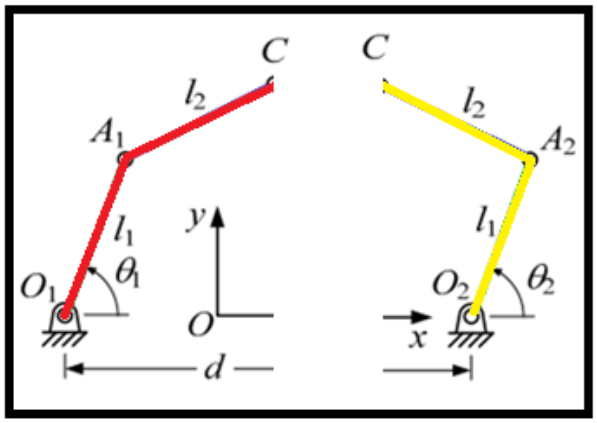


Figura 64. Transformación a dos cadenas cinemáticas abiertas.[30]

La cadena cinemática cerrada presentada en la (Figura 18) se ha transformado en dos cadenas cinemáticas abiertas tal y como se muestra en la (Figura 64), la primera cadena cinemática abierta representada en color rojo, y la otra con color amarillo, tienen en común el punto ***C***. los cálculos de capacidad de carga de los actuadores y los cálculos de resistencia estructural se realizan estudiando cada cadena cinemática abierta por separado; como ambos motores seleccionados son exactamente iguales,

[30] Figura 64. Tomada y modificada de: (Bourbonnais & Bonev, 2010)

solo se debe de analizar una sola cadena cinemática abierta, los cálculos responden preguntas tales como:

- ¿los actuadores tienen la capacidad para soportar y movilizar todos los elementos mostrados en la sección del diseño detallado?
- ¿Según las especificaciones técnicas de los actuadores, cual es la carga máxima que se ubicada en el punto ***C*** según la (Figura 20) con la cual el robot SCARA paralelo de 2 GDL puede trabajar sin dificultad alguna?,
- ¿El material y la geometría de los eslabones proximal y distal del robot SCARA paralelo de 2 GDL puede trabajar sin deformaciones, bajo el control de los actuadores seleccionados?
- ¿Qué carga máxima puede soportar el material y geometría de los eslabones proximal y distal?

NOTA: Las dos cadenas cinemáticas abiertas mostrada en la (Figura 64) componen una sola cadena cinemática cerrada mostrada en la (Figura 18), se realizará todos los cálculos pertinentes para una de las dos cadenas cinemáticas abiertas, se tendrá en cuenta solo los resultados y análisis de cada motor por separado ya que no se puede sumar las capacidades de ambos motores, debido a que en su funcionamiento habrá momentos en que un motor trabaje y el otro no y viceversa.

Para saber si los actuadores anteriormente descritos pueden soportar el peso de la cadena cinemática cerrada, como el robot SCARA paralelo a diseñar tiene 2 GDL, se debe de seleccionar como conjunto de análisis los elementos mostrados en la siguiente figura.

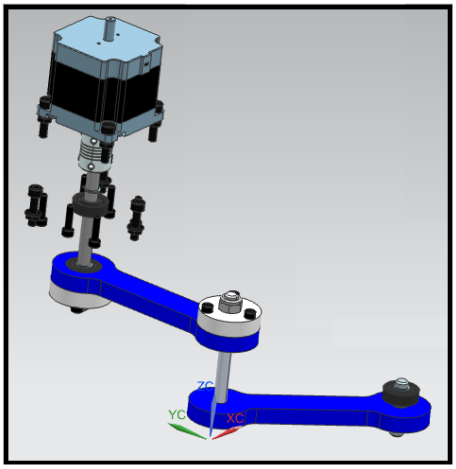


Figura 65. Elemento a analizar para la capacidad de carga del motor.

La (Figura 65) muestra el conjunto de partes que se deben de analizar para saber si los motores tienen la capacidad de soportar y mover la carga presente en el robot, y si es así cuál es la máxima y mínima carga que estos pueden soportar y movilizar, se tiene para el análisis, el conjunto de componente secundarios que definen el cuerpo rígido de un eslabón proximal, el conjunto de componentes secundarios que definen un eslabón distal y el efector final del robot, elementos mostrados en la (Figura 65), y que se muestran de forma más detallada en los Anexos del presente documento.

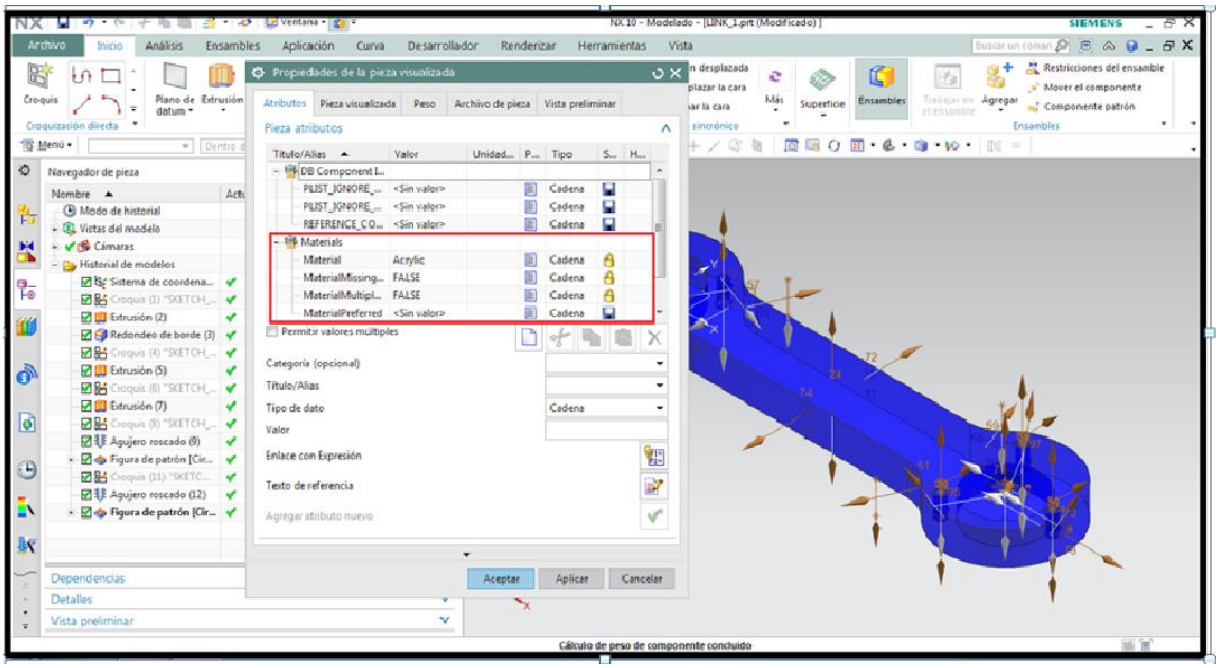


Figura 66. Ruta para encontrar propiedades de un eslabon proximal.

La (Figura 66) muestra cómo encontrar las propiedades de un componente mediante el software Siemens NX 10.0®, en este caso la pieza en cuestión es un eslabón proximal.

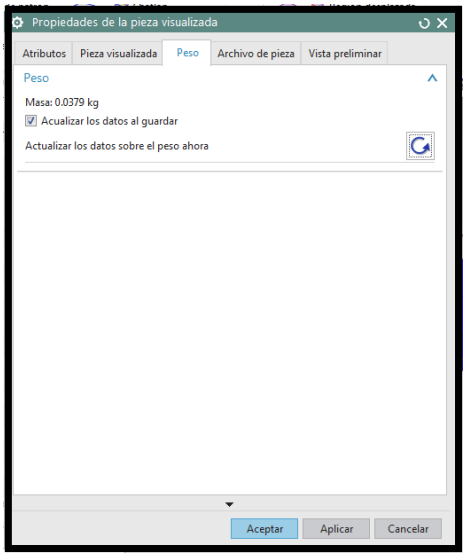


Figura 67. Propiedad "masa" para un eslabón proximal.

La (Figura 67) muestra una propiedad fundamental que es la masa del elemento en cuestión, con este valor se puede realizar los cálculos correspondientes, este procedimiento debe de seguirse para uno y cada uno de los componentes mostrados en la (Figura 65), siguiendo los pasos de las (Figuras 66 y 67).

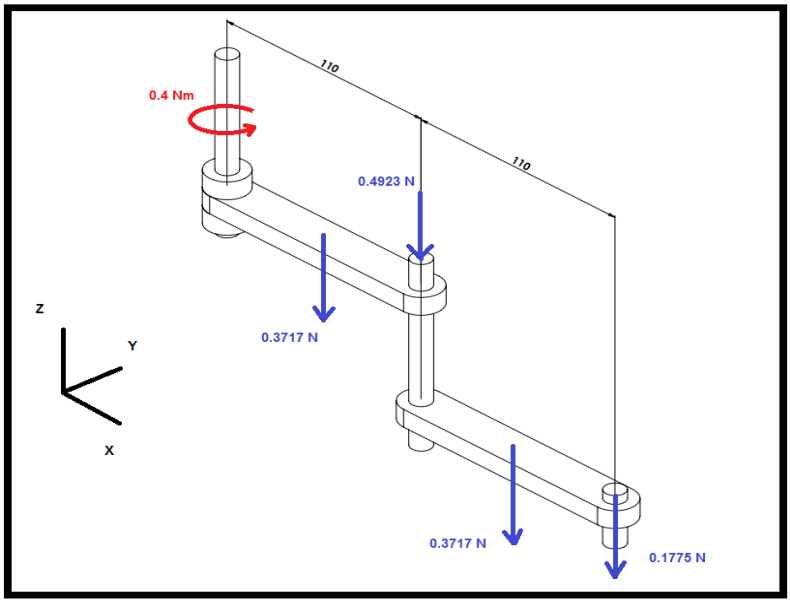


Figura 68. Simplificación de la figura 65.

La (figura 68) muestra una simplificación de la (Figura 65), mostrando un diagrama de cuerpo libre para dicha figura con los pesos en N (Newton) ya asignados para cada uno de los componentes mostrados en la (Figura 65)

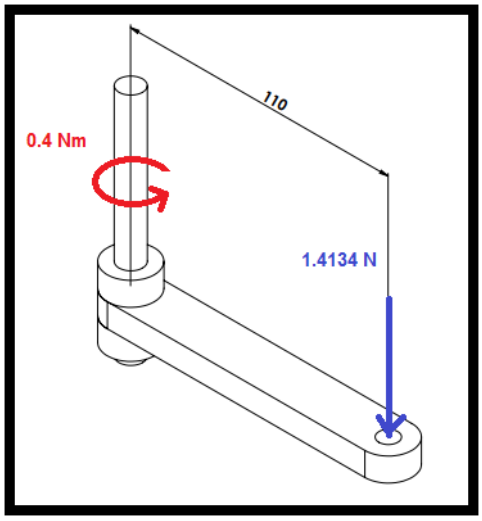


Figura 69. Traslación de fuerzas de la Figura 69.

La (Figura 69) simplifican aún más el diagrama de cuerpo libre mostrado en la (Figura 69), trasladando las fuerzas pertinentes al punto de anclaje entre el eslabón proximal y distal. Con base a la (Figura 69) se tiene:

$$Torque = Fuerza * distancia$$

$$T = F * d$$

$$T = 1.4134\ N * 0.11\ m$$

$$\boldsymbol{T = 0.15548\ Nm}$$

Este es el torque mínimo real que se necesita para poder soportar una carga de 1.4134 N y además poder mover sin dificultad esta misma carga.

Como dato principal tenemos que el motor tiene un Holding Torque (Torque de Mantenimiento) de 0.4 Nm, pero dato no aporta el torque máximo que tiene el motor seleccionado para mover la carga especificada, puesto que el holding torque hace referencia al par que se necesita para desviar el rotor del motor desde una posición inicial a una final mediante un paso y mantenerse firmemente en aquella posición final,

cuando se aplica un par que excede el valor del holding torque, tenemos que el rotor girará continuamente.

