

**INTEGRACIÓN DE SOLIDWORKS Y LABVIEW PARA LA ELABORACIÓN DE
UN PROTOTIPO VIRTUAL DE UN MANIPULADOR PARALELO TIPO DELTA
DE TRES GRADOS DE LIBERTAD**

CARLOS ANDRÉS HERNÁNDEZ SÁNCHEZ

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA
2016**

**INTEGRACIÓN DE SOLIDWORKS Y LABVIEW PARA LA ELABORACIÓN DE
UN PROTOTIPO VIRTUAL DE UN MANIPULADOR PARALELO TIPO DELTA
DE TRES GRADOS DE LIBERTAD**

CARLOS ANDRÉS HERNÁNDEZ SÁNCHEZ

Trabajo de grado para optar al Título de Ingeniero Mecánico

DIRECTOR

I.M. CARLOS ANDRÉS MESA MONTOYA

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA
2016**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

**Pereira, Risaralda
16/06/2016**

A mi madre, padre y abuelos por el sacrificio que hicieron para que yo llegara a donde estoy en este momento y por abrirme el camino hacia nuevas metas en mi vida.

A Dios por haberme guiado por el buen camino, haberme iluminado y dado la energía para lograr satisfactoriamente esta gran meta.

A mis profesores, que aparte de enseñarme sobre las materias, también me enseñaron a ser una mejor persona y un futuro buen ingeniero.

CONTENIDO

Título	Página
LISTA DE TABLAS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
1. INTRODUCCIÓN	14
1.1 JUSTIFICACIÓN	14
1.2 OBJETIVOS	15
1.2.1 Objetivo General	15
1.2.2 Objetivos Específicos	15
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 Concepto de manipulador paralelo	16
2.2 Clasificación de los manipuladores paralelos	17
2.2.1 Manipuladores paralelos planares	17
2.2.2 Manipuladores paralelos espaciales	17
2.3 Robot	18
2.3.1 Robots humanoids	18
2.3.2 Robots móviles	18
2.3.3 Robots de servicio	18
2.3.4 Robots industriales	19
2.4 Prototipos virtuales	21
2.4.1 Prototipado virtual	22
2.4.2 Aplicaciones	23
2.4.3 Software de diseño asistido por computadora	26
2.4.4 Software de programación gráfica	26
2.5 SolidWorks	27
2.5.1 Características de SolidWorks	27
2.5.2 Módulos de SolidWorks	27
2.5.3 Otras aplicaciones de SolidWorks	28
2.6 NI LabVIEW	28
2.6.1 Instrumentos virtuales	28
2.6.2 Toolkits y módulos de LabVIEW	30
3. DESCRIPCIÓN DEL MANIPULADOR DELTA 3GDL	32
3.1 Geometría del manipulador DELTA 720	32
3.2 Dimensiones del Manipulador	33
3.3 Cinemática del manipulador	34
3.3.1 Cinemática inversa	36
3.3.2 Cinemática directa	37
4. INTEGRACIÓN DE SOLIDWORKS Y LABVIEW	39
4.1 Ensamblaje para la simulación	39
4.2 Preparación del ensamblaje para la simulación	39
4.3 Estudio de Movimiento	40

4.3.1 Tipos de estudio de movimiento	40
4.3.2 Configuración y utilización de los motores virtuales	42
4.3.3 Motor rotatorio	43
4.3.4 Motor lineal	44
4.4 Conexión básica entre SolidWorks y LabVIEW	45
4.5 Proyecto en LabVIEW	45
4.6 Conexión entre LabVIEW y SolidWorks empleando NI SoftMotion	53
4.6.1 Programación en LabVIEW	54
4.6.2 Creación y programación de un VI en el proyecto de LabVIEW	54
4.6.3 Funciones de movimiento del módulo SoftMotion	59
4.6.4 Inicio y fin de una simulación en SolidWorks	68
4.6.5 Programación en serie y paralelo	69
4.6.6 Sensores de SolidWorks en LabVIEW	71
5. PRESENTACIÓN DEL PROTOTIPO VIRTUAL CON SU RESPECTIVA PROGRAMACIÓN	76
5.1 Prototipo virtual del manipulador paralelo DELTA 720 de la Universidad Tecnológica de Pereira	76
5.2 Descripción de la aplicación de control para el prototipo virtual	76
5.2.1 Funcionamiento del panel de control	77
5.2.2 Programación del diagrama de bloques	77
5.2.3 Programación del panel frontal	82
5.2.4 panel frontal del manipulador paralelo DELTA 720	86
6. PRUEBAS Y RESULTADOS	88
6.1 Prueba de movimiento del prototipo virtual	88
6.1.1 prueba de posición del elemento terminal del manipulador paralelo DELTA 720	88
6.1.2 Prueba de trayectoria del manipulador virtual	90
6.2 Análisis de resultados	97
7. CONCLUSIONES, APORTES Y SUGERENCIAS	103
8. BIBLIOGRAFÍA	106
9. ANEXOS	109
Anexo A. Recomendaciones para una correcta instalación	109
Anexo B. Construcción de las piezas	114
Anexo C. Construcción del ensamblaje	130
Anexo D. Plano manipulador DELTA 720 y lista de materiales	
Anexo E. Plano de la base móvil y fija	
Anexo F. Plano piezas de manipulador	
Anexo G. Metodología para construir el prototipo virtual empleando SolidWorks y LabVIEW	150

LISTA DE TABLAS

Tabla

Tabla 1. Parámetros del manipulador delta 720

Página

36

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Manipuladores paralelos planares	17
Figura 2. Esquema del Manipulador tipo delta	18
Figura 3. Robot Cartesiano	19
Figura 4. Robot Cilíndrico	20
Figura 5. Robot polar	20
Figura 6. Robot SCARA	21
Figura 7. Robot Articulado	21
Figura 8. Máquina de prototipado rápido	22
Figura 9. Aplicación del prototipado virtual al diseño de equipos para asistir humanos	24
Figura 10. Aplicación del prototipado virtual al diseño de dispositivos mecánicos	25
Figura 11. Aplicación específica del prototipado virtual en la industria automotriz	25
Figura 12. Aplicación del prototipado virtual a la visualización y comercialización de productos	26
Figura 13. Un panel frontal de LabVIEW, con algunos controles y gráficos	29
Figura 14. Ejemplo de un diagrama de bloques en LabVIEW versión 2009	30
Figura 15. Manipulador paralelo tipo delta de tres grados de libertad de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica	33
Figura 16. Brazos, antebrazos y plataforma móvil del manipulador paralelo DELTA	34
Figura 17. Base fija del manipulador	35
Figura 18. Cadena cinemática del manipulador	35
Figura 19. Interfaz de SolidWorks Motion	40
Figura 20. Interfaz del estudio de movimiento	41
Figura 21. Interfaz de configuración de motor de SolidWorks Motion	43
Figura 22. Menú de selección del tipo de movimiento	44
Figura 23. Menú de selección del tipo de movimiento	45
Figura 24. Explorador de Proyectos	46
Figura 25. Ventana de selección del ensamblaje	46
Figura 26. Ventana del administrador de ejes con los ejes agregados	47
Figura 27. Ventana de activación del Scan Engine	47
Figura 28. Ventana de control de movimiento	48
Figura 29. Ventana de configuración de los ejes	49
Figura 30. Ventana de configuración del ensamblaje	50
Figura 31. Ubicación de la opción Deploy	50
Figura 32. Solucionador de Conflictos	51
Figura 33. Conexión exitosa entre LabVIEW y SolidWorks	51
Figura 34. Panel interactivo de pruebas	52
Figura 35. Panel interactivo de pruebas en acción	53
Figura 36. Panel frontal (izquierda) y diagrama de bloques (derecha)	54
Figura 37. Funciones del diagrama de bloques	55
Figura 38. Ubicación de While loop	56
Figura 39. While Loop	56

Figura 40. Retrasador de tiempo dentro del while loop	57
Figura 41. Área del Timed Loop	58
Figura 42. Ventana de configuración del nodo de entrada	58
Figura 43. Ubicación de los bloques de movimiento	60
Figura 44. Función de línea recta	60
Figura 45. Creación de un eje coordinado	63
Figura 46. Espacio coordinado en el explorador de proyectos	63
Figura 47. Función de trazado de arco	64
Figura 48. Arco trazado por uno de los ejemplos de LabVIEW	64
Figura 49. Trazo realizado por el manipulador con la herramienta de función de arco	65
Figura 50. Función de contorno	66
Figura 51. NI SoftMotion table	66
Figura 52. Tabla para trazar el contorno	67
Figura 53. Trazado realizado por el manipulador mediante la función contorno	67
Figura 54. Ruta de los modos del scan engine	69
Figura 55. Conexión de funciones en serie	70
Figura 56. Conexión de funciones en paralelo	71
Figura 57. Dimensión (cota) entre dos caras	72
Figura 58. Agregando un sensor	72
Figura 59. Definición del sensor	73
Figura 60. Ventana de definición de las líneas	73
Figura 61. Crear control, constante o indicador	74
Figura 62. Ventana para cambiar la propiedad de los sensores	75
Figura 63. Conectando las funciones de línea en paralelo	78
Figura 64. Conectando la función de trayectoria	78
Figura 65. Conectando la función de trayectoria	79
Figura 66. Ubicación de la función fórmula	80
Figura 67. Ventana de la función fórmula	80
Figura 68. Código de un subVI con varias fórmulas...	81
Figura 69. SubVI que controla la posición de los brazos	81
Figura 70. Ubicación de Tab Control	83
Figura 71. Ventana de Tab control	83
Figura 72. Icono de Tab control en el diagrama de bloques	83
Figura 73. Ventana tab control con elementos en su interior	84
Figura 74. Ubicación de la herramienta Waveform Chart	85
Figura 75. Icono de gráfico en el diagrama de bloques	85
Figura 76. Herramienta read en modo "Data"	86
Figura 77. Panel de control del manipulador	87
Figura 78. Primera prueba de posición del manipulador	88
Figura 79. Segunda prueba de posición del manipulador	89
Figura 80. Tercera prueba de posición del manipulador	90
Figura 81. Trayectoria en hélice que debe seguir el manipulador	90

Figura 82. Trayectoria en hélice que realiza el manipulador	91
Figura 83. Valores angulares ideales y reales para el servomotor 1	92
Figura 84. Valores angulares ideales y reales para el servomotor 2	92
Figura 85. Valores angulares ideales y reales para el servomotor 3	93
Figura 86. Par que consume el servomotor 1 sin carga de trabajo	93
Figura 87. Par que consume el servomotor 2 sin carga de trabajo	94
Figura 88. Par que consume el servomotor 3 sin carga de trabajo	94
Figura 89. Par que consume el servomotor 1 con carga de trabajo	95
Figura 90. Par que consume el servomotor 2 con carga de trabajo	95
Figura 91. Par que consume el servomotor 3 con carga de trabajo	96
Figura 92. Trayectoria de P en el eje X	96
Figura 93. Trayectoria de P en el eje Y	97
Figura 94. Trayectoria de P en el eje Z	97
Figura 95. Valores angulares ideales y reales para el servomotor 1 sin carga de trabajo	98
Figura 96. Comparación par ideal y real que consume el servomotor 1 sin carga de trabajo	99
Figura 97. Comparación par ideal y real que consume el servomotor 2 sin carga de trabajo	99
Figura 98. Comparación par ideal y real que consume el servomotor 3 sin carga de trabajo	100
Figura 99. Comparación par ideal y real que consume el servomotor 1 con carga de trabajo	101
Figura 100. Comparación par ideal y real que consume el servomotor 2 con carga de trabajo	101
Figura 101. Comparación par ideal y real que consume el servomotor 3 con carga de trabajo	102
Figura 102. Pantalla de selección de productos de SolidWorks 2014	110
Figura 103. Ventana de complementos de SolidWorks 2014	111
Figura 104. Ventana de lista de productos de LabVIEW 2009	112
Figura 105. Ventana de lista de productos de LabVIEW 2009: instalación de módulos	113
Figura 106. Ventana de selección de módulo de SolidWorks...	115
Figura 107. Ventana del módulo pieza de SolidWorks	116
Figura 108. Línea de construcción	116
Figura 109. Creación de un círculo	117
Figura 110. Construcción del brazo	117
Figura 111. Definición de las cotas iniciales	118
Figura 112. Empleo de la herramienta recortar	118
Figura 113. Menú de la herramienta simetría	119
Figura 114. Croquis exterior del brazo completo	119
Figura 115. Función extruir	120
Figura 116. Brazo	120
Figura 117. Croquis de los agujeros para el taladro	121
Figura 118. Menú del asistente para taladro	122
Figura 119. Brazo con los agujeros	123
Figura 120. Menú de la herramienta matriz lineal	123
Figura 121. Brazo con los agujeros frontales	124
Figura 122. Menú de la herramienta plano	125
Figura 123. Creación de un plano	125

Figura 124. Pieza con los nuevos planos	126
Figura 125. Agujeros en una de las cabezas	126
Figura 126. Menú de la simetría	127
Figura 127. Brazo con todos los agujeros	127
Figura 128. Brazo con aristas redondeadas	128
Figura 129. Selección de la opción material	128
Figura 130. Selección del material	129
Figura 131. Brazo completo	129
Figura 132. Interfaz de usuario del módulo Ensamblaje	130
Figura 133. Ventana para comenzar el ensamblaje	131
Figura 134. Selección de la pieza para un ensamblaje	132
Figura 135. Opción para ver los orígenes de la pieza y el ensamblaje	132
Figura 136. Piezas insertadas para el ensamblaje	133
Figura 137. Flotar o fijar una pieza	133
Figura 138. Menú de relaciones de posición	134
Figura 139. Relaciones de posición estándar	135
Figura 140. Relaciones de posición avanzadas	135
Figura 141. Relaciones de posición mecánicas	136
Figura 142. Selección de las caras para la relación	136
Figura 143. Sub ensamble brazo	137
Figura 144. Piezas requeridas para el antebrazo	137
Figura 145. Relaciones concéntricas	138
Figura 146. Selección de las caras	138
Figura 147. Relación de posición coincidente	138
Figura 148. Relación de posición coincidente b	139
Figura 149. Relación de posición paralela	139
Figura 150. Selección del menú de las piezas	140
Figura 151. Menú del ensamblaje	140
Figura 152. Relación de posición entre planos	141
Figura 153. Sub ensamble antebrazo	141
Figura 154. Sub ensamble conector brazo/antebrazo	142
Figura 155. Sub ensamble base móvil	142
Figura 156. Base fija con sus accesorios	143
Figura 157. Inserción de un sub ensamble	143
Figura 158. Relación concéntrica	144
Figura 159. Menú de la relación de posición “ancho”	144
Figura 160. Selección de las caras	145
Figura 161. Selección de las caras	146
Figura 162. Parámetros de la relación de posición	146
Figura 163. Inserción del conector brazo/antebrazo	147
Figura 164. Inserción del antebrazo	147
Figura 165. Selección de caras y parámetros para definir las rotulas	148

Figura 166. Inserción de la base móvil	149
Figura 167. Manipulador paralelo DELTA 720	149
Figura 168. Diagrama de flujo para crear un prototipo virtual con SW y LB	150

RESUMEN

La necesidad de crear elementos complejos como robots, aviones, automóviles, máquinas industriales, entre otros; conlleva a la fabricación de prototipos para probar su funcionamiento y así detectar posibles defectos en el material o de diseño que fueron pasados por alto, con el fin de corregirlos y crear un nuevo prototipo hasta satisfacer las especificaciones planteadas por los diseñadores y los clientes que desean el producto.

El proceso anteriormente descrito es costoso, debido a que la fabricación de diferentes prototipos para probar el producto genera gastos en el material y, dependiendo de la complejidad de su fabricación, los costos pueden elevarse aún más.

En el presente proyecto de grado, se expone la forma en la cual un prototipo virtual puede ser tan confiable como el prototipo físico; se presentarán las ventajas de éste y como crearlo.

Se darán conceptos básicos sobre los manipuladores, robots, prototipos virtuales y el uso de los programas SolidWorks y LabVIEW y su integración mediante el módulo NI SoftMotion para controlar el ensamblaje creado en SolidWorks.

El prototipo virtual que se presentará en este proyecto de grado estará en capacidad de realizar los movimientos deseados mediante un panel de control diseñado en NI LabVIEW y moverse de manera proporcional al modelo físico del manipulador paralelo DELTA 720 presente en la Universidad Tecnológica de Pereira.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN

En las últimas décadas el desarrollo tecnológico ha ido incrementando exponencialmente; de la misma manera, la necesidad por automatizar procesos y emplear máquinas de alta precisión para generar productos de alta calidad; por ende, se emplean programas computarizados cada vez más apropiados para controlar dichos procesos.

Sin embargo, para construir esas máquinas es necesario crear prototipos para estudiar su movimiento y re diseñar si es necesario. Este proceso es costoso; por lo tanto, el empleo de prototipos virtuales para la simulación del comportamiento de la máquina o el producto deseado produce un ahorro muy considerable para las empresas. Mediante tarjetas de control y servomotores es posible utilizar el mismo software para controlar el modelo final, lo cual también ahorra tiempo, ya que se está creando el prototipo y su control a la vez.

Actualmente en muchas empresas y universidades, entre ellas la Universidad Tecnológica de Pereira se emplean programas CAD y FEM para dar un análisis preliminar al diseño; después, se procede a fabricar el modelo final o el prototipo, corriendo el riesgo de que se presenten errores de diseño que impidan el control del modelo; por lo tanto, en este proyecto de grado se presenta la forma de crear un prototipo virtual que no solamente permite realizar un análisis de elementos finitos (FEM) sino también estudiar el comportamiento que tendrá el modelo bajo condiciones de carga y movimiento, además de las ventajas que se generan al utilizar el programa LabVIEW para controlar el prototipo virtual o el modelo físico mediante un panel como si de un control remoto se tratase.

Además, se presenta la posibilidad futura de que los estudiantes de Tecnología e Ingeniería Mecánica o Mecatrónica presenten sus proyectos de grado mediante prototipos virtuales creando los modelos en programas CAD, operándolos mediante el programa LabVIEW con su programación gráfica si no se cuentan con los medios económicos para crear el modelo real o su prototipo; lo cual, amplía las posibilidades de construir y operar virtualmente máquinas, robots o productos cuyo costo de su prototipo físico sea muy elevado.

Finalmente, se construye el prototipo virtual del manipulador paralelo tipo DELTA 720 presente en la Universidad Tecnológica de Pereira con el fin de que los estudiantes y docentes se interesen en este tipo de máquinas; también, para comprobar la fiabilidad de la construcción del prototipo virtual sobre el prototipo físico.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general. Integrar LabVIEW y SolidWorks mediante la elaboración de un prototipo virtual de un manipulador paralelo tipo DELTA de tres grados de libertad.