El dato que se necesita para conocer la máxima carga que puede soportar el motor a pasos seleccionado es el Working Torque (Torque de trabajo), este par depende de las características dinámicas del motor y del valor de la carga a soportar por el mismo, el fabricante del motor generalmente ofrece unas curvas denominadas arranque sin error (pull-in) que relaciona el par en función de los pasos, lo que es útil para aproximar un valor del Working Torque. Si no se poseen estas curvas, se puede también aproximar el valor dependiendo del valor numérico del Holding Torque, se sabe que el Working Holding o cualquier otro par debe de ser menor al Holding torque para que le rotor no gire sin control alguno, teniendo claro esto se tiene:

$$Holding\ Torque = 40\ Ncm = 0.4\ Nm$$

$$Holding\ Torque\ > Working\ Torque$$

$$Working\ Torque = 0.8 * Holding\ Torque$$

Siendo 0.8 un factor de seguridad para asegurar que el Working Torque sea menor que el Holding Torque.

$$Working\ Torque = 0.32\ Nm$$

Obteniendo el valor de Working Torque, se puede calcular la carga máxima que el motor seleccionado podrá soportar y movilizar, decimos que el torque máximo que puede ofrecer los motores NEMA 23 es de 0.32 Nm, es decir que la carga máxima que pueden soportar estos motores es de:

$$0.32\ Nm = F_{maxima} * 0.11\ m$$

$$F_{maxima} = \frac{0.4\ nm}{0.11\ m}$$

$$\boldsymbol{F_{maxima} = 2.9090\ N}$$

La fuerza F_{maxima} **= 2.9090 N** es la carga máxima que puede soportar y movilizar cada motor seleccionado, es decir que el peso de cada una de las cadenas cinemáticas abiertas del robot SCARA paralelo de 2 GDL a diseñar no puede sobrepasar este valor, ya que de ser así los motores no podrán funcionar, afortunadamente para nuestro diseño cada cadena cinemática abierta tiene un peso de **1.4134 N.**

Al analizar y comparar los resultados de estos cálculos se puede asegurar que el motor a pasos seleccionado puede soportar perfectamente la carga presente en el robot SCARA paralelo de 2 GDL que se está diseñando en el presente documento, el torque necesario para movilizar la carga es de **0.15548 Nm,** y los actuadores ofrecen un máximo de **0.32 Nm.**

6.8.2 RESISTENCIA ESTRUCTURAL

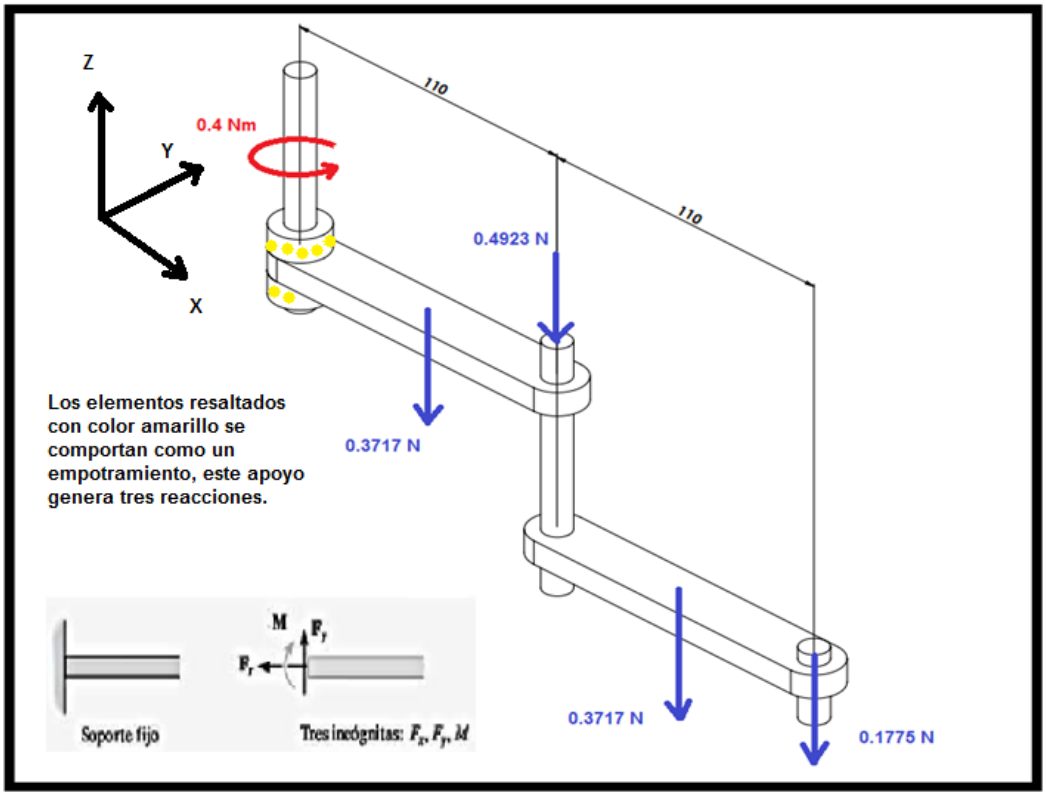


Figura 70. Simplificación y tipo de apoyo en el punto A.

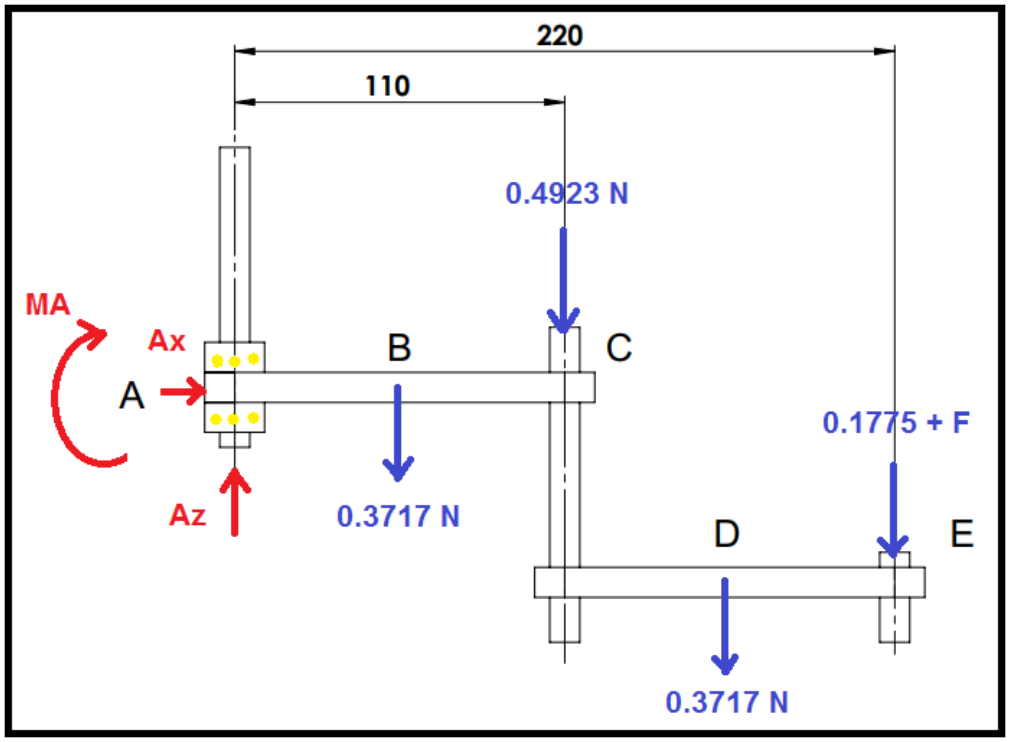


Figura 71. Diagrama de cuerpo libre y reacciones en el punto A.

Retomando el dato de F_{maxima} **= 2.9090 N** anteriormente encontrado, podemos decir que esta es la carga máxima que puede soportar una cadena cinemática abierta, interpretando la (Figura 71) se dice que la reacción $\mathbf{A_Z}$ es igual a **2.9090 N,** dejando como incógnita la variable **F**, la cual representa el peso extra permisible que puede llevar el efector final de acuerdo a las limitaciones y especificaciones de los actuadores seleccionados. ($\mathbf{A_x}$ es un valor no importante para los siguientes cálculos)

$$\sum \mathbf{F(Z)} = \mathbf{0} = \mathrm{A_Z} - 0.3717\mathrm{N} - 0.4923\mathrm{N} - 0.3717\mathrm{N} - 0.1775 - \mathrm{F}$$

$$\mathbf{F = 1.4958N}$$

$$\sum \mathbf{M(A)} = \mathbf{0} = -\mathrm{M_A} - \left(0.3717\mathrm{N} * \frac{0.11}{2}\mathrm{m}\right) - (0.4923\mathrm{N} * 0.11\mathrm{m}) - (0.3717\mathrm{N} * 0.165\mathrm{m}) - (1.6733\mathrm{N} * 0.22\mathrm{m})$$

$$\mathbf{M_A = -0.5040\ Nm}$$

Al obtener estos datos se procede a graficar los diagramas de fuerza cortante **(V vs m)** y el diagrama de momento flector **(M vs m).**

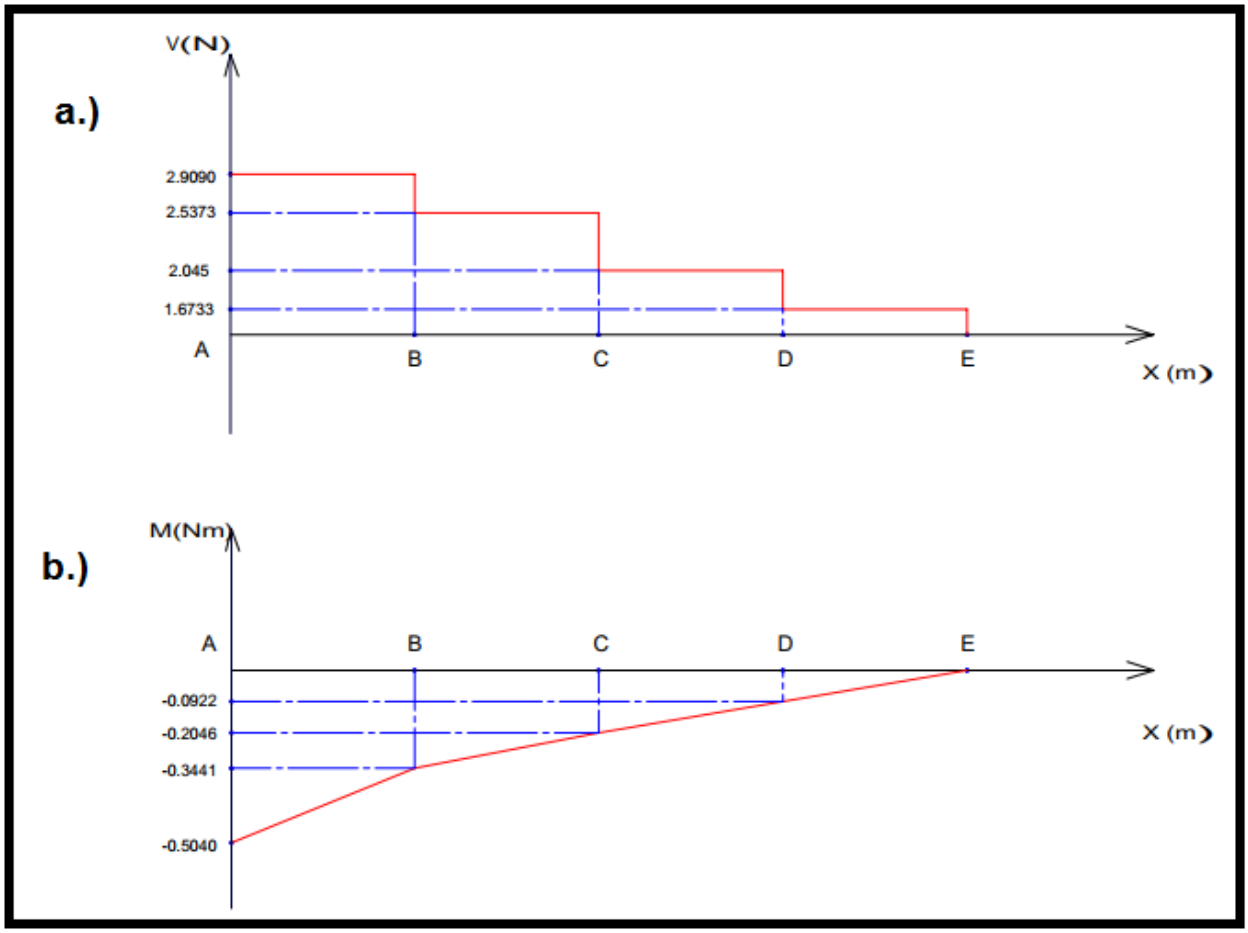
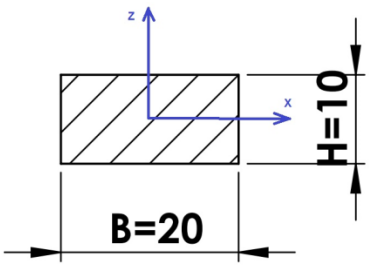


Figura 72. a.)Diagrama fuerza cortante, b.)Diagrama momento flector

El momento flector máximo es **M = 0.5040 Nm** según el diagrama de momento flector mostrado en la (Figura 72.b), obtenido este momento flector máximo se procede a encontrar el esfuerzo máximo al cual está sometido la cadena cinemática abierta, pero antes se debe de encontrar el modulo elástico de la sección critica del elemento **S**, el cual depende únicamente de la sección transversa. De dicha sección crítica, esta sección crítica corresponde al área transversal de los eslabones proximal y distal, las dimensiones de dichos elementos se ven detalladamente en los planos de fabricación anexos al presente documento. Para el cálculo del módulo elástico de la sección se tomará en cuenta la tabla del **Apéndice A** llamada propiedades de las áreas.



$$\sigma_{max} = \frac{|M|}{S}$$

$$S = \frac{BH^2}{6}$$

$$S = \frac{0.02m * 0.01^2}{6} = 3.3333x10^{-7}m^3$$

$$\sigma_{max} = \frac{0.5040Nm}{3.3333x10^{-7}m^3} = 1.51201512\ MPa$$

$\boldsymbol{\sigma_{max} = 1.51201512\ MPa}$ Es el criterio admisible, es el esfuerzo máximo que se desarrolla según las cargas mostradas en la (Figura 71), según las limitaciones y especificaciones técnicas de los actuadores seleccionados, en el **Apéndice B** del presente documento se ofrece la tabla de las propiedades típicas de algunos plásticos, fijando así la atención en el material **Acrílico estándar** la propiedad de interés es la resistencia a la flexión puesto que toda la cadena cinemática abierta está sometida a esfuerzo de flexión, $\boldsymbol{\sigma_{Flexión} = 110\ MPa}$ siendo este dato el criterio de falla,. Es decir que $\boldsymbol{\sigma_{max}}$ no puede ser mayor a, $\boldsymbol{\sigma_{Flexión}}$ ya que la cadena cinemática fallaría por esfuerzo de flexión, se puede observar que este caso no se da, es decir que la cadena cinemática abierta no fallara por flexión en las condiciones dadas en la (Figura 71), con estos datos se puede calcular el factor de diseño o de seguridad:

$$F.S. = \frac{Criterio\ de\ falla}{Criterio\ admisible}$$

$$F.S. = \frac{110\ MPa}{1.51201512\ MPa} = 72.75$$

El factor de diseño es 72.75, es un factor de diseño excesivamente alto es decir que los eslabones proximal y distal, según las condiciones dadas en la (Figura 71) tienen un altísimo grado de seguridad.

Conociendo que el robot SCARA paralelo de 2 GDL, soporta las cargas con las cuales fue diseñado sin presentar deformaciones, se desea a continuación calcular la carga máxima que puede soportar el robot SCARA paralelo de 2 GDL sin depender del Working Torque de los actuadores seleccionados y dependiendo únicamente de su geometría y propiedades de su material, seleccionando un factor de seguridad más bajo siguiendo los lineamientos ya antes expuestos en el marco teórico del presente documento sección **5.9.**

$$F.S. = (4.0 - 8.0)$$

$$F.S. = 6.0$$

$$F.S. = \frac{\sigma_{Flexión}}{\sigma_{max}} \quad = \quad 6.0 = \frac{110\ MPa}{\sigma_{max}}$$

$$\sigma_{max} = \frac{110\ MPa}{6.0} = 18.3333\ MPa$$

$$\sigma_{max} = \frac{|M|}{S}$$

$$|\boldsymbol{M}| = \boldsymbol{\sigma_{max} * S} \quad = \quad \boldsymbol{M = 18.3333\ MPa * 3.3333x10^{-7}m^3 = 6.11103\ Nm}$$

$\boldsymbol{M = 6.11103\ Nm}$ Es el momento flector máximo y este se ubica en el punto **A** como se indica en la (Figura 71), en ese orden de ideas este momento flector sería igual a $\mathbf{M_A}$ aclarando esto se debe de calcular el valor de **F** especificado en la (Figura 71), teniendo en cuenta que este valor de **F** ya no depende del Working Torque de los actuadores.

$$\sum \mathbf{M(A)} = \mathbf{0} = -\mathrm{M_A} - \left(0.3717\mathrm{N} * \frac{0.11}{2}\mathrm{m}\right) - (0.4923\mathrm{N} * 0.11\mathrm{m}) - (0.3717\mathrm{N} * 0.165\mathrm{m}) - [(0.1775 - F) * 0.22]$$

$$F = 28.5727\ N$$

F es la carga adicional máxima aceptable que puede tener cada cadena cinemática abierta mostrada en la (Figura 64) y de la cadena cinemática cerrada mostrada en la (Figura 20) teniendo un factor de diseño igual a 6.0.

6.9 ANÁLISIS CINEMÁTICO

El análisis cinemático se lleva a cabo con la ayuda del software libre y gratuito llamado Geogebra, es una plataforma de representación gráfica y matemática muy intuitiva y fácil de usar donde se obtiene la cinemática directa del robot SCARA paralelo a diseñar, mediante una simulación para obtener datos en una hoja de cálculo, la ventaja de este software es que todo el esquema y simulación del mecanismo de 5 barras presente en el robot SCARA paralelo de 2 GDL a diseñar en el presente documento se hace mediante el dibujo del mismo en el software, sin necesidad de realizar cálculos matemáticos, se dibuja en Geogebra tal y como muestra la siguiente figura:

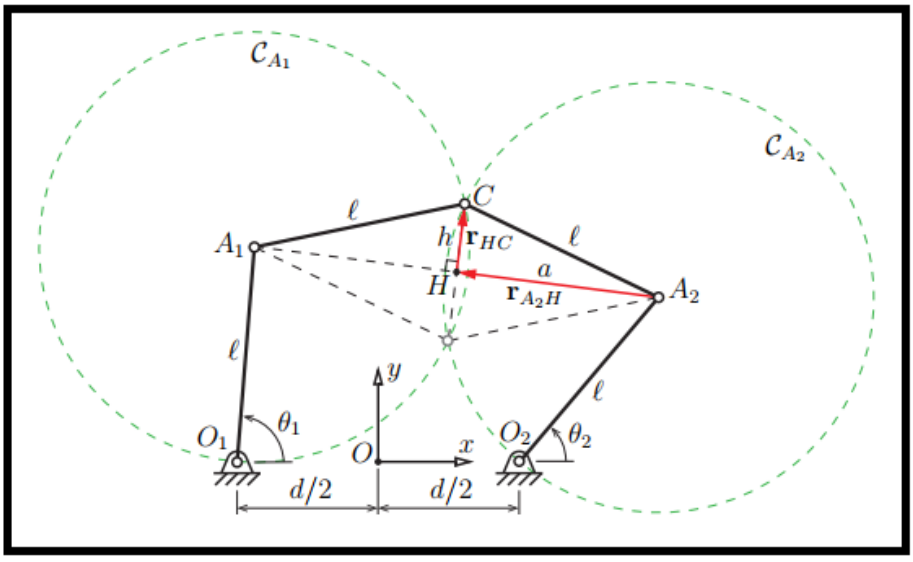


Figura 73. Esquema Ilustrativo para la solución de la cinemática directa de DexTAR "Mecademic".[31]

La (Figura 73) detalla un esquema grafico el cual posibilita la solución de la cinemática directa del robot DexTAR desarrollado por la compañía “Mecademic”, este mismo

[31] Figura 73. Tomada de: (Mecademic, 2014-2015)

esquema será de utilidad para dar solución al robot SCARA paralelo de 2 GDL que se diseña en el presente documento, se logrará dicho objetivo graficando en el software Geogebra toda la nomenclatura usada en la (Figura 73), pero antes se debe de estudiar y entender todos los conceptos y elementos que se aprecian en la (Figura 73).

Interpretando la (Figura 73) se tiene que las juntas activas es decir las juntas que alojan cada actuador se representa con los ángulos $\boldsymbol{\theta_1}$y $\boldsymbol{\theta_2}$ y por medio de estos ángulos se encuentra las coordenadas en el eje **x** y eje **y** del punto ***C*** respecto al punto ***O*** que es el origen de coordenadas asignado, el problema consiste en encontrar los puntos de intersección de la circunferencia $\boldsymbol{C_{A1}}$, que tiene como centro el punto $\boldsymbol{A_1}$ y un radio de $\boldsymbol{l}$**.** Con la circunferencia $\boldsymbol{C_{A2}}$, que tiene como centro el punto $\boldsymbol{A_2}$ y un radio de $\boldsymbol{l}$**,** los puntos de intersección entre las circunferencias $\boldsymbol{C_{A1}}$ y $\boldsymbol{C_{A2}}$ representan dos posibles posiciones especificas del punto ***C*** tal como se aprecia en la (Figura 73), pero en el caso del robot SCARA paralelo a diseñar en este robot solo manejara una posible posición para el punto ***C***, puesto que en este proyecto solo se usa el **assembly mode +** como se recalcó anteriormente, claros estos conceptos se procede a graficar el esquema con las dimensiones ya especificadas con anterioridad para el robot SCARA paralelo a diseñar en el presente documento.

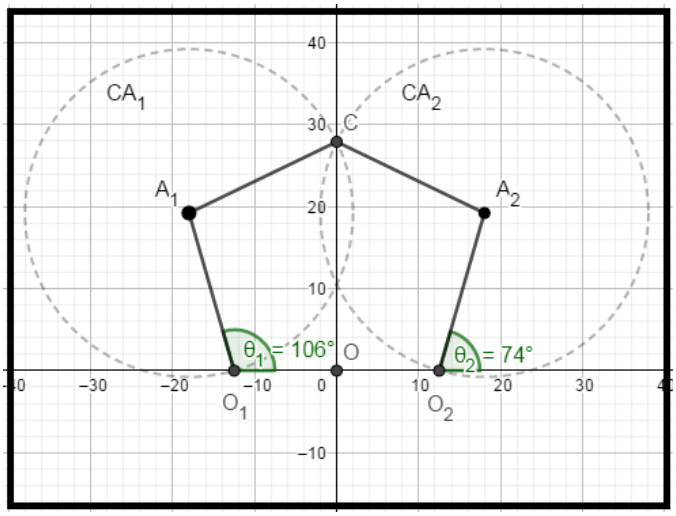


Figura 74. Esquema cinemática directa obtenido mediante el software Geogebra.

Para obtener el espacio de trabajo teórico del robot SCARA paralelo de 2 GDL a diseñar en el presente documento se debe de graficar dos circunferencias cada una con

centro en el punto O_1 y O_2 respectivamente, ambas con un radio de dos veces l; el área que se encierra dentro de las intersecciones de las circunferencias O_1 y O_2 se conoce como espacio de trabajo teórico.

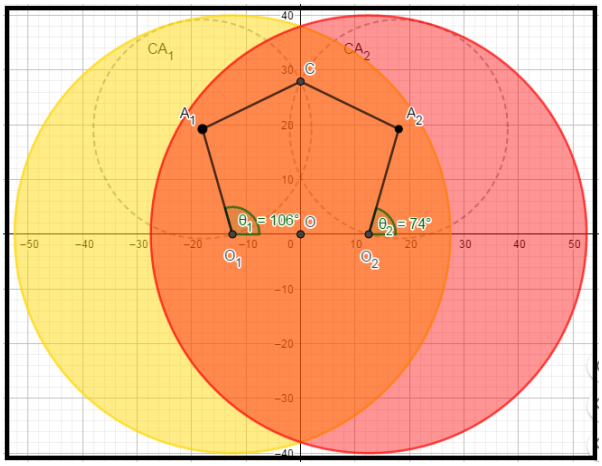


Figura 75. Espacio de trabajo teórico obtenido mediante el software Geogebra

El área de trabajo de la (Figura 75) coloreada en naranja representa un espacio de trabajo teórico, para obtener el espacio de trabajo real se debe añadir un área de trabajo la cual está conformada de coordenadas que presentan singularidades de tipo 2, en esta zona el robot no puede posicionarse precisamente en muchas zonas de esta área.