1.2.2 Objetivos específicos.

- Elaborar una metodología para la integración de SolidWorks y LabVIEW para la obtención y control de un prototipo virtual.
- Estudiar la cinemática directa e inversa del manipulador paralelo tipo DELTA de la Facultad de Ingeniería Mecánica.
- Obtener un prototipo virtual del manipulador DELTA de tres grados de libertad que posee la Facultad de Ingeniería Mecánica.
- Diseñar un Instrumento Virtual (VI) de control en LabVIEW que permita manipular el prototipo.
- Validar el prototipo virtual por medio de la comparación cinemática de trayectorias, mediante pruebas de movimiento empleando el manipulador paralelo tipo DELTA de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Concepto de manipulador paralelo [1]

Generalmente, un manipulador paralelo se define como un mecanismo de cadenas cinemáticas cerradas independientes, las cuales se unen a una base donde se encuentra ubicado el elemento terminal.

Esta definición generalizada de los manipuladores paralelos es muy abierta: incluye, por ejemplo, mecanismos redundantes con más actuadores que el número de grados de libertad del elemento terminal, también como manipuladores trabajando en cooperación; por lo tanto, es necesario mencionar algunas características de este tipo de mecanismos:

- i. Debe haber al menos dos cadenas cinemáticas unidas al elemento terminal. Cada una de las cadenas debe tener al menos un actuador simple que de movimiento a la cadena cinemática. Por medio de un sensor apropiado se puede medir la variable asociada con el actuador (ángulo de rotación o desplazamiento lineal).
- ii. El número de actuadores debe ser el mismo que el número de grados de libertad del elemento terminal.
- iii. La movilidad del manipulador es cero cuando los actuadores están bloqueados.

Este tipo de mecanismos son interesantes por las siguientes razones:

- i. La carga de trabajo se puede distribuir en mínimo dos cadenas cinemáticas.
- ii. El número de actuadores es mínimo.
- iii. El número de sensores necesarios para un sistema de control de lazo cerrado es menor para este tipo de manipuladores.
- iv. Cuando los actuadores están bloqueados, el manipulador permanece en su posición; éste es un importante aspecto de seguridad para ciertas aplicaciones, tales como los robots empelados en la medicina.

Con lo mencionado anteriormente, se pueden definir los manipuladores paralelos de la siguiente forma: un manipulador paralelo está compuesto de un elemento terminal de n grados de libertad, y una base fija, unidos entre sí por al menos dos

cadena cinemática independiente. El movimiento toma lugar a través de n actuadores simples.

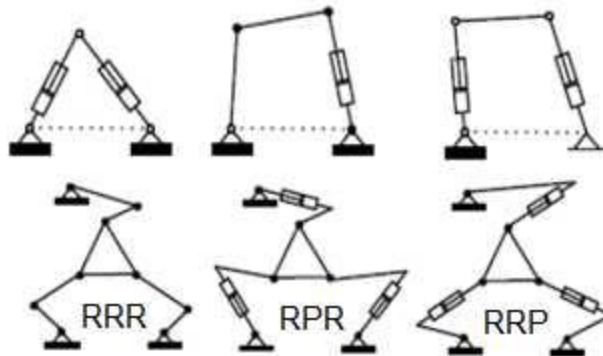
2.2 Clasificación de los manipuladores paralelos [2]

Los manipuladores paralelos se clasifican en dos grupos: manipuladores paralelos planares y manipuladores paralelos espaciales.

2.2.1 Manipuladores paralelos planares. Un manipulador paralelo planar es el cual en el que el elemento terminal del mecanismo desarrolla trayectorias en un único plano de trabajo. Si un manipulador paralelo planar posee un número de cadenas cinemáticas igual al número de grados de libertad del elemento terminal, son denominados manipuladores paralelos completos.

Los manipuladores paralelos planares poseen movimiento sujeto a un plano, de dos o tres grados de libertad; se puede trasladar y rotar sobre un eje perpendicular al mismo (ver figura 1).

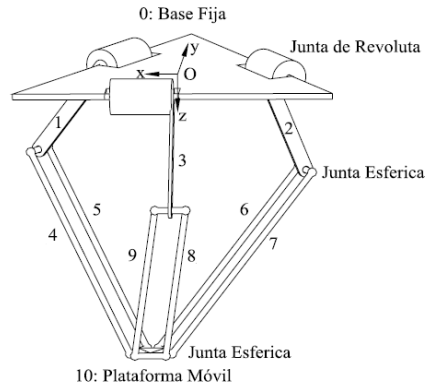
Figura1. Manipuladores paralelos planares



Fuente: Aracil R. Saltaren R. J. Sabater J. M. Reinoso O. Robots paralelos: Máquinas con un pasado para una robótica del futuro. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial. Vol. 3. Núm. 1, 2006.

2.2.2 Manipuladores paralelos espaciales. El manipulador DELTA (ver figura 2) consta de tres cadenas cinemáticas iguales, cada una de ellas formada por un brazo y un antebrazo. Los brazos del manipulador (1, 2, 3) presentan en uno de sus extremos una junta de revolución, donde se acopla a los actuadores que se encargan del movimiento del manipulador. Los antebrazos del manipulador (4 y 5, 6 y 7, 8 y 9) poseen en sus extremos juntas esféricas; debido a la configuración en forma de paralelogramo se pierden dos de los tres grados de libertad que poseen este tipo de juntas, convirtiéndolo en un mecanismo 3RRR.

Figura 2. Esquema del Manipulador tipo delta



Fuente: Tsai, Lung-Wen. (1999). Robot Analysis: The mechanic of Serial and Parallel Manipulators, John Wiley & Sons, Inc.

2.3 Robot [3]

Un robot es una entidad mecánica o virtual inteligente, programada para realizar tareas por su propia cuenta o de forma guiada, es decir, puede ser autónomo o semi- autónomo.

Por la complejidad de su estructura, funcionalidad y componentes, es complicado clasificar a los robots; sin embargo, de manera simple se presentan las siguientes clasificaciones:

2.3.1 Robots humanoides. Los robots humanoides son robots antropomorfos que, además de imitar la apariencia humana, tratan de imitar los demás aspectos que definen al ser humano, hasta el punto de ser capaces de confundirse o integrarse entre ellos sin que la contraparte humana note las diferencias.

2.3.2 Robots Móviles. Son aquellos que tienen la capacidad de moverse alrededor de su entorno al no estar fijos a ningún punto en especial. Pueden moverse a través de extremidades robóticas, ruedas u otra clase de dispositivo. Por el momento, la mayoría de estos robots tienen que guiarse a través de sensores que siguen líneas de un color en específico o con radares que le muestran el camino por donde van.

2.3.3 Robots de servicio. Los robots de servicio son aquellos que ayudan a las personas en la vida cotidiana, en los hogares u oficinas; por ejemplo, la limpieza de la casa, cortar el césped, entre otros.

La Federación Internacional de Robótica (IFR, por sus siglas en inglés) ha propuesto una definición tentativa para el concepto de robot de servicio: “un robot de servicio es un robot que opera semi o totalmente autónomo para realizar servicios útiles para el bienestar de las personas y equipos, con exclusión de las operaciones de la fabricación”.

2.3.4 Robots Industriales. Son aquellos que se emplean en las industrias, generalmente están compuestos de un brazo robótico con un elemento terminal en el cual se encuentra una herramienta, tales como: pinzas, taladros, electrodos de soldadura, sensores de diferentes funciones, entre otros, con el fin de ejecutar una o varias actividades.

La Organización Internacional de la Estandarización (ISO, por sus siglas en inglés) define a un robot industrial de la siguiente manera: “un aparato manipulador programable en tres o más ejes, controlado automáticamente, reprogramable y de propósitos múltiples, el cual puede estar en un lugar fijo o móvil, para su uso en aplicaciones de automatización industrial”, [4].

Los robots Industriales se pueden clasificar en las siguientes categorías:

2.3.4.1 Robot Cartesiano. Se emplean en actividades que impliquen la colocación de piezas, aplicación de sellador, operaciones de manufactura, manejo de herramientas y soldadura de arco. Tienen dos o más articulaciones prismáticas y sus ejes coinciden con el plano cartesiano (ver figura 3).

Figura 3. Robot Cartesiano



Fuente: Ditect Industry. (2015). Robot cartesiano de 3 ejes para prensa de inyección. [figura]. Recuperado de <http://www.directindustry.es>

2.3.4.2 Robot Cilíndrico. Se emplean en operaciones de montaje, soldadura y fundición. Es un robot en que sus ejes forman un sistema de coordenadas cilíndrico (ver figura 4).

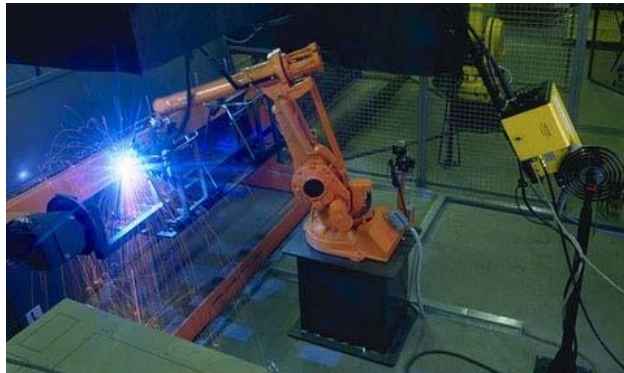
Figura 4. Robot Cilíndrico.



Fuente: ORYAZÚN, Juan. P. (2015). 50 años de robots industriales. [figura]. Recuperado de <http://www.mecatronicos.org>

2.3.4.3 Robot Esférico o Polar. Se emplean en el manejo de maquinaria, soldadura y fundición. A diferencia del robot cilíndrico, sus ejes forman un sistema de coordenadas polar (figura 5).

Figura 5. Robot polar.



Fuente: Universiti Putra Malaysia. Manipulators Structures. (2015). [figura]. Recuperado de <http://onlinelearningofrobotics.50megs.com>

2.3.4.4 Robot SCARA. Empleado en actividades como la colocación de piezas, aplicación de selladores, operaciones de montaje y manejo de maquinaria. Está conformado de dos articulaciones rotativas y paralelas, tal como se ve en la figura 6.

Figura 6. Robot SCARA.



Fuente: Direct Industry. (2015). Robot SCARA de 4 ejes para carga baja. [figura]. Recuperado de <http://www.directindustry.com>.

2.3.4.5 Robot Articulado. Empleado en montajes, fundición, soldadura, pintura. Está conformado por un brazo que tiene por lo menos tres articulaciones rotativas (ver figura 7).

Figura 7. Robot Articulado



Fuente: Universiti Putra Malaysia. (2015). Manipulators Structures. [figura]. Recuperado de <http://onlinelearningofrobotics.50megs.com>

2.4 Prototipos virtuales

Para tener una idea clara de que es un prototipo virtual, primero se debe definir el concepto de prototipo: un prototipo es un borrador físico del elemento que se desea fabricar o estudiar, una máquina hecha con distintos materiales o dispositivos, desde los que están a nuestro alcance o que sobraron de otras máquinas hasta los que son comprados o diseñados y construidos individualmente.

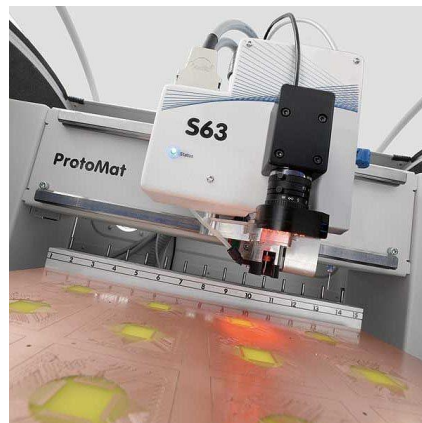
El prototipo se construye con el fin de corroborar que la máquina diseñada en la computadora es funcional en la vida real y realizar correcciones y mejoras en el diseño final; sin embargo, muchas veces el prototipo no es lo que se espera o no es

funcional, por lo que debe ser reparado o muchas veces reconstruido, lo que implica pérdidas de dinero y tiempo.

Para solucionar este problema existen diferentes alternativas, por ejemplo: la impresión 3D, en la cual se pueden crear prototipos rápidos y relativamente económicos, debido a que éstas pueden formar una pieza o modelo físico a partir de un modelo virtual diseñado previamente en el computador con materiales plásticos o metálicos según los requerimientos y la impresora a la que se tiene acceso.

Las Máquinas de prototipado rápido emplean sistemas laser o estéreo-litografía para ir dando forma a las piezas o modelos. Pero la limitante es que las impresoras son costosas y los modelos son pequeños o a escala, además, muchas piezas móviles no pueden construirse. En la figura 8 se puede ver una máquina de prototipado rápido por láser, [3].

Figura 8. Máquina de prototipado rápido.



Fuente: Direct Industry. (2015). Máquina de prototipado rápido para PCB. [figura]. Recuperado de <http://www.directindustry.es>

2.4.1 Prototipado Virtual. [5] El prototipado virtual es el diseño y generación de un producto con suficientes características claves que permiten su evaluación frente a los requerimientos. La denominación de virtual indica que el producto aun no es desarrollado físicamente; sin embargo, existe una representación visual que permite realizar observaciones, análisis y manipular el producto, el cual posee el mismo comportamiento que el modelo físico; no obstante, éste se encuentra en un ambiente virtual generado por computador. El prototipado virtual se puede enmarcar dentro del campo de la realidad virtual; desde este punto de vista los prototipos virtuales son parte esencial de lo que es realidad virtual.

El prototipo virtual puede ser tratado desde dos frentes principales:

- i) el desarrollo de aplicaciones

ii) como usuario.

El primer frente requiere de parte del desarrollador un amplio conocimiento de desarrollo y manipulación de gráficos por computador, así como de herramientas computacionales que permitan integrar las características de movimiento e interactividad que requiere la aplicación que se desarrolla. El desarrollador es quien “Fabrica” el prototipo; por lo tanto, éste conoce el código de programación mediante el cual fue desarrollado y, por consiguiente, dado que conoce el código, se encuentra en capacidad de modificar relativamente fácil el prototipo cuando se requiera.

El segundo frente, el de usuario, requiere del conocimiento específico de herramientas diseñadas para la producción de prototipos virtuales, ya sea en 2 o en 3 dimensiones dependiendo de la aplicación que sea requerida, que van desde estructuras hasta elementos robóticos. El usuario no conoce el código de desarrollo del prototipo virtual; su trabajo es generar el modelo de manera que se asemeje y actúe de la misma manera que el objeto real.

2.4.2 Aplicaciones. Las aplicaciones de un prototipo virtual son bastas; no obstante, en donde más se utilizan los prototipos virtuales hoy día es en la industria de la automoción, en donde las empresas ahorran millones de dólares al emplear prototipos para estudiarlos tanto física como estéticamente bajo entornos completamente virtuales. [3]

2.4.2.1 Equipos para asistir humanos. Este campo es muy importante para el prototipado virtual debido a que para cada usuario hay requerimientos y funciones diferentes, lo que causa que haya una necesidad de crear elementos que sean específicos de cada individuo que los ayude a mejorar su calidad de vida. Adicionalmente, cambios biológicos que ocurren sobre el tiempo pueden requerir ajustes, mantenimiento y un posible rediseño y remanufactura (por ejemplo, gafas, brazos ortopédicos, entre otros).

Como el volumen de productos personalizados es reducido, se deben disminuir los costos de manufactura y, por consiguiente, se deben automatizar los procesos de derivar las especificaciones del producto y del diseño detallado del mismo. En la fabricación de bajo volumen de productos personalizados, existe una limitación para justificar un costoso proceso de fabricación y evaluación de prototipos experimentales; debido a esto, se crean grandes beneficios económicos cuando se diseñan, crean, miden y evalúan prototipos virtuales.

En este tipo de aplicaciones se realiza un modelado del cuerpo humano de tal manera que sea apropiado para su uso en aplicaciones interactivas. Se consideran diferentes tipos de rasgos, como: apariencia y movimiento, acción autónoma y destrezas como: gestos, atención y locomoción.

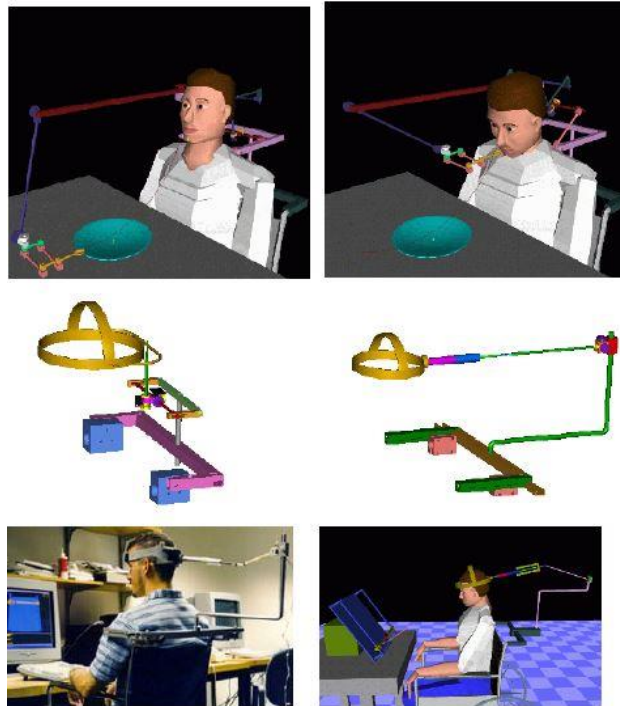
Usualmente se emplean para simular tareas que implican la interacción del cuerpo humano con el mundo físico, cuya ejecución puede ser riesgosa para seres humanos reales.

Los humanos virtuales pueden ser utilizados como:

- Substitutos para el “ente real” en evaluaciones de ergonomía de diseños de vehículos basados en computador, áreas de trabajo, máquinas herramientas, líneas de ensamblaje, entre otros.
- Para la integración de representaciones en tiempo real de nosotros mismos u otros participantes en ambientes virtuales.

En la figura 9 se puede apreciar un equipo realizado mediante prototipado virtual para asistir humanos.

Figura 9. Aplicación del prototipado virtual al diseño de equipos para asistir humanos.