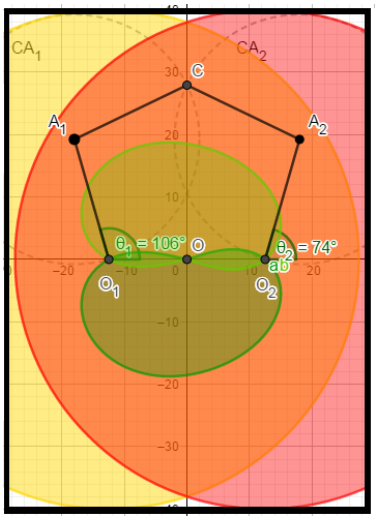


Figura 76. Espacio de trabajo real obtenido mediante el software Geogebra.

El área ilustrada en la (Figura 76) de color verde claro representa la zona de singularidades tipo 2 para el (**assembly mode -)**, esta zona no es de gran importancia en el desarrollo de la cinemática directa del robot SCARA paralelo a diseñar, debido a que este **assembly mode –** no se contempla en el diseño.

El área ilustrada en la (Figura 76) de color verde obscuro representa la zona de singularidades de tipo 2 para el (**assembly mode +),** en esta área de color verde obscuro el robot SCARA paralelo a diseñar no podrá posicionar el efector final punto ***C*** en la totalidad de su área, esta área se graficó por medio del software Geogebra mediante una función de curva paramétrica en base a las siguientes ecuaciones (Mecademic, 2014-2015):

$$\begin{Bmatrix} x = \rho \cos\vartheta \\ y = \rho \sin\vartheta \end{Bmatrix} \middle| 0 \leq \vartheta \geq 2\pi \Bigg\}$$

$$\rho = \frac{1}{2}\sqrt{d^2(2\cos\vartheta^2 - 1) \pm 2d \sin\vartheta \sqrt{4l^2 - d^2\cos\vartheta^2}}$$

Todas las variables representadas en las anterior ecuación tales como $\boldsymbol{l}$ y $\boldsymbol{d}$, son las mismas variables que se indican en la (Figura 20).

6.9.1 PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE LA CINEMÁTICA DIRECTA

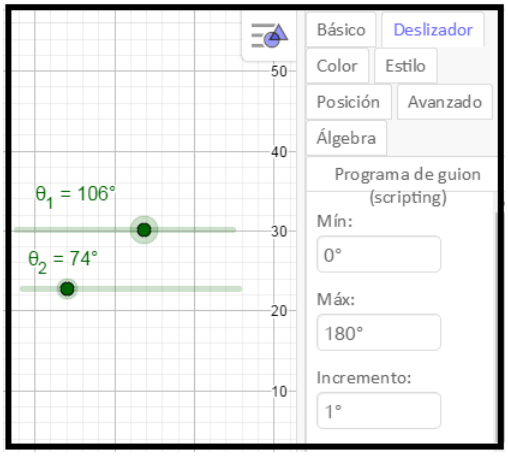


Figura 77. Rango de valores para los ángulos θ1, θ2. Mediante la herramienta Deslizador

La (Figura 77) muestra la interfaz gráfica del programa al momento de seleccionar algún parámetro ya graficado y especificado en la (Figura 74) en este caso los ángulos $\boldsymbol{\theta_1}$y $\boldsymbol{\theta_2}$, y como primer paso definir sus rango de valores máximos y mínimos.

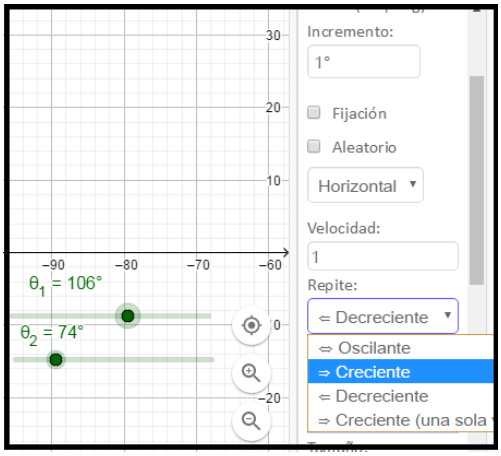


Figura 78. Configuración de incremento en ángulos, velocidad, y comportamiento de los ángulos θ1, θ2, creciente o decreciente.

Como segundo paso se debe de especificar si los ángulos $\boldsymbol{\theta_1}$y $\boldsymbol{\theta_2}$ de las juntas activas crecen o decrecen y a qué velocidad según se vaya simulando el movimiento de estas juntas activas.

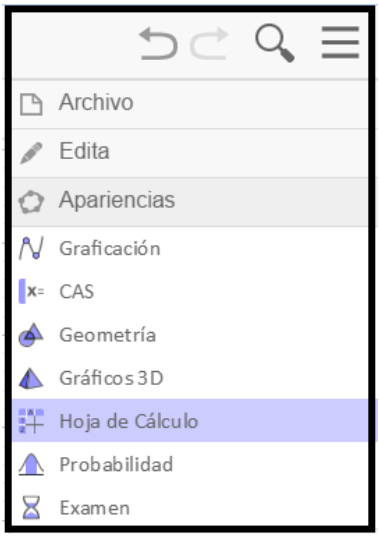


Figura 79. Llamar la función Hoja de Cálculo de la barra de herramientas principal.

En la interfaz gráfica de Geogebra ubicamos y seleccionamos el icono ☰, a continuación se despliega un menú extenso donde se debe de ubicar la atención en la

Opción con el icono llamada Apariencias, para finalmente seleccionar hoja de cálculo.

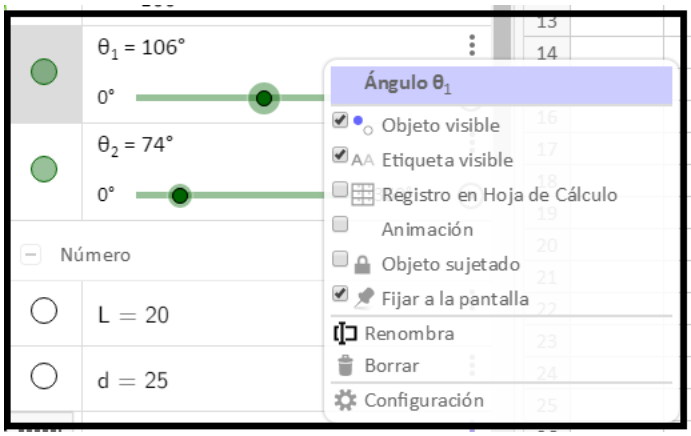


Figura 80. Click derecho sobre los parámetros luego click izquierdo sobre Registro en hoja de cálculo.

A continuación se debe de dirigir la atención en la parte izquierda de la interfaz del software Geogebra, donde esta cada uno de los parámetros graficados anteriormente y en ellos mediante un click derecho se puede incluir en la hoja de cálculo para registrar sus datos a la hora de la simulación tal y como lo muestra la (Figura 80) mediante la opción Registro en Hoja de Cálculo.

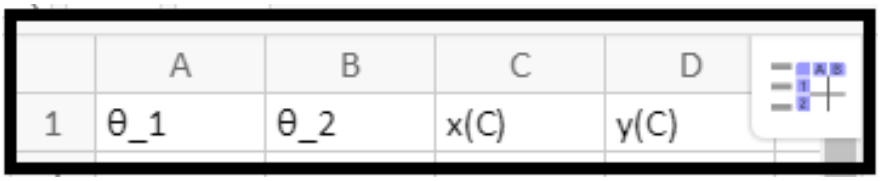


Figura 81. Tabla de cálculo con los parámetros ya listos a simular.

Como se muestra en la (Figura 81) los parámetros $\boldsymbol{\theta_1}$, $\boldsymbol{\theta_2}$ y las coordenadas **(x,y)** del punto ***C*** son los parámetros más importantes para hallar la solución del problema cinemático del robot a diseñar asignados a la hoja de cálculo, al momento de la simulación, en tiempo real las columnas en la hoja de cálculo de cada uno de los parámetros empezaran a colmarse de valores.

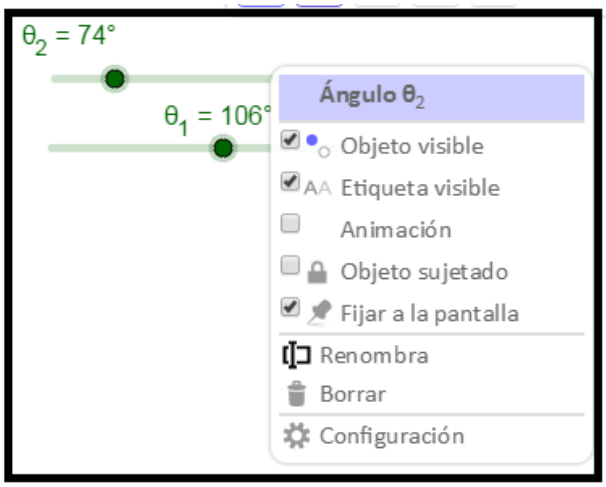


Figura 82. Click derecho sobre los parámetros a simular, luego click izquierdo en Animación.

A continuación se debe de seleccionar los parámetros que se quieren animar para que puedan generar movimiento y datos numéricos en la hoja de cálculo para así obtener la cinemática directa, estos parámetros son $\boldsymbol{\theta_1}$ y $\boldsymbol{\theta_2}$ tal como se ilustra en la (Figura 82).

(0° - 180°) **Primera Configuración**		**(360° - 180°) o (0° - (-180°))** **Segunda Configuración**	
θ_1	**θ_2**	**θ_1**	**θ_2**
+	+	+	+
+	-	+	-
-	-	-	-
-	+	-	+
Posición original	+	Posición original	+
+	Posición original	+	Posición original
Posición original	-	Posición original	-
-	Posición original	-	Posición original

Tabla 6. Convenciones tipo de giro a realizar por los motores a pasos.

En la (Tabla 6) se listan dos configuraciones distintas dependiendo del barrido de sus ángulos que debe de tener el robot SCARA paralelo a la hora de la simulación, considerando ángulo **θ_1** + todos los ángulos que giran en sentido anti horario, y **θ_1 –** todos los ángulos que giran en sentido horario, la primera y segunda configuración tienen posiciones que se llaman **Posición original,** como se ve a continuación:

- **Simulación y registro de datos de la primera configuración:** Esta configuración tiene como posición original $\boldsymbol{\theta_1 = 96°}$ y $\boldsymbol{\theta_2 = 84°}$**.**

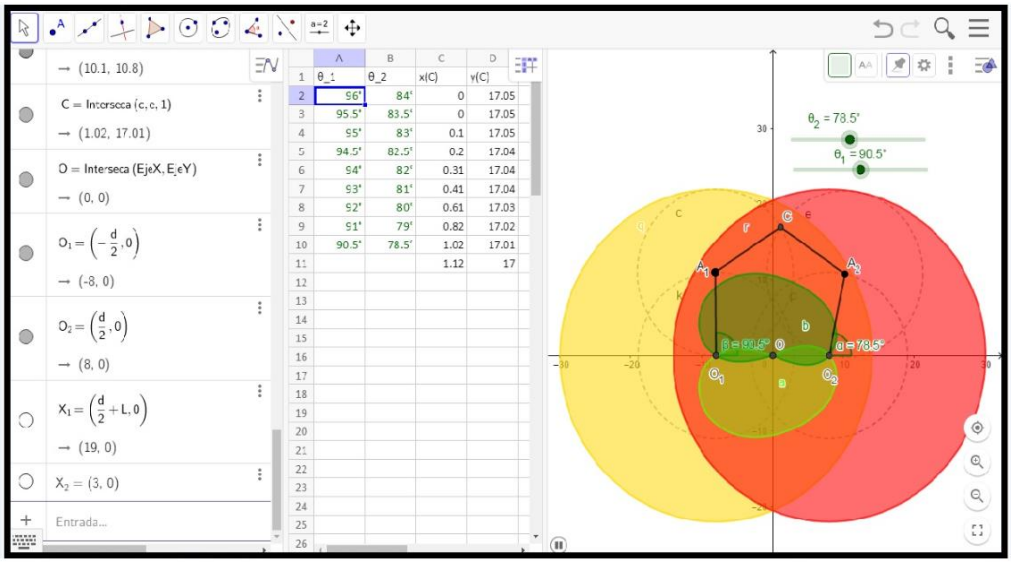


Figura 83. Registro de datos de los ángulos y posición del efector final (x,y) en su primera configuración.