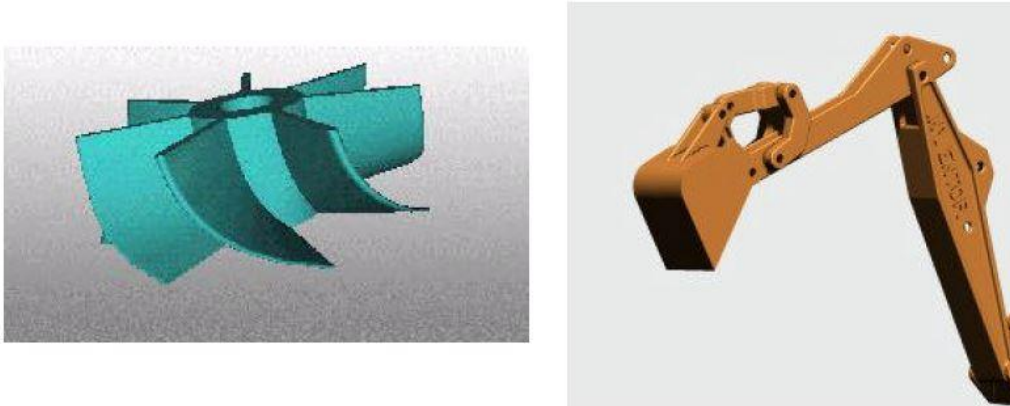
Fuente: referencia [5]

2.4.2.2 Diseño de equipos mecánicos y mecatrónicos. Quizá este sea el campo donde más incursiona el prototipado virtual, debido a que las industrias de elementos mecánicos (Automotriz, Aeroespacial, Aviación, Robots Industriales, entre otros), emplean herramientas CAD para realizar y analizar sus diseños de manera más detallada. En una misma herramienta, se pueden encontrar diferentes métodos de análisis como: estudio de movimiento, fluidos, térmicos, elementos finitos, entre otros, para comprobar la validez del diseño desde el punto de vista estructural.

Gracias a los avances que han obtenido las herramientas CAD en este campo al darle a dichas herramientas la capacidad de generar los prototipos paramétricamente; es decir, un modelo se puede diseñar en base a ecuaciones que relacione una característica específica, se genera un ahorro significativo de tiempo en la optimización y desarrollo de los diseños.

En la figura 10 se observan dos elementos diseñados en software de diseño CAD.

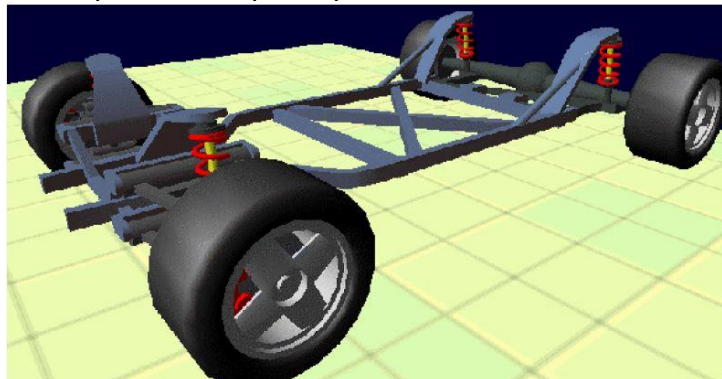
Figura 10. Aplicación del prototipado virtual al diseño de dispositivos mecánicos.



Fuente: referencia [5]

En la figura 11 se aprecia una aplicación específica a la industria automotriz del prototipado virtual.

Figura 11. Aplicación específica del prototipado virtual en la industria automotriz.



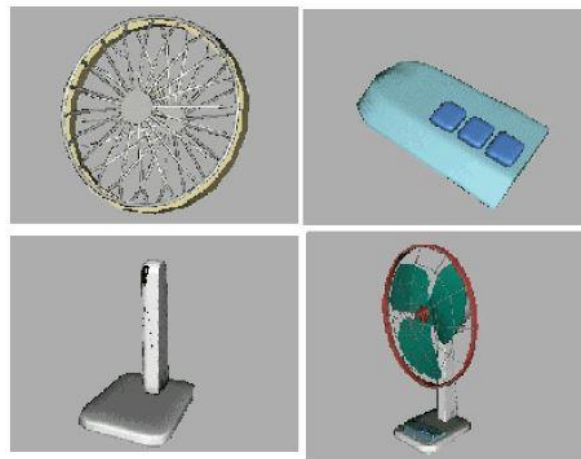
Fuente: referencia [5]

2.4.2.3 Generación de elementos para realidad virtual. El prototipado virtual hace parte de la realidad virtual como se mencionó anteriormente; esto se debe a que, dentro de la realidad virtual, los elementos deben parecer y comportarse en la manera posible igual que el elemento real que se está simulando.

2.4.2.4 Comercio- personalización de productos. Con el auge del internet y el comercio en línea se abre un nuevo campo de aplicación para el prototipado virtual, la personalización de productos. Empleando prototipos virtuales de las partes que componen un dispositivo o un equipo, el cliente puede configurar el producto de una manera sencilla y a su gusto. Lo único que debe hacer es seleccionar las partes de un catálogo en línea, armar su producto y decidir si lo compra o no, [5].

En la figura 12 se aprecia un ejemplo de personalización de productos virtualmente para un ventilador.

Figura 12. Aplicación del prototipado virtual a la visualización y comercialización de productos.



Fuente: referencia [5]

2.4.3 Software de diseño asistido por computadora. [3] El software de diseño asistido por computadora es empleado mayormente por ingenieros, arquitectos y otros profesionales para dibujar en dos dimensiones (2D) o modelar en tres dimensiones (3D) desde piezas o herramientas simples, hasta ensamblajes complejos de maquinaria o casas, en caso de los arquitectos. El software en 2D se basa en entidades geométricas vectoriales y se añaden superficies y sólidos para el 3D.

Existen varias marcas de software CAD en el mercado, por ejemplo: SolidEdge, AutoCAD, *SolidWorks* y Autodesk Inventor; no obstante, para la realización de este proyecto se empleará solamente un paquete de software CAD: *SolidWorks*, debido a que LabVIEW solo posee compatibilidad con este programa.

2.4.4 Software de programación gráfica. El software de programación gráfica, emplea un entorno gráfico para asociar instrucciones, variables, archivos, objetos y subprogramas de manera simple valiéndose de expresiones visuales, arreglos

espaciales de texto y símbolos gráficos. Entre los paquetes más comunes de programación gráfica se encuentran *Ni LabVIEW*, Simulink y Agilent VEE, [3].

Para este proyecto se hará uso de la herramienta *LabVIEW* de la empresa *National Instruments*, porque permite la comunicación con SolidWorks a través de su módulo *NI SoftMotion*.

2.5 SolidWorks [6]

SolidWorks es un programa de diseño asistido por computadora para modelado mecánico por medio del cual, se crean piezas y conjuntos en el que se puede extraer planos técnicos y todo tipo de información necesaria para la producción.

2.5.1 Características de SolidWorks. SolidWorks cuenta con diversas características que mejoran la experiencia de usuario, ya que facilitan la utilización del programa con interfaces intuitivas.

2.5.1.1 Asociatividad. Todos los documentos (Pieza, Ensamblaje o Plano) están vinculados y la modificación. Un fichero de pieza modifica el de ensamble y los planos asociados de forma automática, sin la participación del usuario. Los ficheros se actualizan incluso si éstos se encuentran cerrados.

2.5.1.2 Funciones geométricas inteligentes. La creación de taladros, chaflanes, redondeos, vaciados o la creación de nervios, entre otras operaciones, son creadas de forma rápida, ágil e intuitiva.

2.5.1.3 Gestor de diseño. También conocido como árbol de operaciones o FeatureManager. En él se incluyen todas las operaciones que se han efectuado para conformar la pieza durante su diseño; en el gestor de diseño se pueden modificar las características de las piezas o dibujos para adaptarse a las condiciones de diseño o corregir errores que surgieron durante éste.

2.5.2 Módulos de SolidWorks. Los módulos de SolidWorks son los ambientes de diseño donde se trabaja para lograr el objetivo deseado.

2.5.2.1 Pieza. En el módulo pieza existe un conjunto de funciones e iconos que permiten crear modelos tridimensionales, partiendo de geometrías de croquis en 2D mediante los que se obtienen sólidos, superficies, estructuras metálicas, piezas de chapa, piezas multicuerpo, entre otros.

2.5.2.2 Ensamblaje. Está formado por un entorno de trabajo preparado para crear conjuntos o ensamblajes mediante la inserción de los modelos 3D creados en el módulo Pieza. Los ensamblajes se definen por el establecimiento de relaciones geométricas entre las piezas integrantes.

2.5.2.3 Plano o Dibujo. Permite crear planos de las vistas de los modelos o ensamblajes de forma automática y en muy poco tiempo. El módulo permite obtener proyecciones ortogonales, secciones y cortes, acotación, lista de materiales, vistas explosionadas, entre otras muchas funciones.

2.5.3 Otras aplicaciones de SolidWorks. Estas aplicaciones tienen que ver con la parte de simulación que posee SolidWorks.

2.5.3.1 Simulación y movimiento (SolidWorks Motion). Es una herramienta de simulación física que permite evaluar como la forma, las dimensiones y las relaciones geométricas establecidas entre sus piezas definen la cinemática de su conjunto.

Se pueden agregar motores rotativos, lineales, el efecto de la gravedad, resortes, amortiguadores, contactos entre partes, análisis de elementos finitos, optimización, entre otros; la simulación de movimiento obtenida arroja resultados de cargas y desplazamientos que son de utilidad para el análisis del conjunto que se está modelando.

2.5.3.2 Análisis de Movimiento. Esta característica se tratará más adelante.

2.5.3.3 Análisis de interferencia. Está formado por herramientas incluidas en el módulo ensamblaje; cuyo objetivo es detectar posibles interferencias entre las partes que conforman el ensamblaje.

2.5.3.4 SmartMates (tecnología inteligente). Las herramientas SmartMates permiten ahorrar tiempo de diseño al permitir crear relaciones de posición de forma automática en los ensamblajes.

2.6 NI LabVIEW

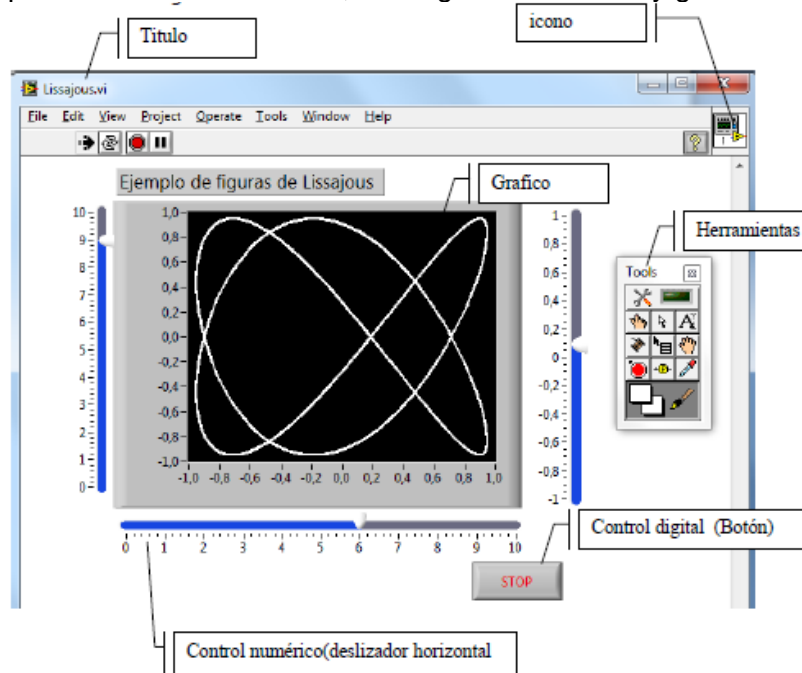
LabVIEW (*Laboratory Instrument Engineering Workbench*) es un lenguaje de programación básico para el diseño de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control. LabVIEW permite diseñar interfaces de usuario mediante una consola interactiva basada en software. Se puede diseñar especificando un sistema funcional, diagrama de bloques o notación de diseño de Ingeniería. LabVIEW es a la vez compatible con otras herramientas de desarrollo similares y puede trabajar con programas de otra área de aplicación como Matlab y SolidWorks, [7].

2.6.1 Instrumentos Virtuales (VI). [8] Cuando se diseñan programas con LabVIEW, se trabaja siempre bajo un sistema denominado VI o instrumentos virtuales, se pueden crear VI a partir de especificaciones funcionales que el diseñador deseé. Los VI se pueden utilizar en cualquier otra aplicación como una subfunción dentro de un programa general.

Los instrumentos virtuales constan de tres partes:

- **Panel Frontal**, donde se diseña la interfaz de usuario. En el panel frontal están ubicados todos los indicadores y controles que el usuario puede ver cuando el programa esté en ejecución (ver figura 13).

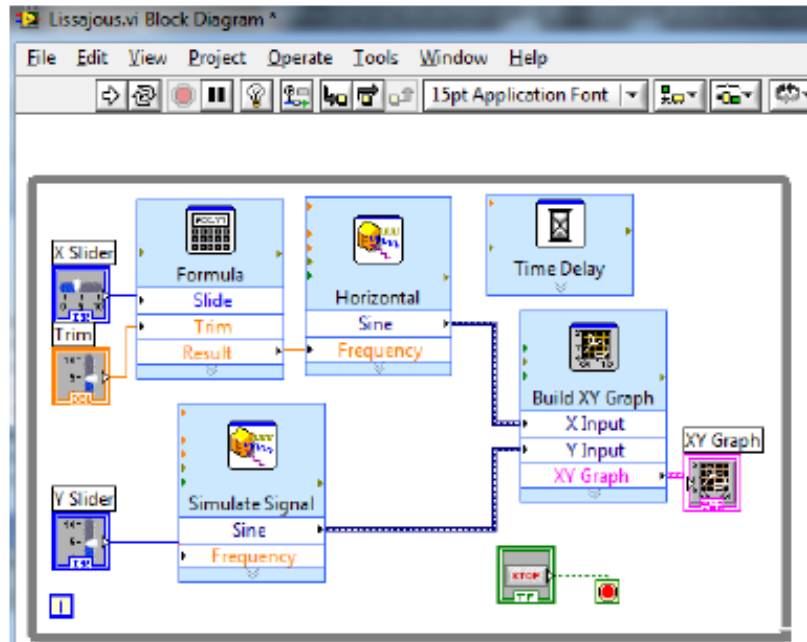
Figura 13. Un panel frontal de LabVIEW, con algunos controles y gráficos



Fuente. Referencia [8]

- **Panel de programación**, donde se puede diseñar de manera gráfica el funcionamiento del sistema creado. Se basa en la realización de operaciones mediante la asignación de iconos que representen los datos numéricos y los procedimientos que se deben realizar.
- **Diagrama de bloques**, se usan en este diagrama estructuras de programación y flujo de datos entre las diferentes entradas y salidas a través de líneas (ver figura 14).

Figura 14. Ejemplo de un diagrama de bloques en LabVIEW versión 2009



Fuente. Referencia [8]

2.6.2 Toolkits y módulos de LabVIEW. [9] LabVIEW cuenta con diferentes módulos y toolkits que se especializan en incrementar la funcionalidad y versatilidad del software. Además, frecuentemente se desarrollan nuevos toolkits y módulos, lo cual amplía la gama de aplicaciones que se pueden encontrar en LabVIEW. La mayoría de los toolkits existentes fueron desarrollados por National Instruments (NI), otros son creados por terceras empresas llamadas empresas de alianza. A continuación, se describirán algunos de los módulos y Toolkits que se utilizarán para realizar la conexión entre SolidWorks y LabVIEW.

Los siguientes módulos y toolkits se encargan de optimizar la utilización de recursos de LabVIEW para facilitar al computador manejar toda la información que esté siendo procesada por el software. No son fundamentales para vincular SolidWorks con LabVIEW, pero si son gran ayuda en el momento del procesamiento de datos; además, permiten ejecutar diagramas de bloques de lazos cerrados o abiertos y utilizar representaciones como función de transferencia.

- **Módulo LabVIEW Real Time**
- **Real time execution trace toolkit**
- **Módulo NI control design and simulation**

Ahora se explicarán de una manera más específica los módulos y toolkits que permiten la vinculación entre SolidWorks y LabVIEW.

2.6.2.1 NI Motion Assistant. Permite diseñar aplicaciones de control de movimiento en un entorno interactivo en 3D y convertirlo a código C para cualquier compilador C o instrumentos virtuales (VI) de LabVIEW. También expone su funcionalidad de contornos inteligentes de pendiente con un API que puede ser llamado por el usuario desde C, visual Basic o LabVIEW, también puede importar perfiles de movimiento desde programas CAD y de dibujo, cuenta con la capacidad de controlar actuadores de motores paso a paso, servoactuadores y piezoactuadores y puede utilizar aplicaciones de uno o más ejes.

2.6.2.2 NI LabVIEW SoftMotion. Ofrece desarrollo gráfico para aplicaciones personalizadas de control de movimiento. Permite utilizar proyectos de LabVIEW para configurar todos los ajustes de ejes de movimiento, probar la configuración y afinar los motores. Una vez la configuración de hardware esté terminada, se puede utilizar un panel de pruebas interactivo para validar la configuración y mover ejes individuales para verificar la configuración del hardware.

NI SoftMotion ofrece la comodidad de programar perfiles de movimiento mediante un bloque de función API de alto nivel, basado en la biblioteca de control de movimiento definido por PLCopen; incluyendo bloques de función para tipos de movimiento como línea recta, arcos y moldeados, así como bloques de función para opciones avanzadas como engranajes y levas electrónicos.

También tiene funciones avanzadas para diseño personalizado de aplicaciones de movimiento incluyendo generación de trayectorias, interpolación spline, control de posición y velocidad e implementación de codificador.

2.6.2.3 NI LabVIEW SoftMotion para SolidWorks. National Instruments ofrece esta versión de software para simular los diseños creados en SolidWorks usando perfiles de movimiento desarrollados con bloques de función NI SoftMotion, por esta razón el usuario puede visualizar y optimizar el diseño y evaluar diferentes conceptos de diseño antes de gastar en prototipos físicos.

CAPITULO 3

DESCRIPCIÓN DEL MANIPULADOR DELTA DE TRES GRADOS DE LIBERTAD CONSTRUIDO EN LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

3.1 Geometría del manipulador DELTA 720

El manipulador de la Facultad de Ingeniería Mecánica corresponde a la clase espacial como el que se describe en el numeral 2.2.2 (ver figura 2).

Para este tipo de manipulador se tienen 11 eslabones y 15 articulaciones, de las cuales tres son de rotación y 12 esféricas y contiene seis grados pasivos de libertad. Si se emplea la ecuación para determinar los grados de libertad, se tiene:

$$F = \lambda(n - j - 1) + \sum_i f_i - f_p \quad (1) [2]$$

dónde:

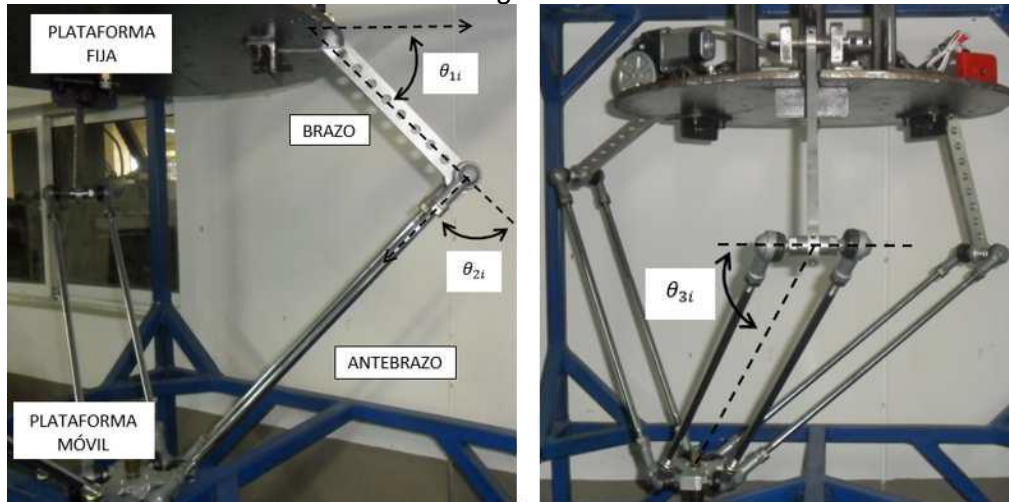
- F : grados de libertad del mecanismo.
- λ : grados de libertad del espacio en el cual se pretende que funcione el mecanismo.
- n : número de eslabones del mecanismo.
- j : número de uniones del mecanismo, incluyendo el eslabón fijo.
- f_i : grados de movimiento relativo permitido por la unión i .
- f_p : grados pasivos de libertad del mecanismo.

Resolviendo la ecuación 1, se obtiene que los grados de libertad del manipulador paralelo son:

$$F=3$$

En la figura 15 se pueden observar dos fotografías del manipulador paralelo de la facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Figura 15. Manipulador paralelo tipo delta de tres grados de libertad de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica



Fuente: referencia [2]

3.2 Dimensiones del manipulador

El manipulador paralelo DELTA 720 fue diseñado y construido teniendo en cuenta el espacio que ocupará en la Facultad de Ingeniería Mecánica.

En la referencia [2] se estudiaron tres posibles tipos de manipuladores delta de acuerdo a su tamaño:

- Manipuladores DELTA de tres grados de libertad de pequeña dimensión: la longitud sumada del brazo y el antebrazo es inferior a 800 mm.
- Manipuladores DELTA de tres grados de libertad de mediana dimensión: presentan una longitud sumada de brazo y antebrazo entre 800 y 1200 mm.
- Manipuladores DELTA de tres grados de libertad de gran dimensión: la longitud sumada del brazo y antebrazo es mayor a 1200 mm.

De acuerdo a la referencia [2], se presenta un desarrollo para determinar la longitud de los diferentes elementos que conforman el manipulador basándose en la tesis doctoral de Reymond Clavel "Conception d'un robot parallele rapide a 4 degres de liberte" para obtener un máximo volumen de trabajo.

Uno de los principales parámetros de clasificación de los manipuladores paralelos tipo DELTA se denomina dimensión global, ésta se obtiene al sumar las longitudes del brazo y el antebrazo del manipulador, el manipulador paralelo construido se denomina DELTA 720.

- longitud del brazo: 250 mm
- longitud del antebrazo 470 mm
- $L_{\text{brazo}} + L_{\text{antebrazo}} = 720$ mm.

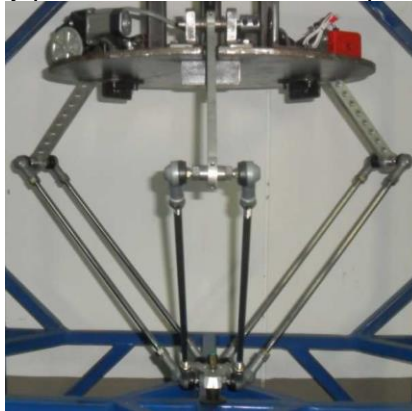
Por lo tanto, el manipulador DELTA 720 se encuentra dentro de la clasificación de los manipuladores DELTA de tres grados de libertad de pequeña dimensión.

Como no se disponen de los planos de cada uno de los elementos del manipulador, se procederá a aplicar un proceso de Ingeniería inversa, tomando medidas al DELTA 720 para crear los planos y así construirlo dentro de la herramienta CAD. Los planos se encuentran en los anexos D, E y F.

3.3 Cinemática del manipulador. [2] Para el análisis cinemático del manipulador, se debe establecer la ubicación del actuador final que se encuentra en el centro de la plataforma móvil. Para lograr esta posición se tienen en cuenta los valores angulares que adopten los brazos y antebrazos del manipulador. Para ello se elige un sistema de coordenadas de referencia para realizar un análisis geométrico.

En la figura 16 se muestra el manipulador en un plano frontal.

Figura 16. Brazos, antebrazos y plataforma móvil del manipulador paralelo DELTA.



Fuente: referencia [2]

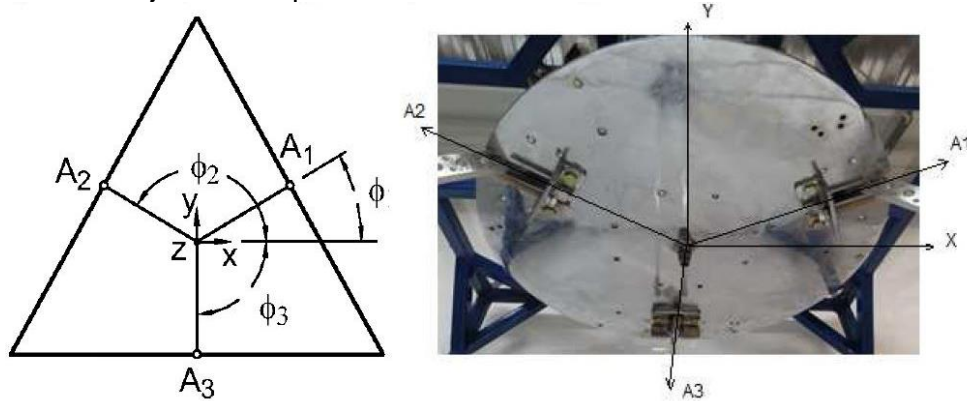
El sistema de coordenadas (x, y, z) que se elige, se encuentra localizado en la plataforma fija, observando el plano inferior se definen los planos ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 , los cuales son parámetros constantes pertenecientes a la geometría del manipulador; los actuadores se encuentran ubicados a un ángulo de 120° uno con respecto del otro. De acuerdo a los ejes de referencia seleccionados los ángulos son:

$$\phi_1 = 30^\circ, \phi_2 = 150^\circ, \phi_3 = -90^\circ$$

Para estudiar las demás características geométricas del manipulador, se definió un sistema de coordenadas adicional (x_i, y_i, z_i) , en la junta de revolución de cada uno de los brazos del manipulador.

En la figura 17 se muestra el sistema de coordenadas correspondiente a las características geométricas del manipulador.

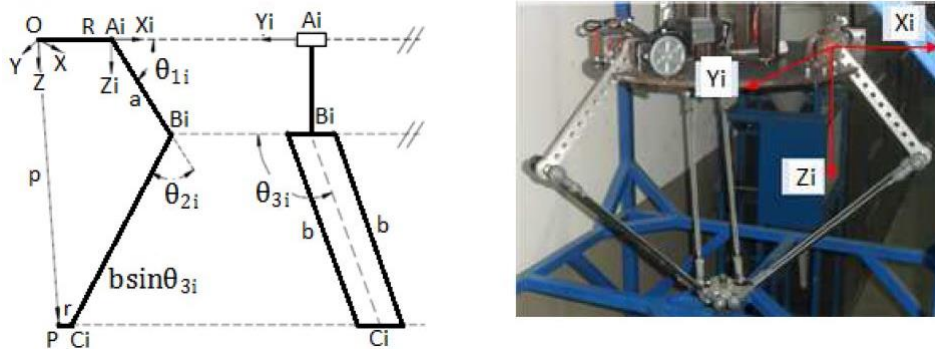
Figura 17. Base fija del manipulador.



Fuente: referencia [2]

El eje x_i se encuentra girado un ángulo ϕ_1 con respecto al eje x del sistema de coordenadas global. El eje y_i se sitúa en la dirección del eje de rotación de la articulación en A_i , y el eje z_i está en la dirección perpendicular a la articulación, como se muestra en la figura 18. Se definen tres nuevos ángulos que sirven para determinar la posición del manipulador, se denominan $\theta_{1i}, \theta_{2i}, \theta_{3i}$.

Figura 18. Cadena cinemática del manipulador.



Fuente: referencia [2]

El ángulo θ_{1i} se mide desde el eje X_i hasta la línea formada por el segmento $\overline{A_1B_1}$. El ángulo θ_{2i} está definido desde la extensión de la línea del segmento $\overline{A_1B_1}$ hasta la línea definida por la intersección del plano del paralelogramo y el plano $\overline{X_1Z_1}$. El ángulo θ_{3i} se mide desde una línea paralela al eje Y_i , que pasa por la articulación B_i ,

hasta la dirección formada por el segmento $\overline{B_1C_1}$. Estos ángulos están definidos para las tres cadenas cinemáticas que constituyen el manipulador delta.

En la tabla 1 se listan sus valores.

Tabla 1. Parámetros del manipulador DELTA 720.

Cadena Cinemática	Ángulos asociados a la cadena cinemática			
1	$\Phi_1= 30^\circ$	θ_{11}	θ_{21}	θ_{31}
2	$\Phi_2= 150^\circ$	θ_{12}	θ_{22}	θ_{32}
3	$\Phi_3= -90^\circ$	θ_{13}	θ_{23}	θ_{33}

Al tener tres grados de libertad, la posición del actuador que se encuentra en la plataforma móvil se determina a partir de las posiciones de los ángulos θ_{11} , θ_{12} y θ_{13} .

Otras características geométricas del manipulador que se pueden observar en la figura 18 son:

- R : Distancia entre el centro de la plataforma fija hasta la articulación de rotación del brazo. En este punto se acoplan los brazos del manipulador a su respectivo motor.
- r : Distancia entre el centro de la plataforma móvil, y el punto de unión de las articulaciones esféricas inferiores con la plataforma móvil.
- a : Longitud del brazo del manipulador. Esta distancia se toma desde el eje de la junta rotacional hasta el eje del punto de unión de las articulaciones esféricas superiores.
- b : Longitud del antebrazo del manipulador. Esta distancia se mide desde los centros de rotación de las juntas esféricas superior e inferior.

3.3.1 Cinemática inversa. La cinemática inversa consiste en la asignación de un punto P conocido correspondiente a la ubicación de plataforma móvil en el espacio y, mediante las ecuaciones de la cinemática inversa se deben determinar las posiciones angulares de los brazos del manipulador θ_{11} , θ_{12} y θ_{13} , que satisfacen la configuración deseada.

En los numerales 4.1 y 4.2 de la referencia [2] se sigue el procedimiento matemático adecuado para determinar los ángulos θ_{11} , θ_{12} y θ_{13} requeridos para establecer la posición conocida del punto P (x , y , z); al finalizar el desarrollo se llega a las siguientes ecuaciones:

Cadena cinemática 1:

$$\theta_{11} = 2 * \operatorname{atan} \left[\frac{-2q_1 \pm \sqrt{4q_1^2 - 4(Cx_1^2 - k_1^2)}}{2(Cx_1 + k_1)} \right] \quad (2)$$

dónde:

$$k_1 = a + b * \sin\theta_{31} * \cos\theta_{21}$$

$$q_1 = b * \sin\theta_{31} * \sin\theta_{21}$$

$$\theta_{31} = \operatorname{acos} \left(\frac{-Px * \sin 30^\circ + Py * \cos 30^\circ}{b} \right)$$

Cadena cinemática 2:

$$\theta_{12} = 2 * \operatorname{atan} \left[\frac{-2q_2 \pm \sqrt{4q_2^2 - 4(Cx_2^2 - k_2^2)}}{2(Cx_2 + k_2)} \right] \quad (3)$$

dónde:

$$k_2 = a + b * \sin\theta_{32} * \cos\theta_{22}$$

$$q_2 = b * \sin\theta_{32} * \sin\theta_{22}$$

$$\theta_{32} = \operatorname{acos} \left(\frac{-Px * \sin 150^\circ + Py * \cos 150^\circ}{b} \right)$$

Cadena cinemática 3:

$$\theta_{13} = 2 * \operatorname{atan} \left[\frac{-2q_3 \pm \sqrt{4q_3^2 - 4(Cx_3^2 - k_3^2)}}{2(Cx_3 + k_3)} \right] \quad (4)$$

dónde:

$$k_3 = a + b * \sin\theta_{33} * \cos\theta_{23}$$

$$q_3 = b * \sin\theta_{33} * \sin\theta_{23}$$

$$\theta_{33} = \operatorname{acos} \left(\frac{-Px * \sin(-90^\circ) + Py * \cos(-90^\circ)}{b} \right)$$

En general:

$$\theta_{2i} = \operatorname{acos} \left[\frac{Cx_i^2 + Cy_i^2 + Cz_i^2 - a^2 - b^2}{2 * a * b * \sin\theta_{3i}} \right]$$

$$Cx_i = Px * \cos\theta_i + Py * \sin\theta_i + r - R$$

$$Cy_i = -Px * \sin\theta_i + Py * \cos\theta_i$$

$$Cz_i = Pz$$

Estas ecuaciones se retomarán más adelante para realizar las pruebas en el prototipo virtual del manipulador.

3.3.2 Cinemática directa. En este caso se desea conocer la posición final del actuador de la base móvil en el punto P (x, y, z) dado el sistema de coordenadas generalizado θ_{11} , θ_{12} y θ_{13} .

El desarrollo matemático de la cinemática directa se puede observar en el numeral 4.3 de la referencia [2]; en el concepto de este trabajo de grado solo son necesarias las ecuaciones finales para determinar el punto P.

$$Px = \frac{-k_1 \pm \sqrt{k_1^2 - 4 * k_0 * k_2}}{2 * k_0} \quad (5)$$

dónde:

$$k_0 = \left(1 + \frac{l_1^2 + l_4^2}{l_2^2} \right)$$

$$k_1 = \left(\frac{2 * (l_1 * l_0 + l_4 * l_3)}{l_2^2} - \frac{2 * (l_5 * l_1 * \sin\phi_1 + a * l_4 * \sin\theta_{11} + l_5 * l_2 * \cos\phi_1)}{l_2} \right)$$

$$k_2 = \left(l_5^2 - b^2 + \frac{l_0^2 + l_3^2}{l_2^2} - \frac{2 * (l_5 * l_0 * \sin\phi_1 + a * l_3 * \sin\theta_{11})}{l_2} + a^2 * \sin\theta_{11}^2 \right)$$

dónde:

$$l_0 = e_{32} * e_{43} - e_{42} * e_{33}$$

$$l_1 = e_{32} * e_{13} - e_{12} * e_{33}$$

$$l_2 = e_{33} * e_{22} - e_{23} * e_{32}$$

$$l_3 = e_{23} * e_{42} - e_{43} * e_{22}$$

$$l_4 = e_{23} * e_{12} - e_{22} * e_{13}$$

$$l_5 = a * \cos\theta_{11} + R - r$$

dónde:

$$e_{32} = 2 * a * \sin\theta_{12} - 2 * a * \sin\theta_{11}$$

$$e_{33} = 2 * a * \sin\theta_{13} - 2 * a * \sin\theta_{11}$$

$$e_{12} = (2 * \cos\phi_2 * (a * \cos\theta_{12} + R - r) - 2 * \cos\phi_1 * (a * \cos\theta_{11} + R - r))$$

$$e_{13} = (2 * \cos\phi_3 * (a * \cos\theta_{13} + R - r) - 2 * \cos\phi_1 * (a * \cos\theta_{11} + R - r))$$

$$e_{22} = (2 * \sin\phi_2 * (a * \cos\theta_{12} + R - r) - 2 * \sin\phi_1 * (a * \cos\theta_{11} + R - r))$$

$$e_{23} = (2 * \sin\phi_3 * (a * \cos\theta_{13} + R - r) - 2 * \sin\phi_1 * (a * \cos\theta_{11} + R - r))$$

$$e_{42} = (a * \cos\theta_{11} + R - r)^2 - (a * \cos\theta_{12} + R - r)^2 + a^2 * \sin\theta_{11}^2 - a^2 * \sin\theta_{12}^2$$

$$e_{43} = (a * \cos\theta_{11} + R - r)^2 - (a * \cos\theta_{13} + R - r)^2 + a^2 * \sin\theta_{11}^2 - a^2 * \sin\theta_{13}^2$$

$$Py = \frac{Px * l_1 + l_0}{l_2} \quad (6)$$

$$Pz = \frac{Px * l_4 + l_3}{l_2} \quad (7)$$

Como se puede observar, es necesario determinar primero el valor de Px para hallar los otros dos puntos de coordenadas Py y Pz .

CAPITULO 4

INTEGRACIÓN DE SOLIDWORKS Y LABVIEW

En este capítulo se expondrá la manera de integrar adecuadamente LabVIEW y SolidWorks, la preparación del ensamblaje, el uso del módulo Motion de SolidWorks y SoftMotion de LabVIEW.

En los anexos A, B y C se explica la manera correcta de instalar tanto LabVIEW como SolidWorks y se muestra la construcción de las piezas y el ensamblaje.

4.1 Ensamblaje para la simulación

El módulo ensamblaje está formado por un entorno de trabajo preparado para crear conjuntos o ensamblajes mediante la inserción de los modelos 3D creados en el módulo de pieza. Los ensamblajes son definidos mediante el establecimiento de relaciones de posición entre las piezas.

La creación de ensamblajes permite al usuario analizar las posibles interferencias entre los componentes móviles, así como simular el conjunto mediante motores lineales, rotativos, resortes, gravedad, entre otros. También permite evaluar la correcta cinemática del ensamblaje.

El módulo permite insertar otros ensamblajes los cuales se convierten en sub ensambles, lo que permite la construcción de elementos muy complejos con gran número de piezas, [8].

Para la conexión entre LabVIEW y SolidWorks se recomienda no utilizar sub ensambles que contengan piezas móviles, ya que se puede limitar el movimiento del elemento final y producir errores en la simulación, también se recomienda no emplear herramientas como matriz de componente o simetría de componente. Por ende, para este proyecto solo se usarán sub ensambles que no contengan piezas con movimiento relativo.

4.2 Preparación del ensamblaje para la simulación

Una vez construido el ensamblaje, es necesario verificar los siguientes aspectos antes de comenzar con la simulación:

- Que todas las relaciones estén definidas y sean correctas
- Definir todas las relaciones de posición mecánicas (en caso de que haya engranajes, bisagras, tornillo sin fin, entre otros; si se desconoce cómo definir

relaciones mecánicas se recomienda consultar la referencia [11] o visitar el siguiente link <http://www.ni.com/webcast/1298/en/>).