- **Simulación y registro de datos de la segunda configuración:** Esta configuración tiene como posición original $\boldsymbol{\theta_1 = 264°}$ y $\boldsymbol{\theta_2 = 276°}$**.**

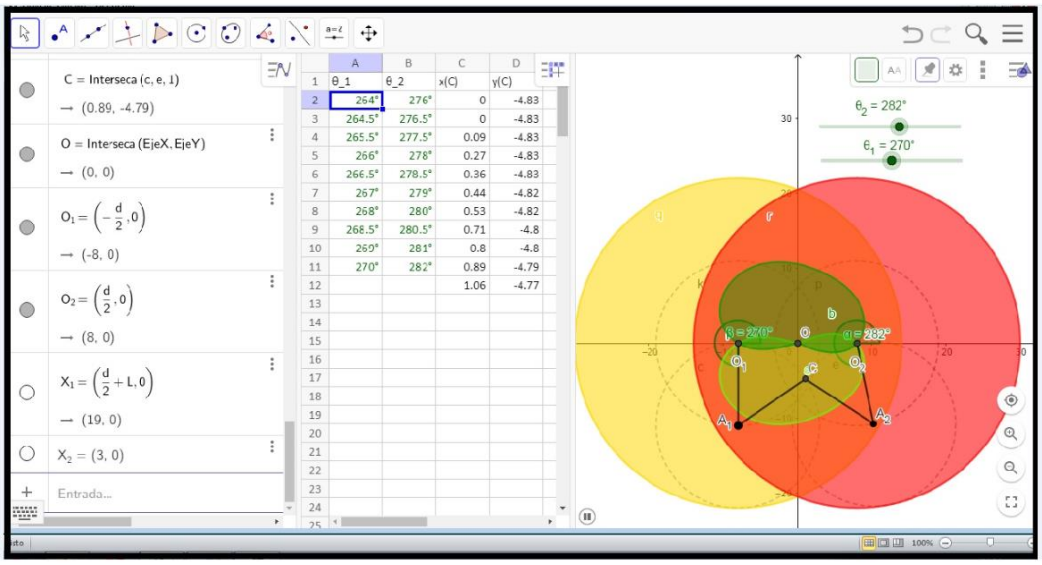


Figura 84. Registro de datos de los ángulos y posición del efector final (x,y) en su segunda configuración.

Las hojas de cálculo con todo el registro de estos datos están disponibles en el Anexo # 2 del presente documento.

6.10 PROGRAMACIÓN ARDUINO, SECUENCIAS Y CONEXIONES

6.10.1 SECUENCIA DE CONTROL PARA MOTORES UNIPOLARES

Existen tres tipos de secuencias para controlar los motores paso a paso unipolares, la más apropiada es la secuencia normal es la más usada y la que más recomiendan los fabricantes, con esta secuencia el motor avanza un paso por vez y siempre habrán dos bobinas activadas, con esto se obtiene un torque más grande y una mayor retención. (Diymakers, 2013)

Paso	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D
Paso 1	1	1	0	0
Paso 2	0	1	1	0
Paso 3	0	0	1	1
Paso 4	1	0	0	1

Figura 85. Secuencia normal motores unipolares[32]

6.10.2 CONEXIÓN MICROCONTROLADOR ARDUINO, DRIVER Y MOTORES PASO A PASO

Para el control del manipulador paralelo se usa una placa Arduino uno, un módulo o driver para motores paso a paso llamado L298N, este driver está compuesto por un arreglo de transistores MOSFET estos transistores cumplen con la función de conmutar y amplificar las señales enviadas desde el microcontrolador Arduino uno, también por resistencias y diodos, formando así un puente H el cual controla la circulación de la corriente por cada fase del motor.

Este driver cuenta con las siguientes especificaciones técnicas:

[32] Figura 34y 35. Tomada de: (Diymakers, 2013)

- Canales: 2 (soporta 2 motores DC o 1 motor PaP)
- Voltaje lógico: 5V
- Voltaje de operación: 5V-35V
- Consumo de corriente (Digital): 0 a 36 mA
- Potencia máxima: 25W
- Peso: 30g
- Dimensiones: (43*43*27) mm

El driver cuenta con todos los componentes necesarios para funcionar independientemente de otros componentes ajenos a él, posee diodos de protección un regulador LM7805 que suministra 5V a la parte lógica del integrado L298N. Cuenta con jumpers de selección para habilitar cada una de las salidas del módulo (A y B). La salida A está conformada por OUT1 y OUT2, la salida B por OUT3 y OUT4. Los pines de habilitación son ENA y ENB respectivamente como se muestra en la siguiente figura:

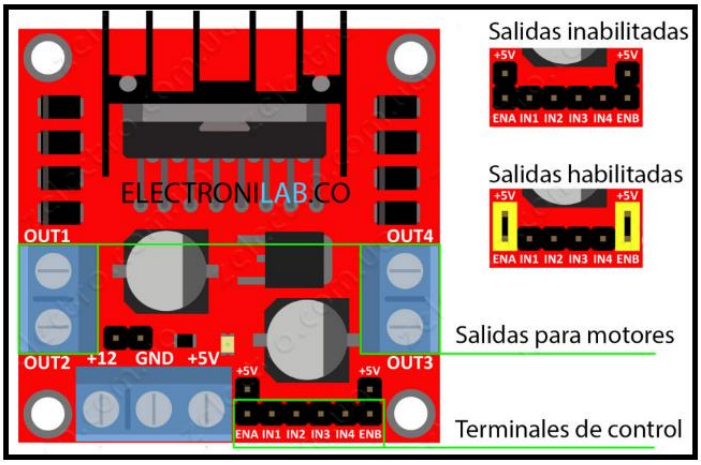


Figura 86. Descripción de terminales y salidas del control del driver L298N.

El driver se puede alimentar de dos maneras gracias al regulador integrado LM7805. Cuando el jumper de selección 5V se encuentre activo, el modulo permite una alimentación de entre 6V a 12V DC. Como el regulador se encuentra activo, el pin marcado como +5V tendrá un voltaje de 5V DC este voltaje se puede usar para alimentar la parte de control del módulo ya sea un micro controlador o un Arduin o, pero

se recomienda que dicho micro controlador no consuma más de 500mA de corriente, esta descripción se ilustra en la (Figura 87.b).

Otro caso es cuando el jumper de selección de 5V se encuentra inactivo, el modulo permite una alimentación de entre 12V a 35V DC. Como el regulador no está funcionando, se debe de conectar el pin de +5V a una tensión de 5V DC para alimentar la parte lógica del L298N.

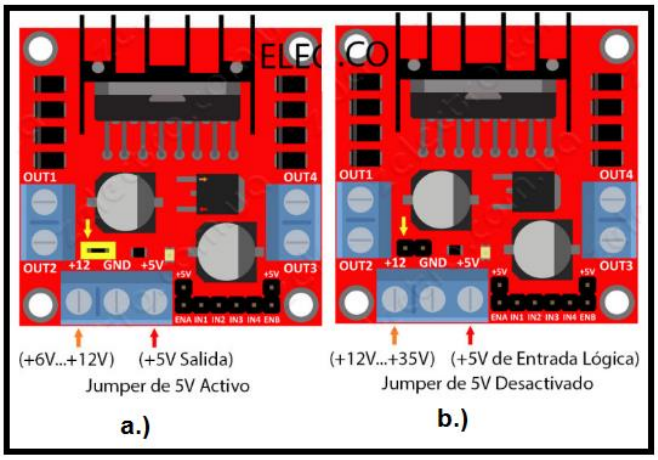


Figura 87. a.) Funcionamiento 6-12 v b.)Funcionamiento 12-35 V.[33]

Teniendo claro el cómo funciona el driver L2998N se procede a realizar el circuito con el cual se va a controlar ambos motores paso a paso, la siguiente figura muestra el esquema de conexión de cada motor paso a paso seleccionado:

[33] Figura 86 y 87. Tomada de: https://electronilab.co/tutoriales/tutorial-de-uso-driver-dual-l298n-para-motores-dc-y-paso-a-paso-con-arduino/

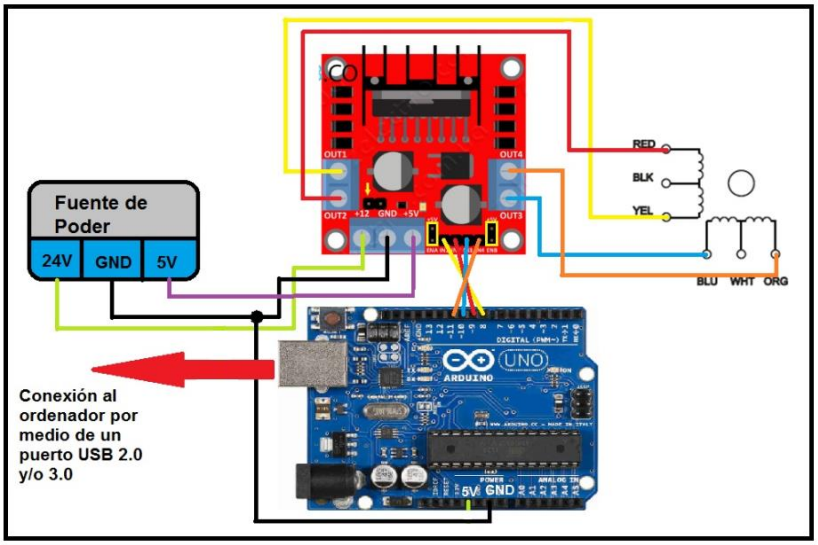


Figura 88. Conexión microcontrolador Arduino, driver L298N, Motor a pasos unipolar

6.10.3 CÓDIGO ARDUINO

El código está basado en una programación hecha por www.elprofegarcia.com. Una programación bastante interesante ya que permite al usuario mediante el monitor serie de Arduino 1.8.5 para introducir los valores en ángulos los cuales queremos que el motor gire, ofreciendo como posibilidad el giro hacia ambos sentidos horario y anti horario.

```
int retardo=40;          // Tiempo de retardo en milisegundos (Velocidad del Motor)
int dato_rx;             // valor recibido en grados
int numero_pasos = 0;    // Valor en grados donde se encuentra el motor
String leeCadena;        // Almacena la cadena de datos recibida

void setup() {
Serial.begin(9600);      // inicializamos el puerto serie a 9600 baudios
pinMode(11, OUTPUT);     // Pin 11 conectar a IN4
pinMode(10, OUTPUT);     // Pin 10 conectar a IN3
pinMode(9, OUTPUT);      // Pin 9 conectar a IN2
pinMode(8, OUTPUT);      // Pin 8 conectar a IN1
}
```

Figura 89. Definición del retardo y los pin que se usaran en la placa Arduino uno

```
void loop() {
  while (Serial.available()) {    // Leer el valor enviado por el Puerto serial
    delay(retardo);
    char c  = Serial.read();     // Lee los caracteres
    leeCadena += c;              // Convierte Caracteres a cadena de caracteres
  }
  if (leeCadena.length()>0){
        dato_rx = leeCadena.toInt();   // Convierte Cadena de caracteres a Enteros
         Serial.print(dato_rx);         // Envia valor en Grados
         Serial.println(" Grados");
        delay(retardo);
        dato_rx = (dato_rx * 0.13888888888); //
  }

   while (dato_rx>numero_pasos){   // Giro hacia la izquierda en grados
       paso_izq();
       numero_pasos = numero_pasos + 1;
   }
   while (dato_rx<numero_pasos){   // Giro hacia la derecha en grados
        paso_der();
        numero_pasos = numero_pasos -1;
   }
  leeCadena = "";   // Inicializamos la cadena de caracteres recibidos
  apagado();         // Apagado del Motor para que no se caliente
}  ////////////////////// Fin del Loop ////////////////////////////
```

Figura 90. Factor de corrección *dato_rx de entrada en grados, valor basado en las ecuaciones (19), (20), (21)

```
void paso_der(){          // Pasos a la derecha
 digitalWrite(11, LOW);
 digitalWrite(10, LOW);
 digitalWrite(9, HIGH);
 digitalWrite(8, HIGH);
   delay(retardo);
 digitalWrite(11, LOW);
 digitalWrite(10, HIGH);
 digitalWrite(9, HIGH);
 digitalWrite(8, LOW);
   delay(retardo);
 digitalWrite(11, HIGH);
 digitalWrite(10, HIGH);
 digitalWrite(9, LOW);
 digitalWrite(8, LOW);
  delay(retardo);
 digitalWrite(11, HIGH);
 digitalWrite(10, LOW);
 digitalWrite(9, LOW);
 digitalWrite(8, HIGH);
  delay(retardo);
}
```

Figura 91. Pasos a la derecha respetando la secuencia correcta de todas las bobinas.

```
void paso_izq() {        // Pasos a la izquierda
 digitalWrite(11, HIGH);
 digitalWrite(10, HIGH);
 digitalWrite(9, LOW);
 digitalWrite(8, LOW);
  delay(retardo);
 digitalWrite(11, LOW);
 digitalWrite(10, HIGH);
 digitalWrite(9, HIGH);
 digitalWrite(8, LOW);
  delay(retardo);
 digitalWrite(11, LOW);
 digitalWrite(10, LOW);
 digitalWrite(9, HIGH);
 digitalWrite(8, HIGH);
  delay(retardo);
 digitalWrite(11, HIGH);
 digitalWrite(10, LOW);
 digitalWrite(9, LOW);
 digitalWrite(8, HIGH);
  delay(retardo);
}
```

Figura 92. Pasos a la derecha respetando la secuencia correcta de todas las bobinas.

```
void apagado() {         // Apagado del Motor
 digitalWrite(11, LOW);
 digitalWrite(10, LOW);
 digitalWrite(9, LOW);
 digitalWrite(8, LOW);
 }
```

Figura 93. Void que apaga el motor desde que no se le de uso, evita recalentamientos.