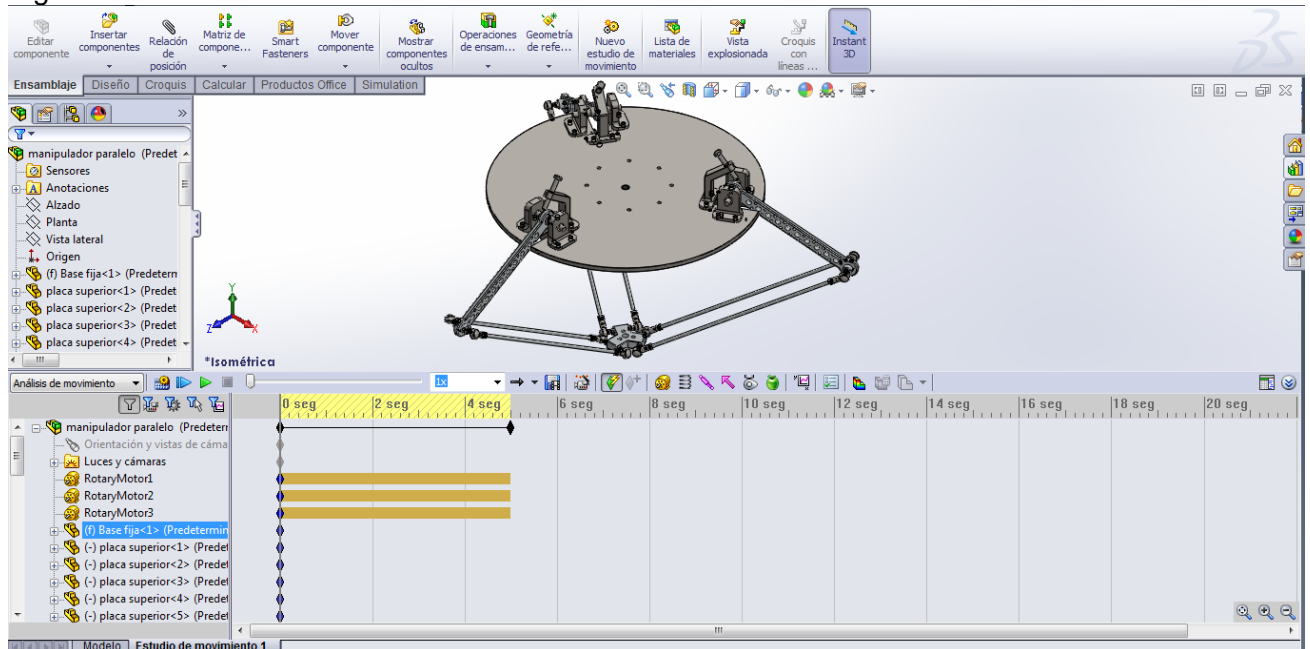
- Como se mencionó anteriormente, para evitar problemas de movimiento y conflictos con las relaciones de posición y mecánicas es mejor que el ensamblaje se haya realizado sin emplear sub-ensambles con partes móviles.

4.3 Estudio de movimiento [12]

El estudio de movimiento es una simulación numérica del movimiento para ensamblajes. Se pueden personalizar al configurar la perspectiva, iluminación y propiedades visuales. En este entorno no se modifican las propiedades físicas del ensamblaje, únicamente se simula y anima el movimiento del modelo.

Se pueden utilizar relaciones de posición de SolidWorks para restringir el movimiento de componentes en un ensamblaje al modelar el movimiento. En la figura 19 se muestra el entorno de SolidWorks Motion.

Figura 19. Interfaz de SolidWorks Motion.

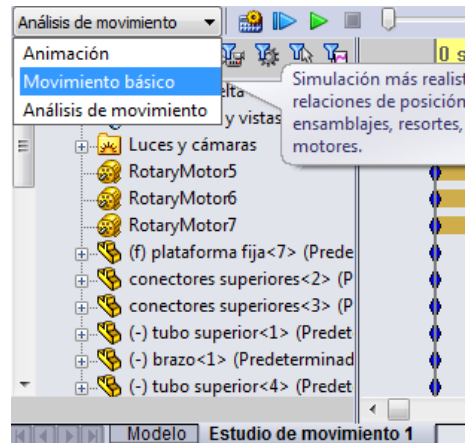


Fuente: SolidWorks.

4.3.1 Tipos de estudio de movimiento. En un estudio de movimiento se pueden utilizar tres herramientas para realizar la respectiva simulación.

En la figura 20 se muestra la interfaz donde se pueden seleccionar los tipos de estudio de movimiento.

Figura 20. Interfaz del estudio de movimiento



Fuente: SolidWorks.

4.3.1.1 Animación. Se utiliza esta herramienta para animar el movimiento de ensamblajes, en este modo no es posible utilizar fuerzas, resortes, contactos, gravedad, entre otros. Su uso se limita únicamente a observar el movimiento del ensamblaje.

En esta herramienta se permite el uso de motores para conducir el movimiento del ensamblaje.

4.3.1.2 Movimiento básico. Se utiliza movimiento básico en ensamblajes para simular los efectos de motores, resortes, colisiones y gravedad. A la hora de calcular el movimiento, "Movimiento básico" tiene en cuenta la masa. El cálculo es relativamente rápido, por lo que puede utilizar un estudio de movimiento para crear animaciones tipo presentación mediante simulaciones basadas en leyes físicas.

4.3.1.3 Análisis de movimiento. Se utiliza para simular en forma precisa en un ensamblaje los efectos de elementos de movimiento (incluyendo fuerzas, resortes, amortiguadores y fricción). Este tipo de movimiento emplea un solver que utiliza tres clases de integrador: GSTIFF, WSTIFF y SI2_GSTIFF, Para realizar los cálculos, y tiene en cuenta propiedades de los materiales, así como la masa y la inercia. También se puede utilizar para trazar resultados de simulación para análisis adicionales.

4.3.1.4 ¿Qué tipo de estudio utilizar? Dependiendo de lo que se desee, se elige el estudio más adecuado. Si se desea únicamente observar cómo se mueve el ensamblaje, lo mejor es utilizar la herramienta animación; por otro lado, si se desea tener en cuenta aspectos como la velocidad, la masa o la gravedad, la mejor opción es movimiento básico y, si se desea una mayor precisión en la simulación y tener en cuenta fuerzas e impacto, se elige análisis de movimiento. Cabe destacar que la

última opción es la que más recursos de máquina consume, por lo cual se necesita de un buen equipo para una correcta simulación.

Como se desea tener la mejor precisión posible durante la simulación del manipulador paralelo DELTA se utilizará el análisis de movimiento; además en los otros dos análisis no es posible la integración con la herramienta LabVIEW.

4.3.1.5 ¿Que integrador es el más adecuado? El integrador por defecto de SolidWorks Motion es el GSTIFF, es el más rápido y ofrece solución a una amplia gama de problemas de movimiento. El integrador WSTIFF es similar al GSTIFF, se diferencian en que los coeficientes del GSTIFF son calculados asumiendo un tamaño de paso variable, mientras los del WSTIFF son calculados en función del tamaño del paso. Si el tamaño del paso cambia repentinamente durante la integración, GSTIFF producirá un error, mientras WSTIFF maneja el cambio en el tamaño del paso sin perder precisión. El tamaño del paso puede cambiar de repente en casos donde hay fuerzas o movimientos discontinuos o eventos abruptos como los contactos en el modelo. Finalmente, el integrador SI2_GSTIFF es una modificación del GSTIFF. Este integrador proporciona mejor control del error sobre la velocidad y la aceleración en las ecuaciones del movimiento. Siempre y cuando el movimiento sea suficientemente suave, el integrador tendrá más precisión que los anteriores, incluso realizará movimientos con oscilaciones de alta frecuencia. Además, SI2: GSTIFF es más preciso con tamaños de paso más pequeños, pero es significativamente más lento.

La elección del integrador depende de la complejidad del movimiento, la precisión que se desea obtener y la capacidad computacional con la que se cuenta. Si el integrador por defecto no presenta errores se selecciona ese para realizar los cálculos de movimiento del manipulador.

4.3.2 Configuración y utilización de los motores virtuales. Los motores virtuales son los aspectos más importantes de la herramienta SolidWorks Motion debido a que estos son los que les brindan el movimiento a los ensamblajes. En este caso se utilizarán tres motores debido a que se deben manipular las coordenadas generalizadas θ_{11} , θ_{12} y θ_{13} .

Dentro de SolidWorks hay dos clases de motores en función del movimiento que se desea tener de los componentes:

- i. Motor rotatorio
- ii. Motor lineal

Se debe tener en cuenta que los motores mueven componentes en una dirección seleccionada, pero no son fuerzas. El movimiento originado por motores prevalece sobre el originado por otros elementos de simulación.


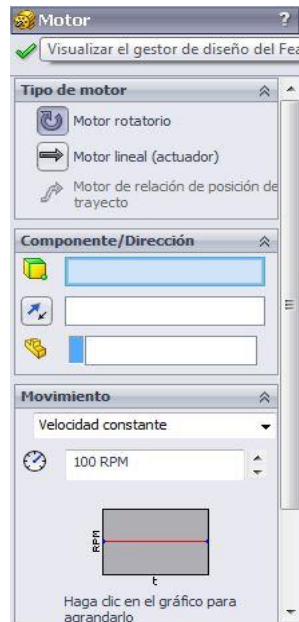
Para seleccionar “Motor” y elegir los parámetros correspondientes, en el menú de SolidWorks Motion se selecciona el ícono . (No se deben agregar dos motores del mismo tipo al mismo componente), en la figura 21 se muestra la ventana que aparece al presionar el icono de “Motor”.

Figura 21. Interfaz de configuración de motor de SolidWorks Motion.



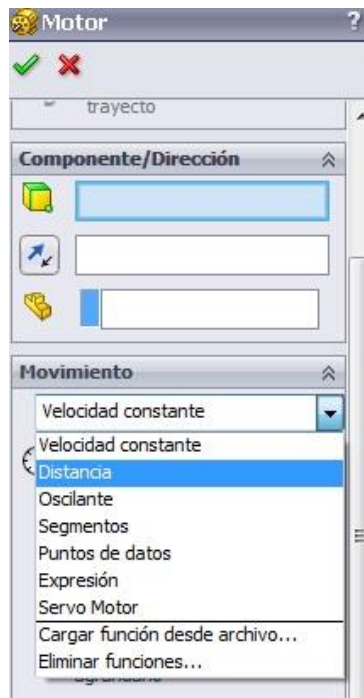
Fuente: SolidWorks.

4.3.3 Motor rotatorio. Se utiliza para dotar al mecanismo de movimiento rotatorio. En el menú “Motor” se debe seleccionar “Componente/Dirección”, así como el tipo de movimiento tales como:

- Velocidad Constante: se define una velocidad en RPM.
- Distancia: se define un recorrido angular durante un tiempo determinado.
- Oscilante: se asigna un amplitud y frecuencia
- Segmentos: se asignan segmentos de curvas para controlar el movimiento del motor
- Puntos de datos: mediante puntos de coordenadas de posición y tiempo se controla el movimiento del motor
- Expresión: se utilizan ecuaciones.
- Servo motor: el motor se mueve dependiendo de acciones previas indicadas por sensores o la activación de otros motores [11]

En la figura 22 se muestra el menú de selección del tipo de movimiento:

Figura 22. Menú de selección del tipo de movimiento.



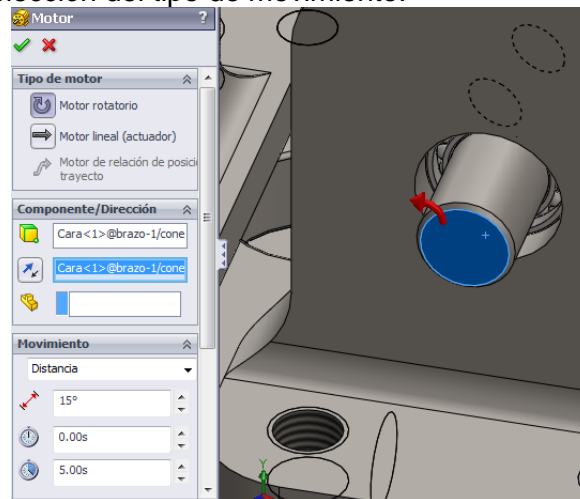
Fuente: SolidWorks.

4.3.4 Motor lineal. Se utiliza para dotar al mecanismo de movimiento lineal. Este tipo de motor equivale a un actuador, por lo que será muy útil en la simulación de mecanismos en los que hay actuadores hidráulicos, neumáticos o de otro tipo.


Al igual que con el motor rotatorio existen diferentes clases de movimiento que en vez de ser angular es lineal; para el caso de este proyecto de grado esta clase de motores no será utilizada.

Para la conexión entre LabVIEW y SolidWorks solo está permitido utilizar motores de distancia ya sean rotatorios o lineales o ambos; por lo tanto, se seleccionan tres motores rotatorios configurados en distancia para manipular las tres cadenas cinemáticas del manipulador. El valor del ángulo y el tiempo de ejecución puede ser cualquiera, por lo cual se selecciona como distancia 15 grados en un tiempo de 5 segundos comenzando en cero para los tres motores. En la figura 23 aparece el menú para seleccionar el motor.

Figura 23. Menú de selección del tipo de movimiento.



Fuente: SolidWorks.

Finalmente, si todo el ensamblaje fue configurado correctamente teniendo en cuenta las recomendaciones anteriores, se ejecuta la simulación presionando el ícono  y se espera a que termine y se guarda el ensamblaje.

4.4 Conexión básica entre SolidWorks y LabVIEW [9]

En esta sección se dará explicación del tipo de conexión básica entre SolidWorks y LabVIEW, ya que para realizar la simulación en SolidWorks controlada desde LabVIEW no es necesario realizar programación alguna en LabVIEW. Una buena manera de ilustrar lo que se realizará con estos dos programas es utilizar el panel interactivo propio de LabVIEW para realizar pruebas preliminares sobre el elemento creado en SolidWorks.

Para construir un vínculo entre ambos programas desde la perspectiva de LabVIEW, lo primero que se necesita es crear un proyecto en LabVIEW. Una vez creado, se agrega el ensamblaje en SolidWorks al proyecto y finalmente se agregan los ejes de los motores virtuales agregados anteriormente denominados *SoftMotion axes*.

4.5 Proyecto en LabVIEW

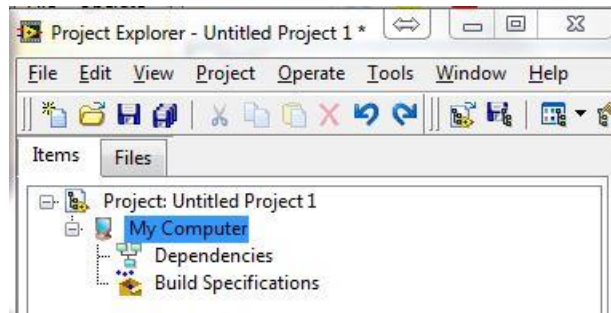
El primer paso para realizar el vínculo entre SolidWorks y LabVIEW es la creación de un proyecto en LabVIEW. Es importante hablar sobre el explorador de proyectos con el que cuenta LabVIEW, el cual es una ventana que se abre cada vez que el usuario crea un nuevo proyecto o cuando se abre un proyecto existente.

El explorador de proyectos permite tener una visión desde la perspectiva de un sistema operativo de una aplicación, contiene todas las partes que la componen, los diferentes archivos y cualquier cosa que forme parte de un programa será

encontrado en el explorador de proyectos de LabVIEW, que también sirve como ayuda para el usuario al iniciar la simulación del prototipo virtual en SolidWorks y LabVIEW.

Para crear un proyecto en LabVIEW, primero se debe ejecutar el programa. En la ventana de inicio (*Getting Started*) se muestran diferentes íconos de los cuales se debe seleccionar el que aparece como “*Empty Project*”, e inmediatamente se abrirá la ventana de explorador de proyectos. El explorador de proyectos se puede observar en la figura 24.

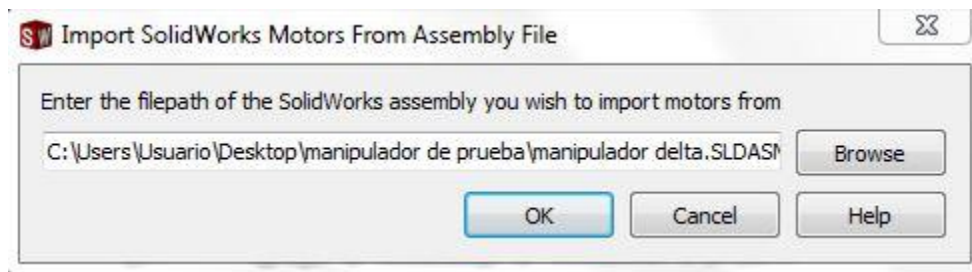
Figura 24. Explorador de Proyectos.



Fuente: NI LabVIEW.

El siguiente paso es agregar el ensamblaje realizado en SolidWorks; para ello, se debe situar el cursor sobre la opción “*My Computer*” y con el click derecho, ir a “*New*” y seleccionar con click izquierdo en “*SolidWorks Assembly*”; inmediatamente se abrirá una ventana como se puede ver en la figura 25; si se tiene en el momento el ensamblaje abierto, LabVIEW identificará la ruta del ensamblaje para agregarlo; sino, se debe dar click en el botón “*Browse*” y buscar el ensamblaje que se desea utilizar.

Figura 25. Ventana de selección del ensamblaje.

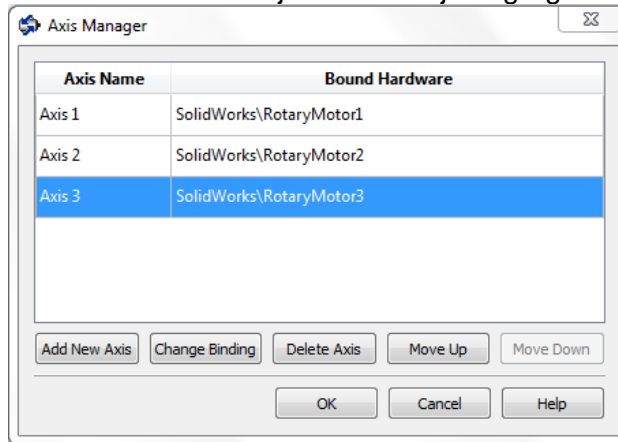


Fuente: NI LabVIEW.

Después de agregar el ensamblaje, se deben añadir los Ni SoftMotion axis al proyecto. De manera muy similar a la empleada para los ejes, se da click derecho en “*My Computer*”, después en “*New*” y, finalmente se selecciona “*NI SoftMotion axis*”.

Al hacer click sobre NI SoftMotion axis, se abrirá una nueva ventana; en la cual, al seleccionar el botón “Add New Axis”, se agregará un eje correspondiente a uno de los motores del ensamblaje; en este caso como se tienen tres motores, se debe presionar tres veces el botón “Add New Axis” y finalmente se presiona en “OK”; en la figura 26 se muestra la ventana de administrador de ejes con los tres ejes del ensamblaje agregados.

Figura 26. Ventana del administrador de ejes con los ejes agregados.