6.11 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO



Figura 94. Elemento mecanismos que se usaron para la fabricación del robot paralelo.



Figura 95. Motor paso a paso NEMA 23.



Figura 96. Ajuste y ensamble realizado en el taller de soldadura de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas sede Tecnológica.

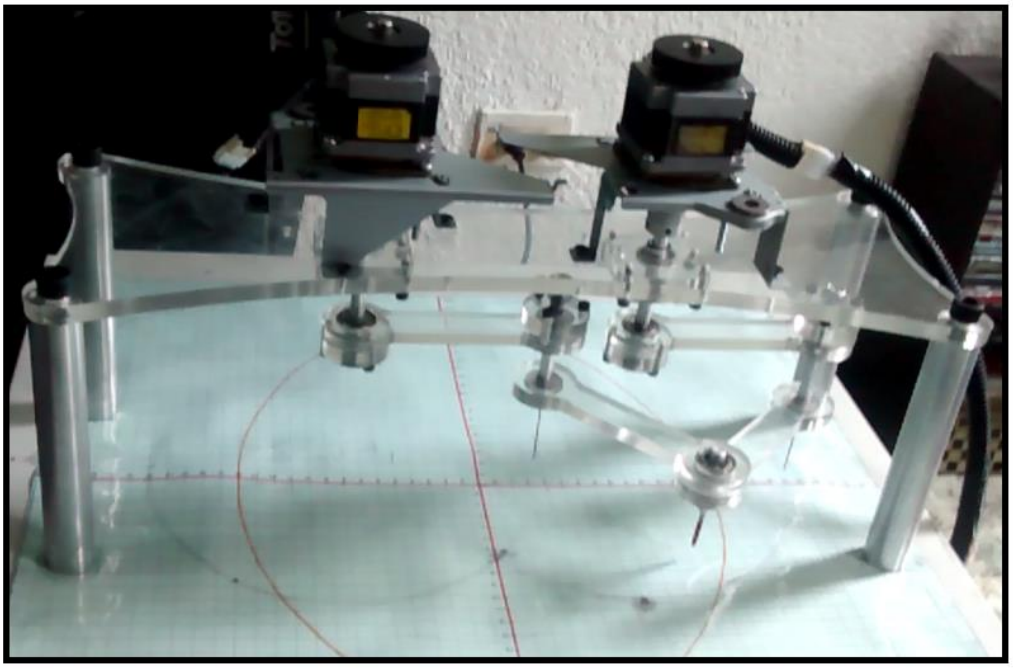


Figura 97. Robot SCARA paralelo con 2 GDL totalmente construido

7. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

7.1 PRUEBA DE PRECISIÓN

Para el robot SCARA se registrarón los siguientes datos para analizar la precisión, en el cual los ángulos iniciales Ø1 y Ø2 tienen el valor de 0° grados y 45° respectivamente, las coordenadas para (x,y) para el punto C son:

X	Y
10.8	7.8
10.8	7.6
10.8	7.6
10.8	7.6
10.7	7.5
10.8	7.5
10.8	7.5
10.8	7.5
10.8	7.5
10.8	7.4

Tabla 7. Datos experimentales de precisión a 0 grados.

Luego se obtuvo la gráfica de los datos y se halló la regresión correspondiente que se observa en la (Figura 98) como la línea polinómica.

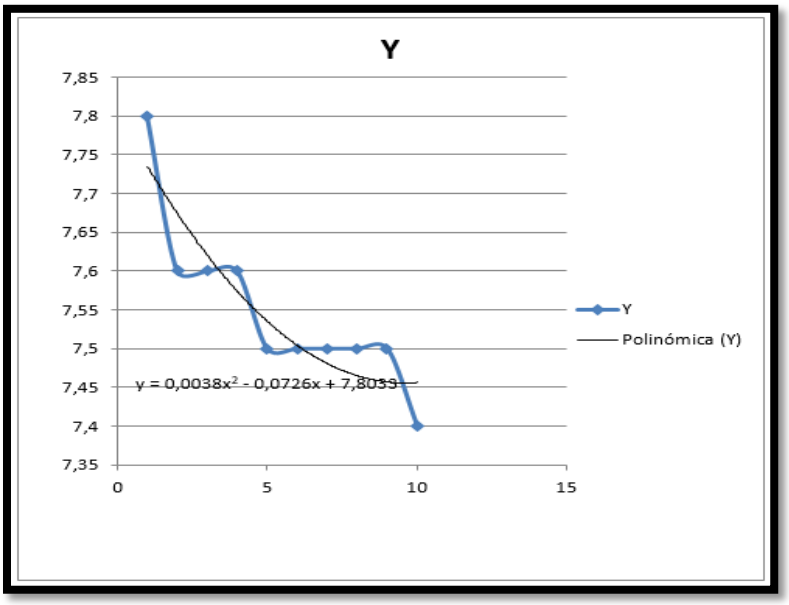


Figura 98. Grafica de precisión

En la segunda toma de datos con ángulo Ø1 y Ø2 de 152° y 180° respectivamente, se obtiene la tabla:

X	Y
8.2	9.8
7.8	9.8
8	9.8
8	9.8
8	9.8
8	9.9
8	9.9
8	9.9
8	9.9
8	9.9

Tabla 8. Datos experimentales de precisión a 180 grados.

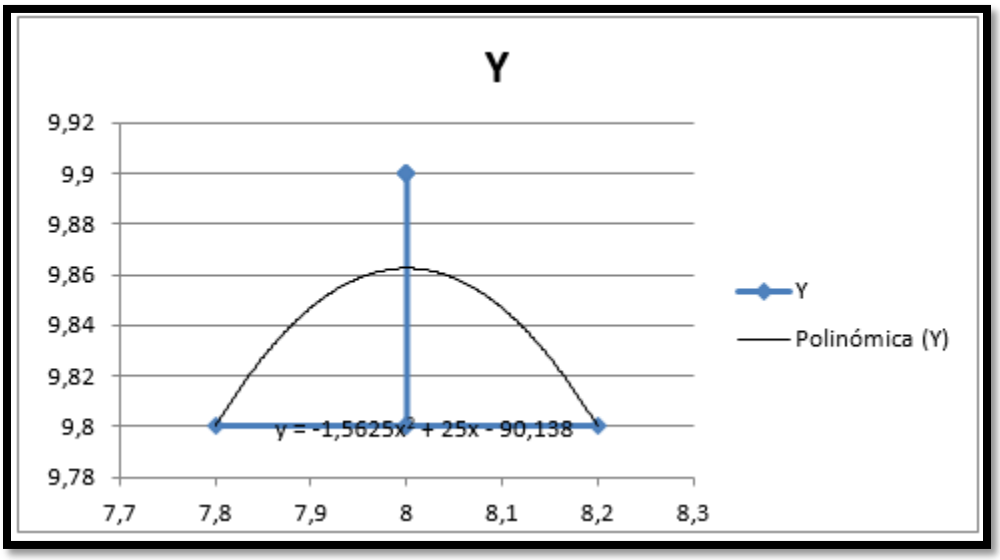


Figura 99.Grafica de posición con diferentes ángulos de inicio.

Se observa que la línea de regresión es polinómica y no hay mucha variación con la experimental-

- **PORCENTAJE DE PRECISIÓN**

El porcentaje de precisión de la primera grafica se calcula en el eje X

10.7-10.8/(10.7X100)=0.00009345

10.7-0.00009345=10.69

10.69/10.7=0.9990

0.9990 X 100=99.90%

El porcentaje de precisión del eje y

8.1-7.4/(8.1X100)=0.000641975

8.1-0.000641975=8.09935

8.09935/8.1=0.99999

0.99999 X100=99.999%

7.2 CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE

Para poder encontrar el valor de la incertidumbre se toma los diferentes valores obtenidos en las pruebas iniciales y se manejan para cada eje en particular (x,y) dependiendo de los ángulos de inicio y posterior a haber obtenido los valores de la incertidumbre, se realizó la gráfica de regresión, adquiriendo la función de la cual se puede ver cómo los valores del eje varían de acuerdo a la posición.

En los diferentes datos obtenidos en las pruebas del robot, se calculó la incertidumbre para los ejes x,y, se tuvo en cuenta cada una de las posiciones y seguidamente se logró saber que corresponden a Ø2=(Ø-180) donde uno de los brazos queda constante con un ángulo de Ø1= 90º. En la siguiente tabla se representa el valor de los ángulos

para cada actuador y las posiciones del punto ***C*** según la (Figura 74). ***X[C], Y[C]*** según el programa Geogebra y según los datos reales al momento del funcionamiento verídico del robot SCARA paralelo de 2 GDL diseñado.

θ_1	θ_2	Geogebra		Real	
		X[C]	*Y[C]*	*X[C]*	*Y[C]*
90°	72°	1,84	15,91	2,10	15,80
90°	81°	0,91	17,45	1,30	16,90
90°	90°	0,00	18,55	0,60	17,70
90°	99°	-0,78	19,30	-0,10	18,40
90°	126°	-1,11	19,58	-0,90	19,20
90°	135°	-0,21	18,77	-0,40	18,80
90°	144°	1,02	17,30	1,60	16,60
90°	153°	2,14	15,26	2,60	14,80
90°	162°	2,81	13,06	3,30	13,00
90°	171°	3,00	11,03	3,60	11,20
90°	180°	2,87	9,30	3,50	8,20

Tabla 9. . θ_1=90°,θ_2= (0-180°) tabla de datos posición teórica vs real.

VALOR INCERTIDUMBRE O ERROR DE RESOLUCIÒN						
						INCERTEZA
XI	$\bar{x}$	$\bar{x}$	XI	XI-$\bar{x}$^2	Σ(XI-$\bar{x}$^2)/n-1	$S-\sqrt{s^2}=\sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n-1}}$
72	2.100	1.564	0.536	0.2873		
81	1.300	1.564	-0.264	0.0695		
90	0.600	1.564	-0.964	0.9286		
99	-0.100	1.564	-1.664	2.7677		
126	-0.900	1.564	-2.464	6.0695		
135	-0.400	1.564	-1.964	3.8559	2.5965	1.611
144	1.600	1.564	0.036	0.0013		
153	2.600	1.564	1.036	1.0740		
162	3.300	1.564	1.736	3.0150		
171	3.600	1.564	2.036	4.1468		
180	3.500	1.564	1.936	3.7495		
SUMA	17.200		SUMA	25.9651		
PROMEDIO	1.564					
DESVESTA	1.611					
ENTONCES LA MEDIDA CORRECTA DE ESTE GRUPO DE DATOS ES 1.564+-1.611						

Tabla 10. Valor de incertidumbre eje X.

La grafica de la posición del eje X con los ángulos anteriores.

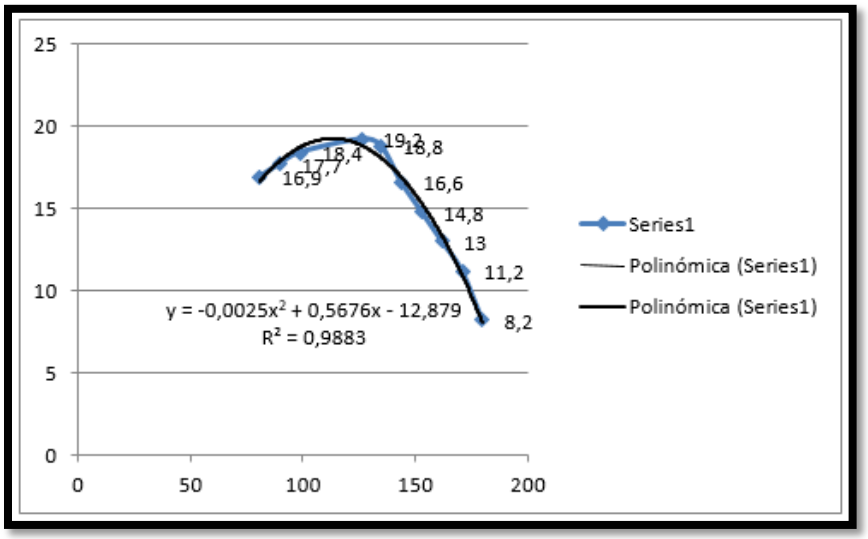


Figura 100. Grafica de incertidumbre eje X.