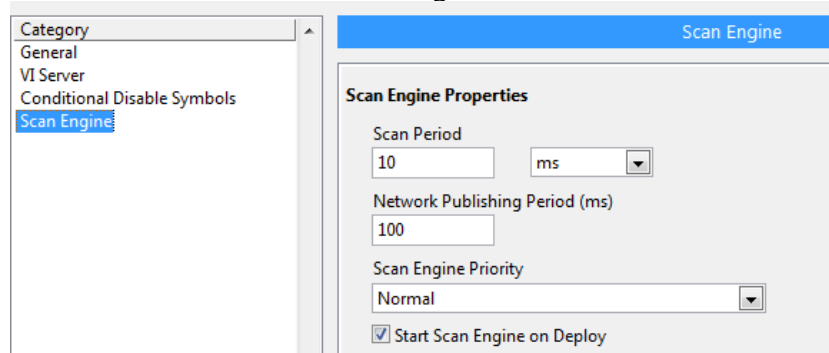


Fuente: NI LabVIEW.

Después de la definición de los softmotion axis, es necesario habilitar el Scan Engine de LabVIEW, el cual permite finalizar la conexión entre SolidWorks y LabVIEW para realizar el control del ensamblaje; para habilitar el Scan Engine se deben seguir el siguiente procedimiento:

En el explorador de proyectos (figura 24) se debe hacer click derecho sobre “my computer” y después click en “Properties”; se abrirá una ventana como la que se muestra en la figura 27, en la cual se seleccionará el ítem Scan Engine y finalmente se debe seleccionar la opción “Start Scan Engine on Deploy” y click en “Ok”.

Figura 27. Ventana de activación del Scan Engine.



Fuente: NI LabVIEW.

El scan engine se encarga de permitir o interrumpir la transferencia de datos entre SolidWorks y LabVIEW al momento de correr la aplicación y mientras esté en ejecución toda la información es intercambiada bilateralmente en lapsos iguales de tiempo y de forma simultánea, dicho lapso es el scan period.


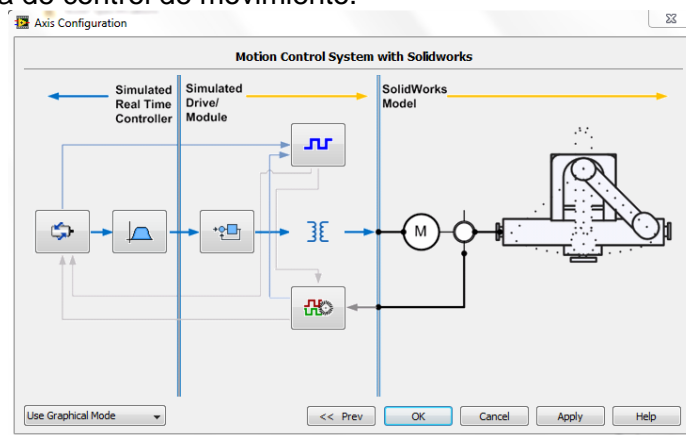
El siguiente paso es realizar la configuración de los ejes; para ello es necesario dar click derecho sobre alguno de los ejes y a continuación click en “Properties”; se abrirá la ventana en la cual se puede realizar la configuración de los ejes (figura 28), allí se debe presionar el botón  donde se abrirá otra ventana como la que se muestra en la figura 29.

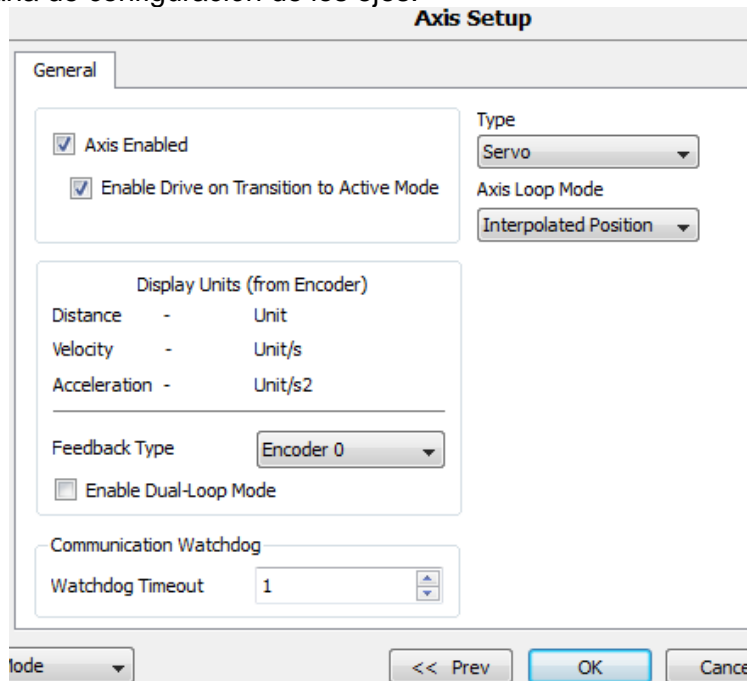
Figura 28. Ventana de control de movimiento.



Fuente: NI LabVIEW.

En la ventana “Axis Setup” de la figura 29 se debe habilitar la opción “Enable Drive on Transition yo Active Mode” y click en “Ok”; si no se realiza esta configuración para cada uno de los ejes LabVIEW no realizará la simulación.

Figura 29. Ventana de configuración de los ejes.



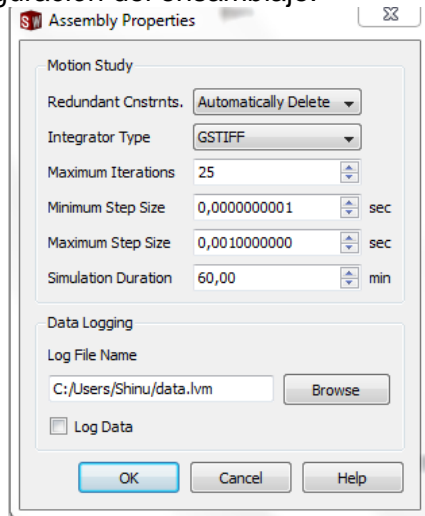
Fuente: NI LabVIEW.

El último paso de configuración consiste en corregir el paso máximo de iteración del ensamblaje, éste no puede ser menor que el paso del Scan Engine; por lo tanto, hay que comprobar que el paso máximo del ensamblaje sea igual o mayor que el del Scan Engine.

Para acceder al menú de configuración del ensamblaje, en la ventana del explorador de proyectos (figura 24) se debe hacer click derecho sobre el ensamblaje y después click en "Properties".

Se abrirá la ventana de configuración del ensamblaje de la figura 30, en esta ventana se debe cambiar el "Maximun Step Size" por un valor de "0,001 segundos" y dar click en Ok.

Figura 30. Ventana de configuración del ensamblaje.

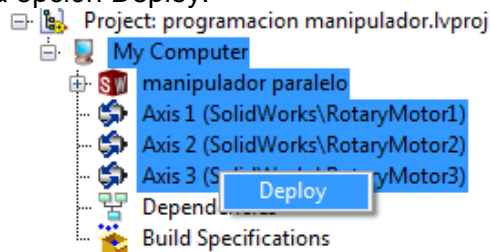


Fuente: NI LabVIEW.

Ahora la conexión entre SolidWorks y LabVIEW ya debe estar completamente configurada y se puede proceder con las primeras pruebas de funcionamiento del sistema empleando la opción de LabVIEW: “Interactive test Panel”, el cual permite controlar el ensamblaje sin necesidad de utilizar programación alguna en LabVIEW y tener una visión general sobre el funcionamiento del sistema.

Antes de iniciar el panel interactivo de pruebas se debe comenzar la conexión entre LabVIEW y SolidWorks; para ello se deben seleccionar en el explorador de proyectos: My computer, ensamblaje y los ejes, posteriormente se da click derecho y se selecciona la opción “Deploy” como aparece en la figura 31.

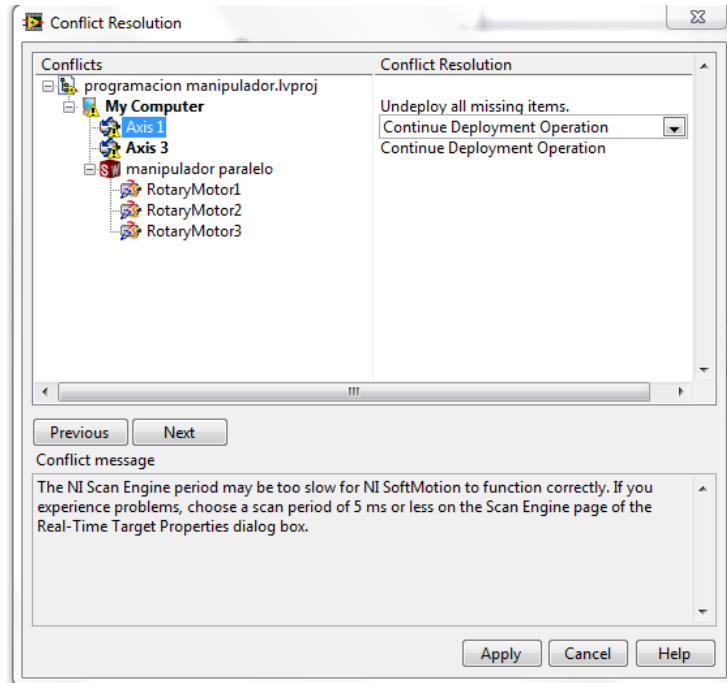
Figura 31. Ubicación de la opción Deploy.



Fuente: NI LabVIEW.

Al iniciar la operación, se abrirá una ventana como la que se muestra en la figura 32 en la cual se presentan los errores en la ejecución del proceso; sin embargo, si se realizó adecuadamente la configuración, basta con hacer click sobre el botón “apply” para continuar en esta y las ventanas siguientes.

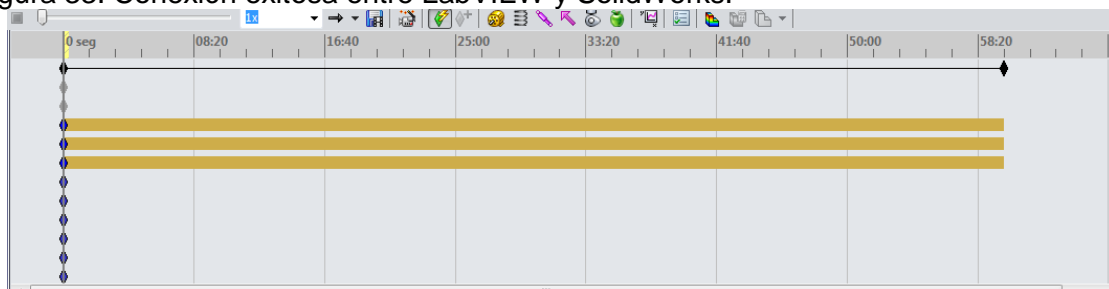
Figura 32. Solucionador de Conflictos.



Fuente: NI LabVIEW.

Si la conexión entre LabVIEW y SolidWorks fue exitosa, el tiempo de la simulación en la interfaz del SolidWorks Motion pasará a ser de una hora por defecto o el tiempo que se haya seleccionado en la configuración del ensamblaje en la ventana de la figura 30. Como se puede observar en la figura 33, el tiempo de simulación del manipulador pasó a ser de una hora, lo que indica que se realizó una conexión adecuada.

Figura 33. Conexión exitosa entre LabVIEW y SolidWorks.

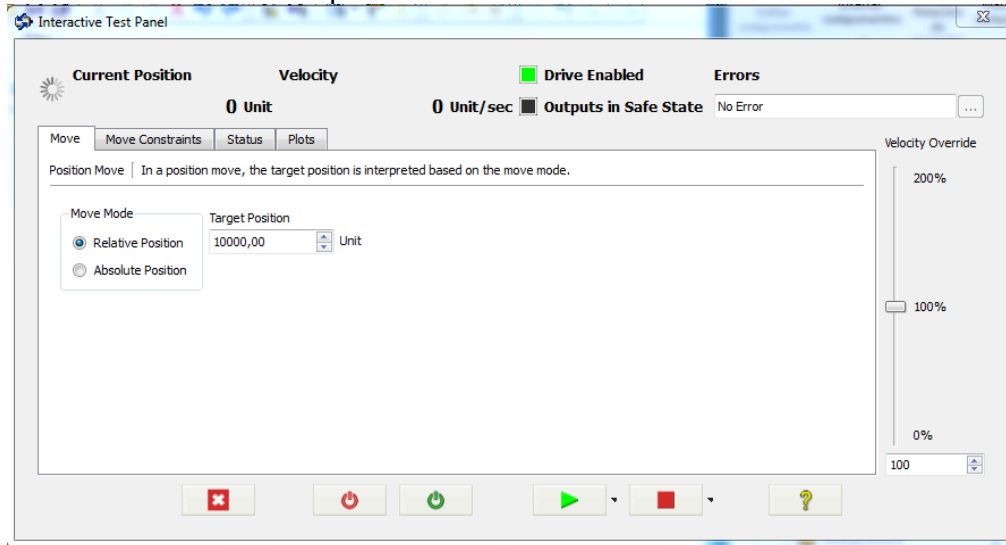


Fuente: NI LabVIEW.

Con una conexión exitosa, se comprobará el funcionamiento de los ejes del ensamblaje. Para hacerlo sin necesidad de alguna clase de programación se utilizará el panel interactivo que ofrece LabVIEW dando click derecho en alguno de los ejes en el project explorer y seleccionar la opción “Interactive test Panel”.

Inmediatamente se selecciona el panel interactivo, se abrirá una ventana como la que aparece en la figura 34, la cual permitirá manipular el motor al que corresponde el eje seleccionado para comprobar el funcionamiento del manipulador.

Figura 34. Panel interactivo de pruebas.



Fuente: NI LabVIEW.

Se debe tener en cuenta que, para evitar errores, el ensamblaje de SolidWorks debe estar abierto al mismo tiempo que el proyecto de LabVIEW.

En el panel de la figura 34 se pueden observar diferentes botones e indicadores que permiten controlar y conocer el estado actual del ensamblaje como lo son la posición y la velocidad. En el apartado de movimiento (Move) se podrá seleccionar la clase de movimiento se desea realizar: relativo o Absoluto; en el apartado "Target position" se asignará el valor del movimiento según la clase de motor que se seleccionó, ya sea en milímetros o en grados para motor lineal y rotativo respectivamente; finalmente para ejecutar la simulación se hace uso de los botones que se encuentran en la parte inferior del panel.


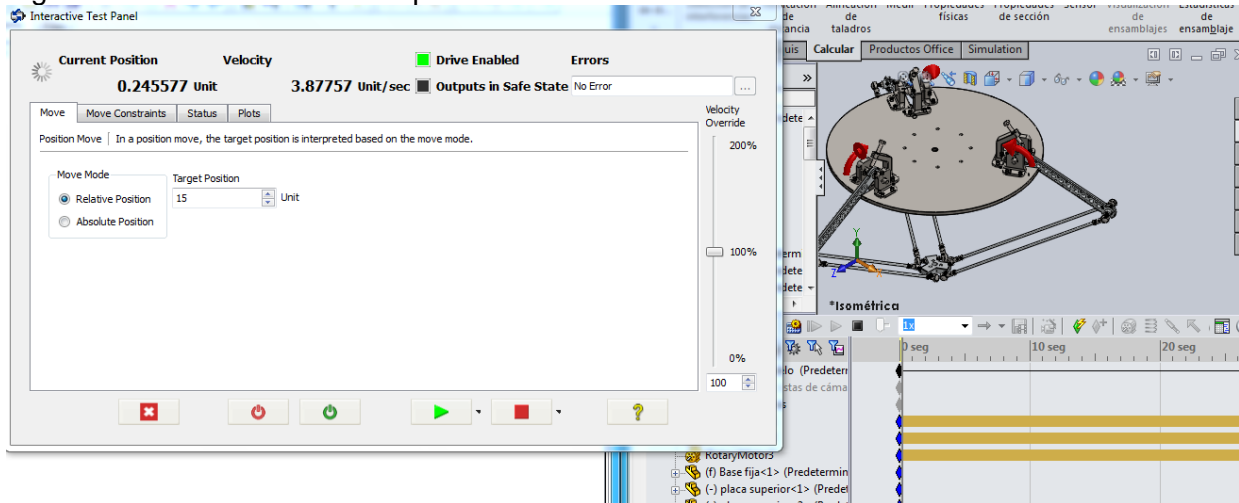
Para probar el funcionamiento del eje, se ingresará una distancia para el motor de 15 grados en el panel y se hará click en el botón "play" . En el panel se mostrará la velocidad y el desplazamiento del brazo mientras que en SolidWorks se podrá ver la acción tal como se ilustra en la figura 35.

Figura 35. Panel interactivo de pruebas en acción.



Fuente: NI LabVIEW.

Tras verificar el correcto funcionamiento de la integración entre SolidWorks y LabVIEW se procede a realizar la programación correspondiente para manipular el movimiento de los tres motores.

4.6 Conexión entre LabVIEW y SolidWorks empleando NI SoftMotion [9]

En el ítem anterior se explicó la manera más sencilla de realizar la conexión entre SolidWorks y LabVIEW sin aplicar ninguna clase de programación dentro de LabVIEW; ahora se pondrá a disposición una herramienta adicional que el usuario puede aprovechar para realizar casi cualquier tipo de movimiento mediante la programación dentro de LabVIEW, utilizando el módulo NI SoftMotion que éste posee.

Como se explicó anteriormente, el módulo NI SoftMotion es una herramienta para el desarrollo gráfico en aplicaciones personalizadas de control de movimiento, además, cuenta con diversas utilidades como funciones para crear diferentes clases de movimiento como líneas rectas, arcos y contornos, también posee bloques para funciones avanzadas como engranajes y levas electrónicas. Sin embargo, aunque posee muchas características importantes, solo se tendrán en cuenta aquellas que sean necesarias para el desarrollo de este proyecto de grado.

El principal aspecto que posee NI SoftMotion es la capacidad con la que éste cuenta para generar prototipos virtuales en aplicaciones de control de movimiento y diseño de máquinas, que permite enlazar las funciones propias del módulo con SolidWorks, permitiendo ofrecer aplicaciones que, operando de manera conjunta, puede simular los diseños creados en SolidWorks usando trayectorias de movimiento desarrollados con bloques de función NI SoftMotion y permitiendo al usuario

visualizar, optimizar y evaluar diversos aspectos del diseño antes de utilizar prototipos físicos.

4.6.1 Programación en LabVIEW. Después de dar una breve explicación del módulo que permite la conexión satisfactoria entre LabVIEW y SolidWorks y, al tener completamente configurado y definido el proyecto que se creó en el apartado 4.4, se procederá a realizar la programación correspondiente en LabVIEW mediante Instrumentos virtuales (VI) para generar el movimiento deseado del manipulador paralelo DELTA 720 creado en SolidWorks.

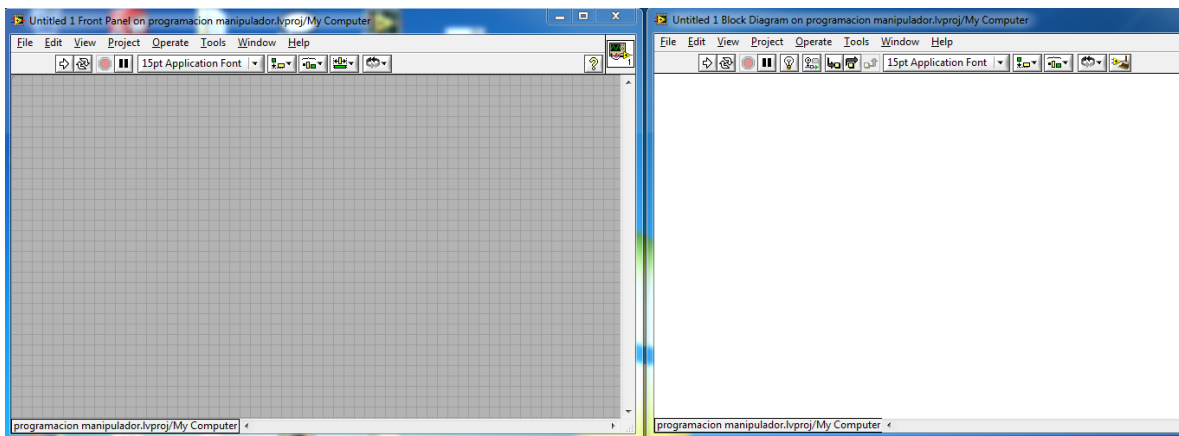
4.6.2 Creación y programación de un VI en el proyecto de LabVIEW. Desde este punto se utilizarán los instrumentos virtuales de LabVIEW. Como se mencionó anteriormente, los instrumentos virtuales constan de tres elementos:

- Panel frontal
- Panel de programación
- Diagramas de bloques

Para crear un Instrumento Virtual; en la pantalla del explorador de proyectos, se debe dar click izquierdo en “My Computer”, después en “New” y en la ventana desplegable se selecciona “VI”.

Al hacer click en “VI” se abrirán dos ventanas, una con fondo blanco y la otra con fondo gris (Figura 36); éstas corresponden al diagrama de bloques y al panel frontal respectivamente. A continuación, se explicará que se puede hacer en estos dos paneles antes de proceder con la programación del manipulador paralelo DELTA 720.

Figura 36. Panel frontal (izquierda) y diagrama de bloques (derecha).



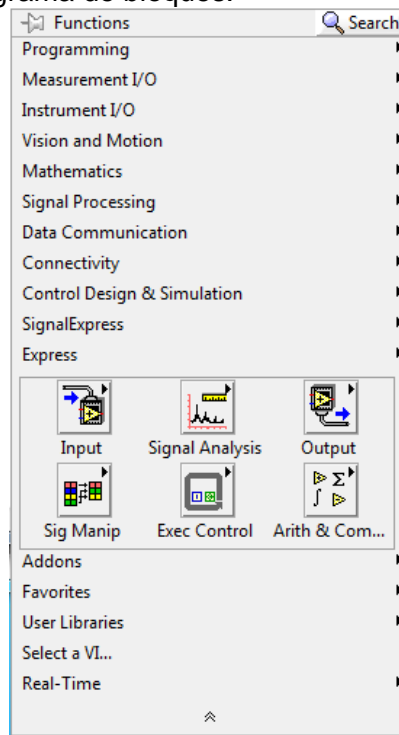
Fuente: NI LabVIEW.

Antes de comenzar a asignar las características de SolidWorks mediante el módulo SoftMotion, es necesario definir el ciclo con el que se desea trabajar. Estos ciclos son los que permiten trabajar de manera continua la simulación hasta que se dé el orden de detenerla mediante el botón Stop. En este proyecto se explicará el funcionamiento de los dos ciclos más usados que son el ciclo While loop y Timed loop.

4.6.2.1 Ciclo While Loop. El ciclo While Loop, permite retroalimentar la simulación para ejecutar la acción tantas veces sea necesario y detenerla con el botón “stop” que se agrega al crear un While Loop. Para crear el proyecto con un instrumento virtual con el While Loop es necesario establecer un retraso de tiempo con respecto al Scan Engine.

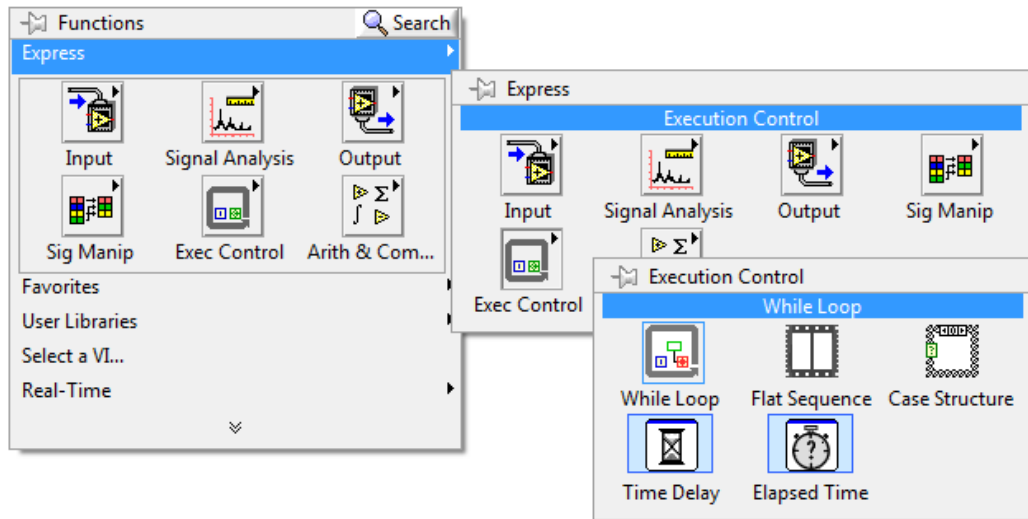
Para seleccionar “While Loop”, en el diagrama de bloques se hace click derecho en cualquier zona y se abrirá una ventana llamada “Functions” como se muestra en la figura 37; en esa ventana en la opción “Express” se despliega un menú en el cual se debe seleccionar la opción “Exec Control” y después en “While Loop” como en la figura 38.

Figura 37. Funciones del diagrama de bloques.



Fuente: NI LabVIEW.

Figura 38. Ubicación de While loop.



Fuente: NI LabVIEW.

Al seleccionar el while loop, aparecerá un icono rectangular, el cual indica que se debe elegir un área en el diagrama de bloques para posicionar el while loop; por lo tanto, se selecciona un área de tamaño proporcional tal como se muestra en la figura 39.

Figura 39. While Loop.



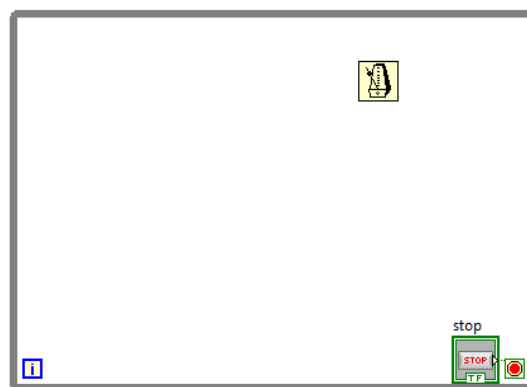
Fuente: NI LabVIEW.

Lo que quiere indicar el While Loop es que todo aquello que se encuentre dentro de éste será sometido al ciclo y se ejecutará al mismo tiempo. Para seleccionar la

opción de retraso se procede a abrir la ventana de funciones, después en “Programing” se debe desplegar el menú y seleccionar la opción “Timing” donde se podrá encontrar la herramienta llamada “Wait until ext. ms multiple”; esta característica permite retrasar la ejecución del While Loop en la cantidad de milisegundos (ms) que se indique por el usuario; normalmente se selecciona el retraso de acuerdo al tiempo del paso del Scan Engine.

Como se mencionó anteriormente, esta opción debe estar dentro del While Loop para que se ejecute tal y como se ve en la figura 40.

Figura 40. Retrasador de tiempo dentro del while loop.



Fuente: NI LabVIEW.

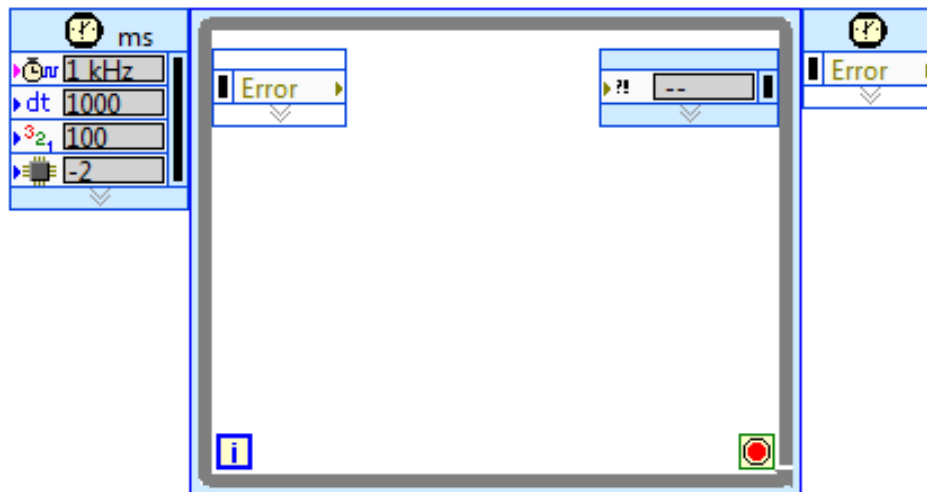
Para seleccionar la cantidad de milisegundos que se retrasará el proceso, en el ícono del retrasador se debe dar click derecho, después en “create” y finalmente seleccionar la opción “Constant”; se creará un pequeño cuadro en el cual se introduce el valor de tiempo que se desea retrasar.

4.6.2.2 Ciclo Timed Loop. El ciclo Timed Loop al igual que el While Loop permite retroalimentar el sistema para ejecutar la simulación tantas veces sea necesario; la diferencia que tiene este con el anterior es que no necesita de un retraso de tiempo, ya que se puede sincronizar directamente con el Scan Engine para ejecutarse al mismo tiempo.

Para acceder al Timed Loop, en la ventana de funciones se debe desplegar el menú “Programing”, luego abrir el menú “Structures” y a continuación en “Time Structures” seleccionar el “Timed Loop”.

Al igual que en While Loop aparecerá un ícono que pedirá seleccionar el área que cubrirá el ciclo como se puede apreciar en la figura 41.

Figura 41. Área del Timed Loop.



Fuente: NI LabVIEW.


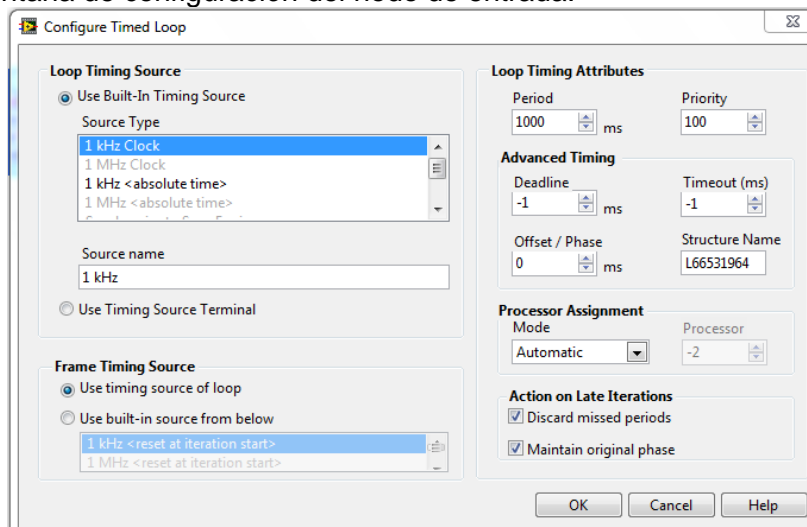
Como se puede notar, hay una gran diferencia con respecto al while loop; observándose íconos nuevos a ambos lados del rectángulo que conforma el Timed Loop. Para sincronizar el Scan Engine, se hace click derecho sobre el recuadro que posee este ícono  ms, luego se selecciona la opción “Configure input node” con la que se abrirá una ventana que se puede observar en la figura 42.

Figura 42. Ventana de configuración del nodo de entrada.



Fuente: NI LabVIEW.

En la ventana de la figura 42 en el apartado “Source type” se selecciona la opción “Synchronice to Scan Engine” y se finaliza presionando el botón “OK”.

Cualquiera de los dos ciclos funciona para realizar el control del ensamblaje en SolidWorks; sin embargo, en este proyecto se utilizará el ciclo Timed loop por su capacidad de sincronizarse con el Scan engine. No obstante, el procedimiento que se describirá en los puntos siguientes funciona perfectamente para ambos ciclos.

Ahora teniendo completamente definido el ciclo que se empleará para realizar el proyecto, se procederá a seleccionar el tipo de movimiento que se desea obtener con los motores seleccionados introduciendo el código de programación dentro del ciclo.

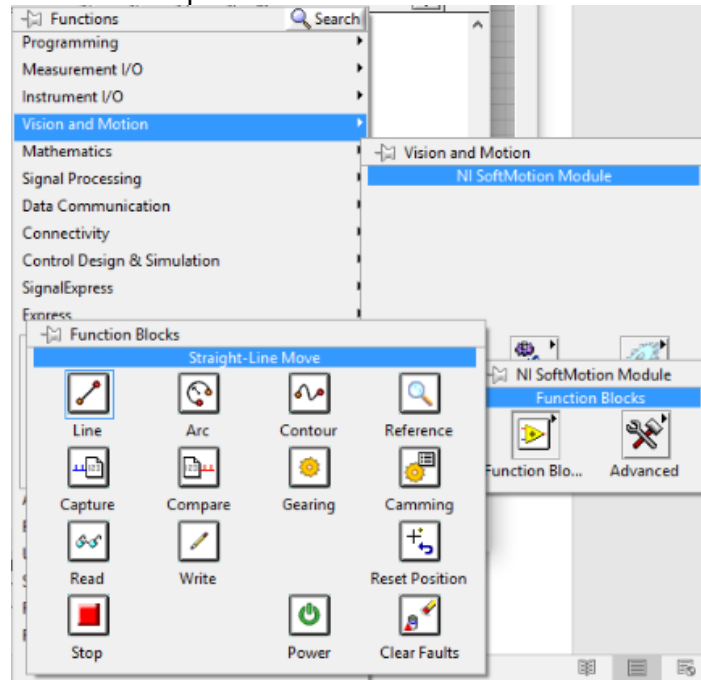
4.6.3 Funciones de movimiento del módulo SoftMotion. [9] LabVIEW cuenta con diferentes funciones de movimiento, de las cuales cada una tiene una función específica dependiendo del movimiento que se desee realizar; cada función de movimiento cuenta con entradas y salidas, las entradas son los datos iniciales que se introducen para realizar el movimiento de acuerdo a los parámetros establecidos, tales como: posición, velocidad, aceleración, entre otros; también, el botón de ejecución que inicia el movimiento. Por otra parte, las salidas también pueden indicar los valores de posición, velocidad, aceleración mientras el elemento se está moviendo o mostrar si todo se ejecuta correctamente; también sirven como entrada a otras funciones de movimiento como se verá más adelante.

En las entradas se pueden introducir valores constantes que fijan los parámetros o controladores que permiten modificarlos desde el panel frontal; por otro lado, las salidas solo permiten introducir indicadores que también se verán reflejados en el panel frontal.

Las funciones de movimiento se pueden encontrar siguiendo los siguientes pasos:

En el diagrama de bloques, se da click derecho para abrir las funciones, una vez abierta la ventana se procede a desplegar el menú de “Vision and Motion”, después click en “Ni SoftMotion” y en “Function Blocks” se encuentran las funciones de movimiento que se explicarán a continuación (figura 43).

Figura 43. Ubicación de los bloques de movimiento.

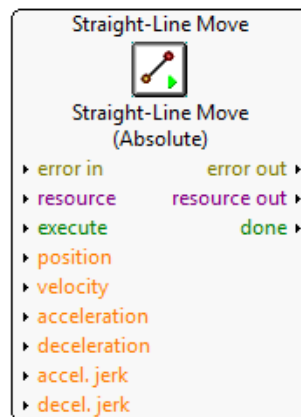


Fuente: NI LabVIEW.

4.6.3.1 Función para trazar una línea recta. La primera función que se tratará será la función de línea recta “*Straight line move function*”, esta función realiza una línea recta sobre un eje o sobre un recurso coordinado (sistema de ejes) del cual se hablará más adelante.

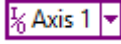
La función en el diagrama de bloques presenta la forma que se muestra en la figura 44.

Figura 44. Función de línea recta.



Fuente: NI LabVIEW.

Las entradas de la función se encuentran en el lado izquierdo y las salidas en el derecho; a continuación, se explicarán algunas de ellas:

- **Error in:** es una entrada para manejar errores durante la ejecución de la función, cualquier error que pueda ocurrir lo mostrará mediante el indicador “error out”.
- **Resource:** en esta entrada se deben introducir los SoftMotion axis del eje o los ejes que se deseen controlar. Para introducir un eje en el diagrama de bloques basta con arrastrar del explorador de proyectos hacia el diagrama; aparecerá el siguiente icono en el diagrama de bloques:  .
- **Execute:** se encarga de indicar a la función cuando debe iniciar la ejecución del movimiento, esta terminal es un control booleano. Un control booleano funciona enviando flancos positivos a la terminal conectada cuando este cambia su estado de falso a verdadero y hay dos formas de obtener el flanco positivo: una es activando el control booleano y otra es que dicho flanco positivo provenga de una función previa; para ello se puede utilizar el indicador “Done”, que entrega un flanco positivo al momento en que la función ha terminado de ejecutar su labor y que de hecho, gracias a este indicador es posible conectar varias funciones en serie.
- **Posición, velocidad, aceleración, desaceleración, entre otros:** se conectan a controles que permiten ingresar datos para que la función realice el movimiento de manera personalizada; la única entrada que tiene que estar conectada a un control es la de posición, las demás poseen un valor por defecto cuando no tienen ningún control ligado.

La posición se comporta de manera similar tanto en motores rotativos como lineales, la única diferencia es que para motores rotativos el valor que se debe ingresar es en los grados que se desea que rote, mientras que para los motores lineales se le da la orden de cuantos milímetros se desea que se desplace el terminal.

La función de línea recta, cuenta con diferentes métodos, entre ellos el absoluto y el relativo. El método absoluto iniciará el movimiento con respecto al estado inicial del ensamblaje cuando fue iniciada la simulación; es decir, si se quiere mover el brazo 15 grados, este lo hará inmediatamente; después si se quiere mover a la posición 30 grados, el brazo contará desde la posición 0 los 30 grados y luego lo moverá 15 grados más respecto a la posición anterior para completar los 30 grados.