La grafica de color azul corresponde al movimiento del eje X con respecto a los ángulos y la gráfica de color negro corresponde a la corregida o de regresión.

Tabla de cálculos correspondiente a la incertidumbre del eje Y con un ángulo fijo y el otro variable

						INCERTEZA
XI	$\bar{X}$	$\bar{X}$	XI	XI-$\bar{X}$^2	Σ(XI-$\bar{X}$^2)/n-1	$S-\sqrt{s^2}=\sqrt{\frac{\Sigma(x-\bar{x})^2}{n-1}}$
72	15.800	15.509	0.291	0.0847		
81	16.900	15.509	1.391	1.9346		
90	17.700	15.509	2.191	4.8001		
99	18.400	15.509	2.891	8.3574		
126	19.200	15.509	3.691	13.6228		
135	18.800	15.509	3.291	10.8301	11.9609	3.458
144	16.600	15.509	1.091	1.1901		
153	14.800	15.509	-0.709	0.5028		
162	13.000	15.509	-2.509	6.2955		
171	11.200	15.509	-4.309	18.5683		
180	8.200	15.509	-7.309	53.4228		
SUMA	170.600		SUMA	119.6091		
PROMEDIO	15.509					
DESVESTA	3.458					
ENTONCES LA MEDIDA CORRECTA DE ESTE GRUPO DE DATOS ES 15.509+-3.458						

Tabla 11. Valor incertidumbre para eje Y.

La grafica correspondiente a los valores de Y con un ángulo fijo y otro variable de inicio en la cual la gráfica azul es la experimental y la roja la gráfica corregida.

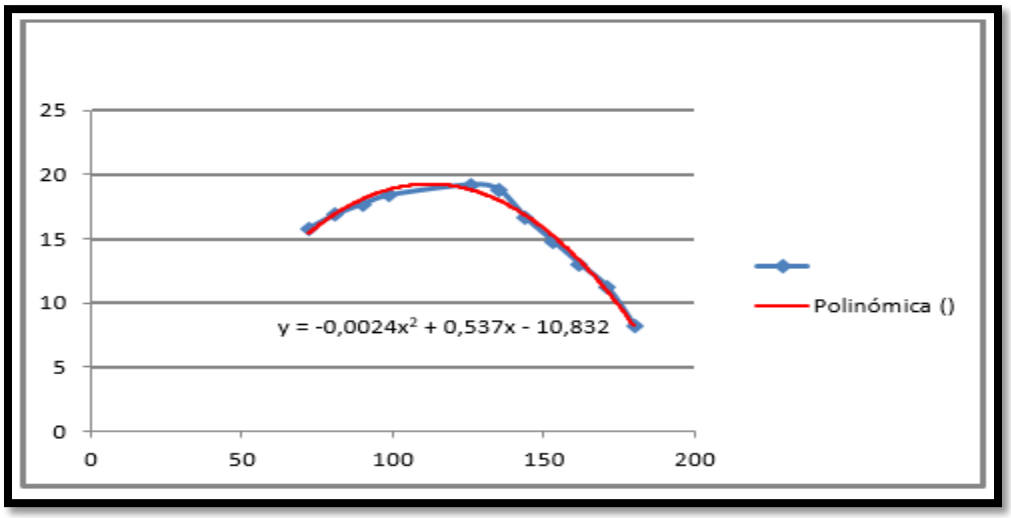


Figura 101. Grafica de incertidumbre eje Y

8. CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS

Según la federación internacional de robótica la clasificación depende de la ubicación del robot, es decir si l robot se encuentra en el lejano oriente o en América o Europa, los Japoneses definen a un robot como cualquier dispositivo mecánico articulado móvil sujeto a manipulación para euro-américa el concepto de robot es más complejo sobre todo en la parte de programación ya que los artefactos móviles para ellos únicamente son manipuladores.

La definición de robot según las industrias robóticas y la ISO más acertada es:

Manipulador multifuncional, reprogramable con varios grados de libertad capaz de mover materias, piezas herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas. (González)

8.1 Los manipuladores:

Son sistemas mecánicos multifuncionales, con un sencillo sistema de control que permite gobernar el movimiento de sus elementos como son:

- Manual cuando un operario controla la tarea
- Secuencia fija trabajos invariables y repetitivos y preparados previamente.
- Secuencia variable se puede alterar el ciclo de trabajo.

8.2 Robots de repetición:

Son manipuladores que repiten movimientos, previamente preparadas por un ser humano, y pueden ser controlados manualmente son muy utilizados en la enseñanza.

8.3 Robots con control de computador:

Son sistemas mecánicos multifuncionales gobernados por un ordenador, lo hace por medio de un lenguaje o programa específico, logrando así una mayor exactitud en las labores realizadas.

8.4 Robots inteligentes:

Son sistemas muy similares a los robots con control por computador la diferencia radica que este tipo de robots toman datos del medio ambiente que los rodea por medio de sensores y pueden modificar su tareas programadas mejorándolas y siendo más efectivo.

8.5 Micro-robots

Son mecanismos pequeños más que todo para nivel educativo y de investigación aunque hay algunos que por su tamaño son desarrollaos para lograr ciertas tareas específicas en lugares pequeños y estrechos.

Las clasificaciones de los robots según la Asociación Francesa de Robótica Internacional esta resumida en la siguiente tabla:

Clasificación de los robots según la AFRI	
Tipo A	Manipulador con control manual o telemando.
Tipo B	Manipulador automático con ciclos pre ajustados; regulación mediante fines de carrera o topes; control por PLC; accionamiento neumático, eléctrico o hidráulico.
Tipo C	Robot programable con trayectoria continua o punto a punto. Carece de conocimiento sobre su entorno.
Tipo D	Robot capaz de adquirir datos de su entorno, readaptando su tarea en función de estos.

Tabla 12. Clasificación de los robots según la AFRI

Y la federación Internacional de robótica los clasifica por generaciones como se muestra en la siguiente tabla:

	Clasificación de los robots industriales en generaciones
1ª Generación	Repite la tarea programada secuencialmente. No toma en cuenta las posibles alteraciones de su entorno.
2ª Generación	Adquiere información limitada de su entorno y actúa en consecuencia. Puede localizar, clasificar (visión) y detectar esfuerzos y adaptar sus movimientos en consecuencia.
3ª Generación	Su programación se realiza mediante el empleo de un lenguaje natural. Posee la capacidad para la planificación automática de sus tareas.

Tabla 13. Clasificación robots por generaciones[34]

Al observar la (Tabla 12 y 13) se tiene que el robot SCARA paralelo de 2GDL diseñado y construido en el presente proyecto, presenta las siguientes características:

- **Robot de repetición, ideal para la enseñanza.**
- **Robot Tipo C. Programable con trayectoria continua o punto a punto y carece de conocimiento de su entorno**
- **Robot de primera generación.**

[34] Tabla 12 y 13. Tomadas de: (González)

9. LISTA DE COSTOS DE LA CONSTRUCCIÓN ROBOT SCARA PARALELO CON 2 GDL.

ELEMENTO O SERVICIO	CANTIDAD	VALOR	VALOR TOTAL
Acrílico estándar + proceso de corte láser			$90.000
Pliego de papel milimetrado	1	$4000	$4000
Pliego de papel contac	1	$1000	$1000
Varilla aluminio 1” * 150 mm de largo	4	$19500	$19500
Varilla aluminio ½” 20 mm de largo	2	$10000	$10000
Rodamientos ¾”	10	$0	$0
Tornillos Allen de todo tipo	40	$8000	$8000
Macho para roscar ¼”	1	$7000	$7000
Mecanizado torno de los ejes en aluminio	5	$80000	$80000
Mesa base del robot SCARA paralelo	1	$0	$0
Tuerca de seguridad M8	2	$1500	$1500
Anillos de seguridad	20	$0	$0
Motores a pasos NEMA 23	2	$0	$0
Broca acero rápido ¼”	1	$3000	$3000

Uso del software Geogebra	1	$0	$0
Licencia Siemens NX 10.0®	1	$260000	$260000
Arduino uno con cable USB	2	$0	$0
Juego de cables de conexión hembra macho x 7 unidades	4	$15000	$15000
Tarjeta Driver L298N	2	$40000	$40000
Fuente de 12 y 5 voltios CC	1	$0	$0
TOTAL GASTOS			$279000

Tabla 14. Costos para la realización del robot SCARA paralelo.

Muchos de los elementos mencionados en la (Tabla 14.) que fueron necesarios para la construcción del prototipo del SCARA planar paralelo, tiene como costo $0, debido a que mucho de ellos son elementos que fueron reciclados y por ende no tuvieron costo alguno, el software Geogebra por ser un software gratuito y libre tiene un valor de $0, en el caso de la licencia del software Licencia Siemens NX 10.0® de costo $260000 no se tuvo en cuenta puesto que este es un costo asumido por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, todos los costos corresponden a pesos colombianos.

10. APÉNDICES

10.1 APÉNDICE A

- **PROPIEDADES DE LAS ÁREAS**

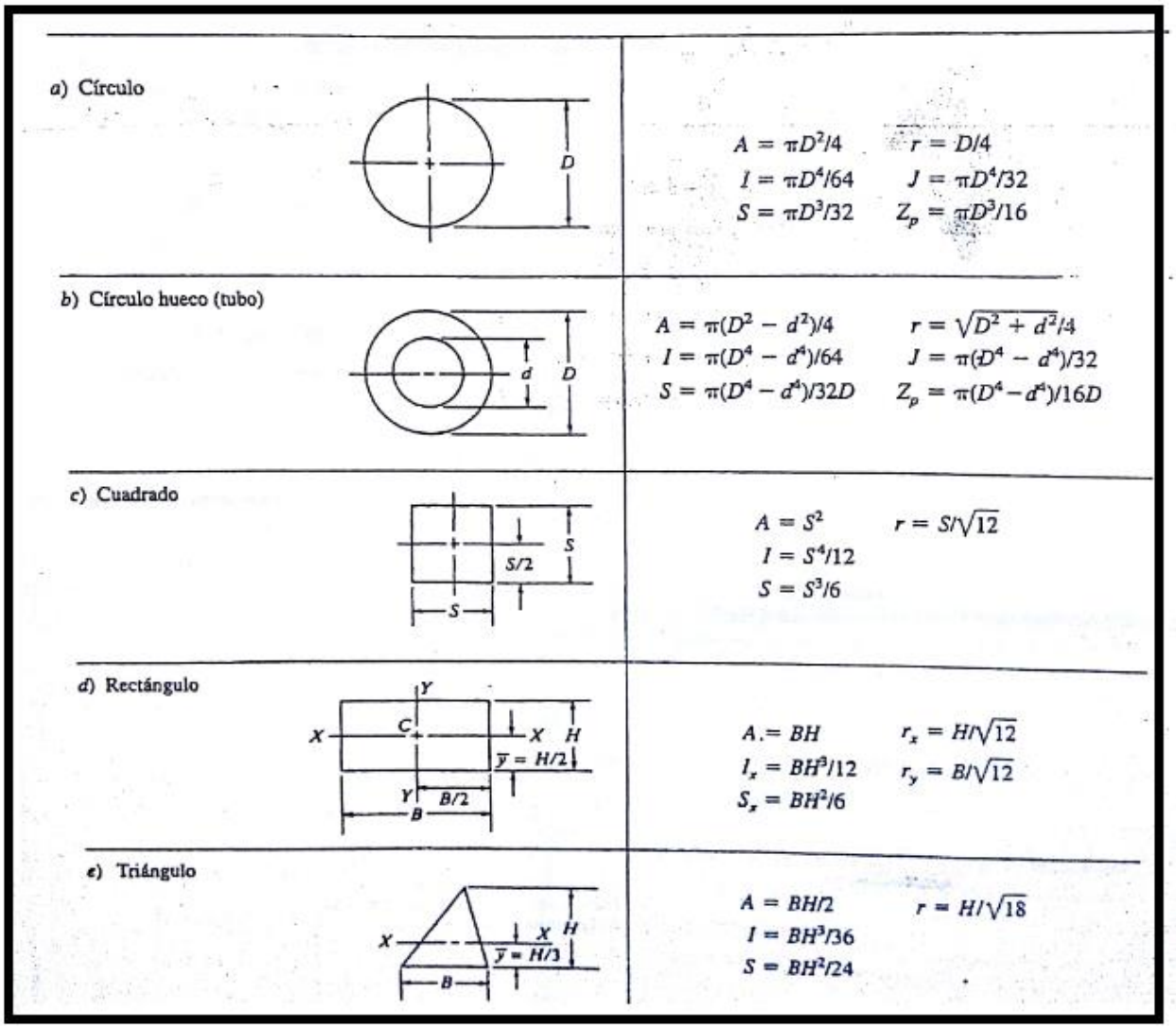


Figura 102. Propiedades de la áreas, momento de inercia módulo de sección.[35]

[35] Figura 98. Tomada de los Apéndices de (Norton, 2000)

10.2 APÉNDICE B

- **PROPIEDADES TÍPICAS DE ALGUNOS PLÁSTICOS**

Material	Tipo	Resistencia a la tensión (ksi)	Resistencia a la tensión (MPa)	Módulo de tensión (ksi)	Módulo de tensión (MPa)	Resistencia a la flexión (ksi)	Resistencia a la flexión (MPa)	Módulo de flexión (ksi)	Módulo de flexión (MPa)	Resistencia IZOD al impacto (en pie·lb/pulg de muesca)
Nylon	66 Seco	12.0	83	420	2900			410	2830	1.0
	66 50% R.H.	11.2	77					175	1210	2.1
ABS	Medio impacto	6.0	41	360	2480	11.5	79	310	2140	4.0
	Alto impacto	5.0	34	250	1720	8.0	55	260	1790	7.0
Policarbonato	Uso general	9.0	62	340	2340	11.0	76	300	2070	12.0
Acrílico	Estándar	10.5	72	430	2960	16.0	110	460	3170	0.4
	Alto impacto	5.4	37	220	1520	7.0	48	230	1590	1.2
PVC	Rígido	6.0	41	350	2410			300	2070	0.4-20.0 (varía mucho)
Poliimida	25% carga: polvo de grafito	5.7	39			12.8	88	900	6210	0.25
	Refuerzo de fibra de vidrio	27.0	186			50.0	345	3250	22 400	17.0
	Laminado	50.0	345			70.0	483	4000	27 580	13.0
Acetal	Copolímero	8.0	55	410	2830	13.0	90	375	2590	1.3
Poliuretano	Elastómero	5.0	34	100	690	0.6	4			No se rompe
Fenólico	General	6.5	45	1100	7580	9.0	62	1100	7580	0.3
Poliéster con refuerzo de fibra de vidrio (Aprox. 30% vidrio en peso)										
	Tendido, molde de contacto	9.0	62			16.0	110	800	5520	
	Moldeado en prensa fría	12.0	83			22.0	152	1300	8960	
	Moldeado por compresión	25.0	172			10.0	69	1300	8960	

Figura 103. Propiedades de resistencia de algunos plásticos.[36]

[36] Figura 99. Tomada de los Apéndices de (Norton, 2000)

10.3 APÉNDICE C

TOLERANCIAS ADECUADAS EN APLICACIONES DE RODAMIENTOS RADIALES DE BOLAS Y DE RODILLOS

PARA EJES

Diámetro del eje		Pequeñas cargas		Cargas normales		Cargas muy fuertes. En general cuando el rodamiento recibe choques. (Por ejemplo, cajas de grasa para F. C.)	
		El rodamiento puede montarse sobre el eje, sin calentarlo previamente		El rodamiento se caliente en aceite a 70° C., aproximadamente, antes de montarlo		El rodamiento se caliente en aceite a 70° C., aproximadamente, antes de montarlo	
		Medidas en mm.					
mayor de	hasta	límite sup.	límite inf.	límite sup.	límite inf.	límite sup.	límite inf.	límite sup.	límite inf.
3	6	+ 0.004	— 0.001	—	—	—	—	—	—
6	10	+ 0.004	— 0.002	—	—	—	—	—	—
10	18	+ 0.005	— 0.003	—	—	—	—	—	—
18	30	—	—	+ 0.011	+ 0.002	—	—	—	—
30	50	—	—	+ 0.013	+ 0.002	+ 0.020	+ 0.009	—	—
50	80	—	—	+ 0.015	+ 0.002	+ 0.024	+ 0.011	+ 0.033	+ 0.020
80	120	—	—	+ 0.018	+ 0.003	+ 0.028	+ 0.013	+ 0.038	+ 0.023
120	180	—	—	+ 0.021	+ 0.003	+ 0.033	+ 0.015	+ 0.045	+ 0.027
180	250	—	—	—	—	+ 0.037	+ 0.017	+ 0.051	+ 0.031
250	315	—	—	—	—	+ 0.043	+ 0.020	+ 0.057	+ 0.034
315	400	—	—	—	—	+ 0.046	+ 0.021	+ 0.062	+ 0.037
Símbolo según el sistema internacional de tolerancias I.S.A.		j 5		k 5		m 5		n 5	

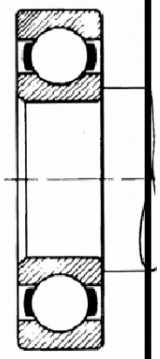


Figura 104. Tolerancias para ejes acoplados a rodamientos.[37]

TOLERANCIAS ADECUADAS EN APLICACIONES DE RODAMIENTOS RADIALES DE BOLAS Y DE RODILLOS

PARA ALOJAMIENTOS

Diámetro interior del soporte		Para transmisiones y otros casos en que los ejes giran a velocidades pequeñas (en general soportes en dos mitades)		En las aplicaciones más corrientes		Cuando el eje gire a velocidades grandes o si se exige una gran precisión (equilibrado perfecto)	
		Medidas en mm.					
mayor de	hasta	límite inferior	límite superior	límite inferior	límite superior	límite inferior	límite superior
10	18	—	-	0	+ 0.018	— 0.005	+ 0.006
18	30	—	-	0	+ 0.021	— 0.005	+ 0.008
30	50	0	+ 0.039	0	+ 0.025	— 0.006	+ 0.010
50	80	0	+ 0.046	0	+ 0.030	— 0.006	+ 0.013
80	120	0	+ 0.054	0	+ 0.035	— 0.006	+ 0.016
120	180	0	+ 0.063	0	+ 0.040	— 0.007	+ 0.018
180	250	0	+ 0.072	0	+ 0.046	—	—
250	315	0	+ 0.081	0	+ 0.052	—	—
315	400	0	+ 0.089	0	+ 0.057	—	—
400	500	0	+ 0.097	0	+ 0.063	—	—
Símbolo según el sistema internacional de tolerancias I.S.A.		H 8		H 7		J 6	

Los datos indicados en estas tablas son válidos para aplicaciones normales en las que se aprovecha toda la capacidad de carga del rodamiento y que es el eje el que gira. En los datos indicados para los ejes se sobreentiende que los rodamientos no son montados sobre manguito de sujeción o de desmontaje, es decir, que van montados directamente sobre el eje.

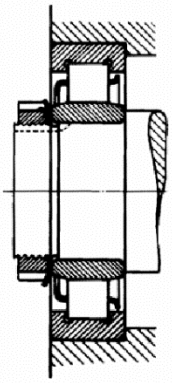


Figura 105. Tolerancias para alojamientos de rodamientos.

[37] Figuras 100 y 101. Tomada de: (CASILLAS, 2008)

11. CONCLUSIONES

- En el software de Siemens NX 10® se desarrolló el modelado ensamble y simulación del robot SCARA paralelo, lo cual nos ayudó a entender mejor los datos obtenidos de la cinemática directa del robot y detectar los posibles agarrotamientos de los eslabones, para poder desarrollar el prototipo y que se pueda tener en cuenta para futuros proyectos de investigación.
- La obtención de la cinemática directa, por medio del software Geogebra fue una herramienta de fácil acceso puesto que el software tiene una interfaz muy amigable con el usuario que nos permitió de forma gráfica mediante una simulación, obtener el registro de datos en una hoja de cálculo la cinemática directa. El único inconveniente del software es el hecho no tener en cuenta las interferencias mecánicas que se presentan al momento de presentarse dichos cruces o configuraciones mecánicas, pero para poder suplir esta falencia se usó el complemento llamado "Diseñador de conceptos de mecatrónica" del software Siemens NX 10®.
  Sin embargo se controló activamente la simulación para evitar el registro de datos en dichas configuraciones.
- El código de programación usado para controlar los motores mediante la tarjeta de control Arduino tuvo un buen rendimiento, un código el cual fue adaptado a las características del "motor a pasos" seleccionado, el objetivo en la fase final del SCARA planar paralelo es generar un código de programación de trayectoria libre, que facilite su estudio, puesto que el objetivo de este proyecto de grado no tiene como fin dar un uso específico al robot SCARA paralelo, por ese motivo no se hizo una programación de trayectoria cerrada, a esto también se suma el hecho de no tener aún el conocimiento necesario para realizar dicha programación, ya que esta programación se realiza con sistemas dinámicos de programación con software mucho más potente.

- El robot SCARA paralelo de 2 GDL diseñado y construido en el presente proyecto, posee actuadores rotatorios los cuales tienen una capacidad muy por encima de las limitaciones y especificaciones de diseño, los actuadores tiene alrededor de un 50% de capacidad adicional a la requerida. Mediante los cálculos se demostró que el robot SCARA paralelo diseñado es apto para futuras investigaciones y aplicaciones de alta exigencia.
- El valor de la incertidumbre, calculado para cada eje en las distintas posiciones de inicio es diferente y todas las gráficas de regresión analizadas son polinómicas lo cual nos representa un margen de error o tolerancia en las posiciones de trabajo.
- El valor de precisión del robot SCARA paralelo de 2 GDL diseñado es de un 99% para cada uno de los ejes **(x,y)** en las diferentes posiciones, esto indica que el robot diseñado y construido origina unas buenas posibilidades para desarrollar trabajos de investigación a futuro.

12. BIBLIOGRAFÍA

Bourbonnais, F., & Bonev, I. (2010). Development of a five-bar parallel robot whit large workspace. Montreal, Canada.

CASILLAS, A. (2008). *MÁQUINAS CÁLCULOS DE TALLER.* España: Autor Editor.

Diymakers. (28 de 12 de 2013). *Mover motores paso a paso con arduino.* Obtenido de http://diymakers.es/mover-motores-paso-paso-con-arduino/

González, V. R. (s.f.). *platea.pntic.mec*. Obtenido de http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/ctrl_rob/robotica/industrial.htm

Mecademic. (2014-2015). DexTAR User's Manual. Copyright c 2014{2015 by Mecademic Inc.

Morales Muñoz, C. G. (2017). DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN CONTROLADOR DE POSICIÓN BASADO EN MODOS DESLIZANTES PARA UN ROBOT TIPO SCARA PARALELO. *Tesis ingenieria electronico y control, Escuela Politécnica Nacional*. Quito.

NMB Minebea GmbH. (s.f.). *cnc25.free*. Obtenido de cnc25.free: http://cnc25.free.fr/documentation/moteurs%20pap/pap_nmb.pdf

Norton, R. L. (2000). *Diseño de Maquinaria.* Mexico: McGraw-Hill.

PKM Tricept. (s.f.). *PKM*. Recuperado el 22 de Febrero de 2018, de http://www.pkmtricept.com/aplicaciones/

Robert L. Mott, P. (2006). *DISEÑO DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS.* Mexico: PEARSON Educacióm.

Serje Martinez, D. D., & Pacheco Bolivar, J. A. (2017). Cinemática paralela en la máquina herramienta: Investigación, desarrollo y tendencias futuras. *DYNA*.

SHINANO KENSHI CORPORATION. (s.f.). Full-line catalog. *The Difference Is Moving*.

Silva, L. A. (2005). *Control Visual de Robots paralelos. Análisis, desarrollo y aplicación a la plataforma robotenis.* Escuela Técnica superior de Ingenieros Industriales. Madrid: Tesis Doctoral.

Villate Gaona, F. J. (2015). Diseño y Construcción de prototipo para mecanizado multiejes en materiales blandos utilizando estructura paralela Stewart-Gough. *Tesis de Maestria, Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá*. Bogotá.

Zabalza, I., & Ros, J. (2007). APLICACIONES ACTUALES DE LOS ROBOTS PARALELOS. *8° Congreso Iberoamericano de Ingenieria Mecanica.* Universidad Publica de Navarra, España.