El método relativo inicia el movimiento desde el punto en donde quedó la última vez que se movió. Por ejemplo, se mueve inicialmente 15 grados, después se le introduce el valor de 20 grados, en este caso el brazo no regresa a la posición inicial,

sino que continua su movimiento por 20 grados llegando a moverse 35 grados con respecto al punto donde se encontraba al comienzo del ensamblaje.

En este proyecto se usará el método absoluto, ya que los ángulos de entrada siempre están referenciados con respecto a la posición inicial del ensamblaje.

Para cambiar el método en la función de línea recta, se hace click derecho sobre la función, después seleccionar el campo "Select Method" y finalmente habilitar el método que se desea.

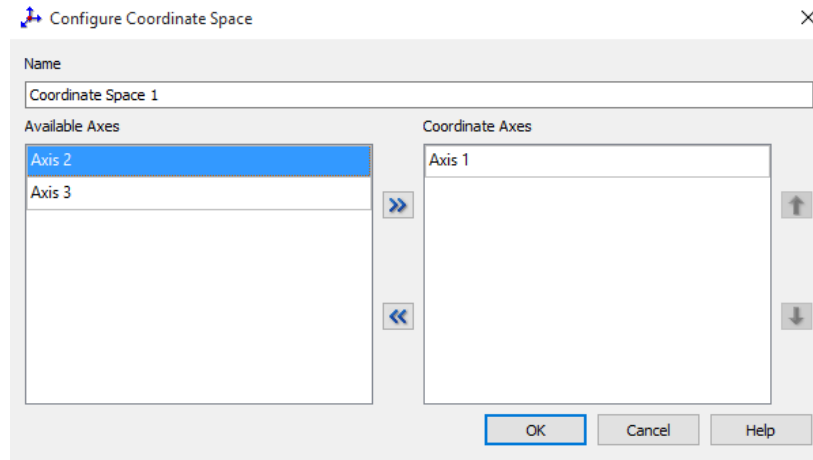
Hay una variante para la función de línea recta y esta variante es la línea recta en espacio coordinado. El espacio coordinado, en esencia, es la agrupación de varios ejes que pueden ser movidos simultáneamente.

Para crear un espacio coordinado, desde el explorador de proyectos, se debe dar click derecho sobre "My computer", después en "New" se selecciona "NI SoftMotion Coordinate Space" el cual es un recurso que utiliza las funciones de movimiento para controlar ejes al mismo tiempo y lo que hace es agrupar distintos SoftMotion axis y convertirlos a recursos individuales de movimiento en un nuevo recurso multieje de movimiento.

El espacio coordinado se emplea para especificar sobre que plano, el usuario desea ejecutar el movimiento en línea recta. Por ejemplo, se puede realizar una línea recta entre los planos XY, YZ, XZ y también en un espacio de tres dimensiones agrupando los ejes XYZ. Para observar de manera idónea el trazo de la línea, ya sea en dos o tres dimensiones, se deberá mover la vista del ensamblaje en SolidWorks para contar con la perspectiva adecuada.

La ventana que aparece al seleccionar la opción de "NI SoftMotion coordinate space" se ilustra en la figura 45, dónde aparecen los SoftMotion axis que se crearon y flechas, mediante las cuales se introducen los ejes dentro del espacio coordinado al cual pertenecerán.

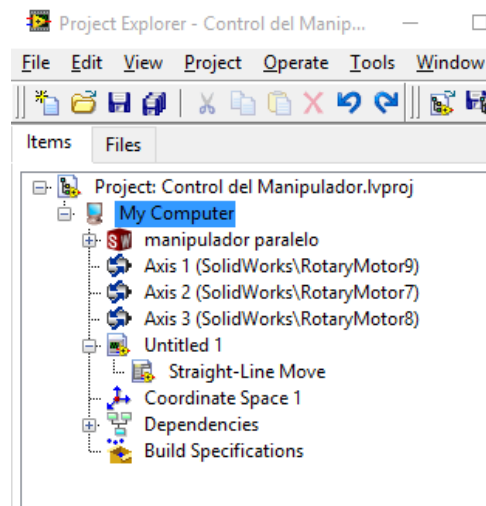
Figura 45. Creación de un eje coordinado.



Fuente: NI LabVIEW.

El eje coordinado aparecerá en el explorador de proyectos como “Coordinate Space 1”, tal como se muestra en la figura 46.

Figura 46. Espacio coordinado en el explorador de proyectos.



Fuente: NI LabVIEW.

El espacio coordinado se comporta igual que un eje dentro del diagrama de bloques, así que en vez de conectar un eje en la entrada “resource” se conecta el espacio coordinado.

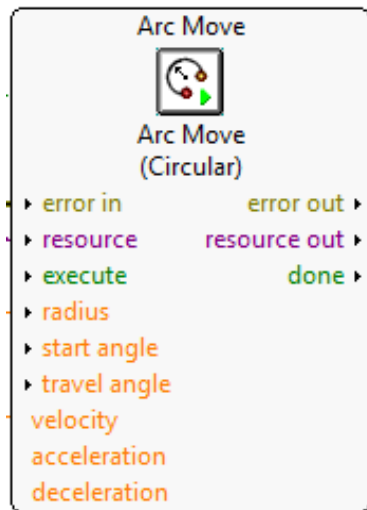
En este caso en vez de aparecer una constante o control para un eje, aparecerán 3 que se activarán al mismo tiempo para realizar el movimiento deseado.

4.6.3.2 Función para trazar movimiento circular. La función “*Arc move function*” controla dos ejes al mismo tiempo para formar una trayectoria circular; para utilizar esta función de movimiento es necesario tener un espacio coordinado de al menos dos ejes o de lo contrario no se generará movimiento.

En la figura 47 se muestra la función para generar trayectorias circulares y en ella se pueden observar entradas y salidas similares a las de línea; sin embargo, se encuentran tres entradas diferentes: radio, ángulo de inicio y ángulo de trayectoria.

En la entrada “radius” se ingresa el valor del radio del círculo que se desea trazar, en el ángulo de inicio se selecciona el punto en el plano donde debe comenzar a realizarse el trazo y en el ángulo de trayectoria se indica el barrido que hará el elemento que trazará el arco.

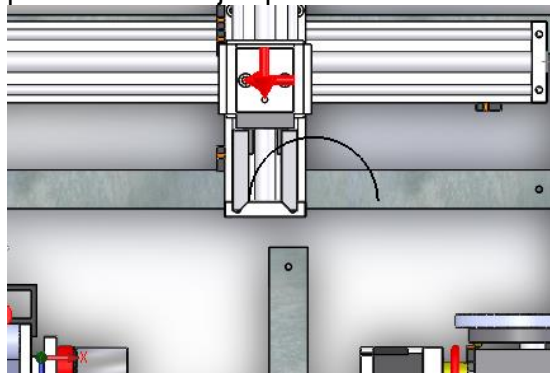
Figura 47. Función de trazado de arco.



Fuente: NI LabVIEW.

En la figura 48 se muestra un trazo realizado empleando esta función de un elemento disponible en la librería de ejemplos que posee LabVIEW llamado “*Basic Coordinated Arc Move*”.

Figura 48. Arco trazado por uno de los ejemplos de LabVIEW.

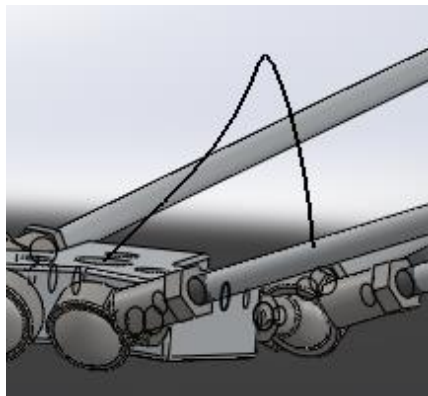


Fuente: NI LabVIEW.

El trazo corresponde a un arco con radio de 50 mm, con ángulo de inicio de 180 grados y trayectoria de barrido de 180 grados.

Al crear un espacio coordinado con dos ejes del manipulador para dibujar un arco con 30 mm de radio, ángulo de inicio 120 grados y barrido de 180 grados, se presenta un trazo deforme (figura 49); esto se debe a que la configuración del manipulador no es la adecuada para realizar esta clase de trazos. El manipulador posee motores rotativos separados 120 grados entre sí, en cambio el ejemplo posee dos motores lineales colocados debidamente para ser capaces de trazar el arco.

Figura 49. Trazo realizado por el manipulador con la herramienta de función de arco.



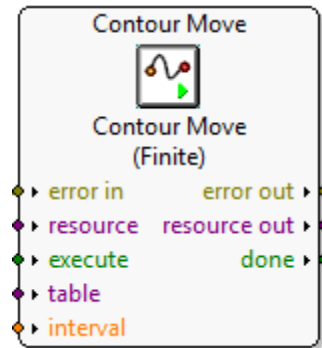
Fuente: NI LabVIEW.

Esta herramienta es útil en el caso de que el elemento a construir requiriera realizar un arco para evitar algún obstáculo y continuar su movimiento; como el manipulador solo se controlará con los ángulos de los brazos, la herramienta arco no se utilizará para el proyecto.

4.6.3.3 Función para trazar contornos. Un movimiento de contorno está conformado por una serie de posiciones, que al ser extrapoladas dan como resultado un trazo suave guiado por dichas posiciones. Las posiciones se encuentran almacenadas como puntos en una tabla y todos los puntos en la tabla son relativos al punto de inicio del trazo.

Para el mismo caso que con línea, un contorno puede ser trazado para un eje normal (SoftMotion axis) o un espacio coordinado conformado por dos o más ejes; en la figura 50 se muestra la función de contorno, también se observan dos entradas nuevas: “*table*” e “*interval*” de las cuales en *table* se ingresa el recurso de tabla y en *interval* el cambio de tiempo entre puntos que puede ser interpretado como la velocidad del movimiento del trazado.

Figura 50. Función de contorno.

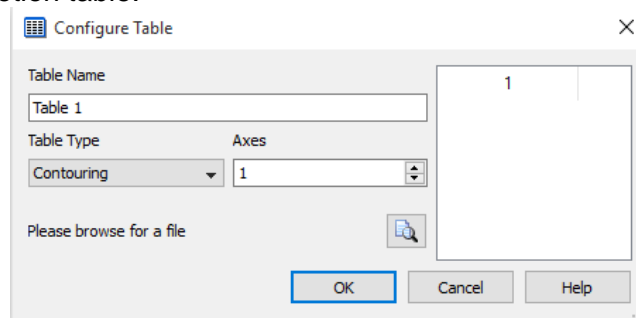


Fuente: NI LabVIEW.

Para la entrada “*table*” es necesario crear un campo nuevo denominado “NI SoftMotion Table”, la cual se crea mediante la opción new>>NI SoftMotion table del explorador de proyectos.

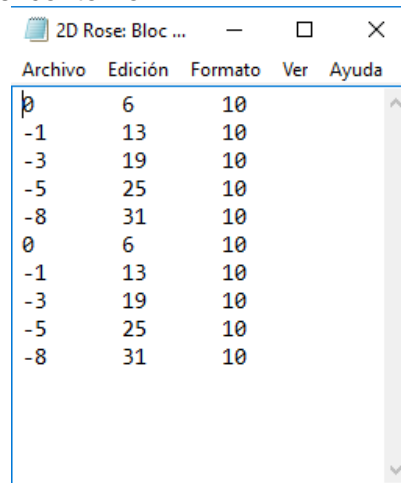
Al dar click sobre la opción, se abrirá una ventana como aparece en la figura 51, en la cual se ingresa el nombre de la tabla, la cantidad de ejes y se anexa la tabla realizada previamente en bloc de notas, dónde el espacio indica el número de columnas y los números hacia abajo el número de filas (figura 52).

Figura 51. NI SoftMotion table.



Fuente: NI LabVIEW.

Figura 52. Tabla para trazar el contorno.



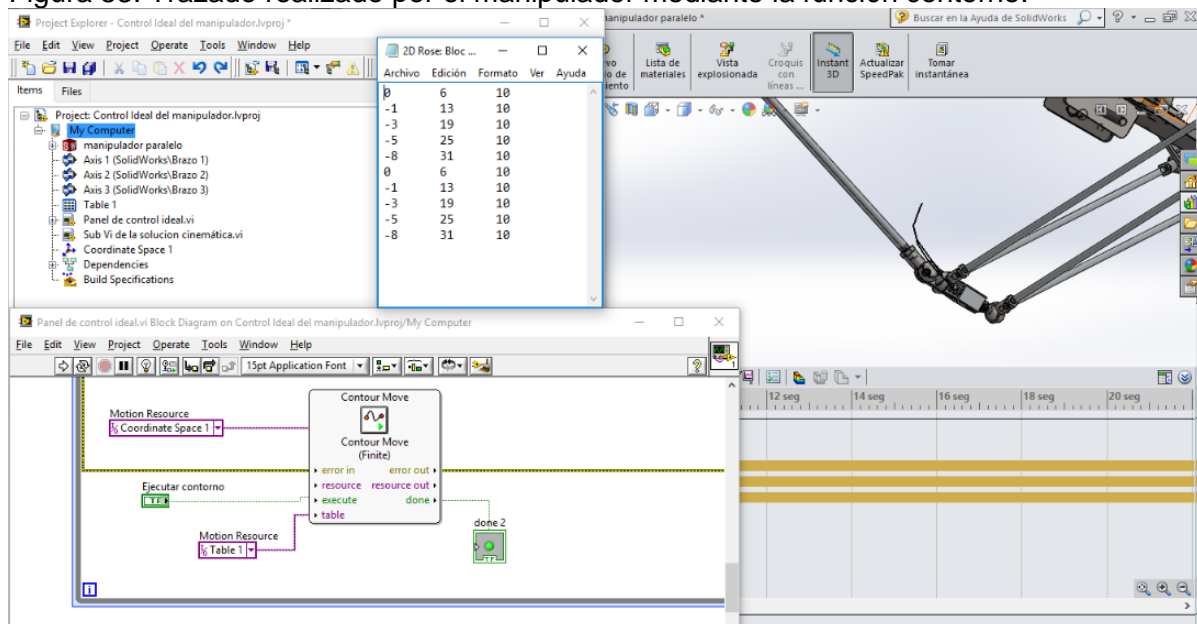
0	6	10
-1	13	10
-3	19	10
-5	25	10
-8	31	10
0	6	10
-1	13	10
-3	19	10
-5	25	10
-8	31	10

Fuente: NI LabVIEW.

al hacer click en “Ok” la tabla estará lista para realizar la programación en el diagrama de bloques.

En la figura 53 se muestra un contorno trazado por el manipulador utilizando la tabla de la figura 52 y un eje coordinado.

Figura 53. Trazado realizado por el manipulador mediante la función contorno.



The screenshot displays a LabVIEW environment with three main windows. The top window, titled 'manipulador paralelo', shows a 3D CAD model of a parallel manipulator. The middle window, titled '2D Rose: Bloc ...', contains the same table of coordinates as in Figure 52. The bottom window, titled 'Panel de control ideal.vi Block Diagram on Control Ideal del manipulador.lvproj/My Computer', shows a block diagram with a 'Contour Move' block. This block is connected to a 'Motion Resource' block labeled '% Coordinate Space 1' and a 'Table' block labeled '% Table 1'. The 'Contour Move' block has several output indicators: 'error in', 'error out', 'resource', 'resource out', 'execute', 'done', and 'table'. A 'done 2' indicator is also present. A timeline at the bottom right shows a sequence of events over 20 seconds.

Fuente: NI LabVIEW.

Nota importante: la “SoftMotion table” tiene un error a la hora de iniciar la simulación (se desconoce si en versiones posteriores de LabVIEW el problema se

solucionó), saliendo una ventana con el siguiente comentario: *“An error occurred while attempting to switch the I/O scan mode. NI SoftMotion: The size of the buffer or array is incorrect”*; esto se debe a que, al agregar el archivo en Wordpad, LabVIEW no reconoce las columnas realizadas con la barra de “espacio”; por tanto, presentará este error.

Para solucionar el error se debe usar una plantilla de la tabla disponible en la siguiente carpeta: <labview>\examples\motion\FunctionBlocks\Finite Coordinate Contour Move. Se modifican los valores dentro de la tabla teniendo cuidado de no agregar espacios nuevos; si se desean crear más filas se deberá copiar y pegar de la fila superior para asegurar el espaciado que poseen estas tablas. De esta manera LabVIEW reconocerá el documento como válido y ejecutará el contorno (este método solo se usa si la tabla tiene más de una columna), [13].

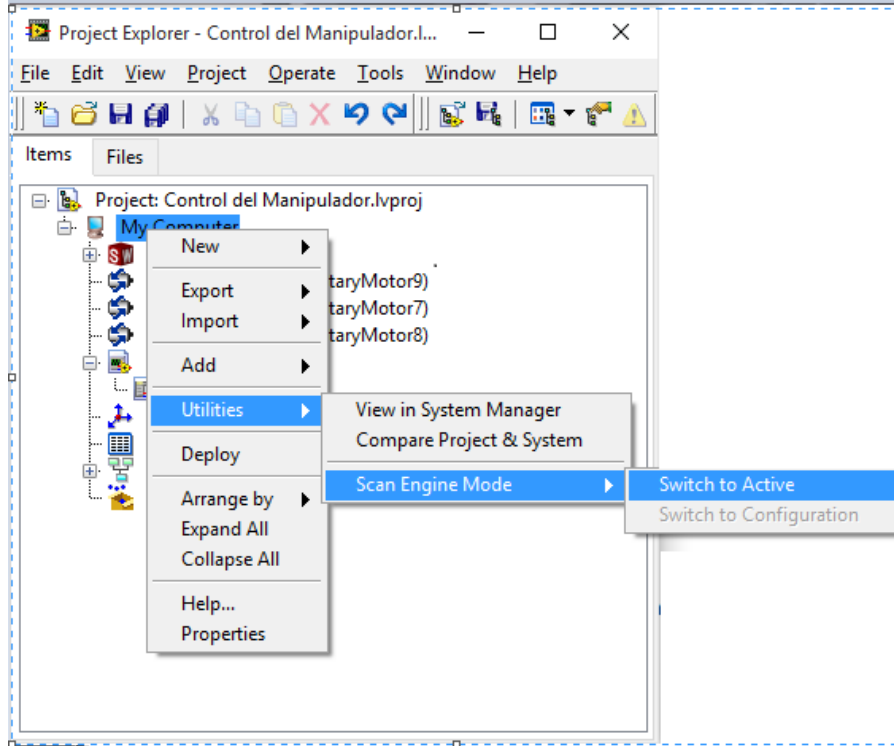
4.6.4 inicio y fin de una simulación en SolidWorks. Como se mencionó anteriormente, el scan period es la velocidad a la cual está trabajando el scan engine, el cual cuenta con dos modos de operación: el modo activo (active mode) y el modo de configuración (configuration mode).

El modo activo es aquel que inicia la simulación después de haber configurado de manera correcta todos los parámetros de la simulación. Éste se activa automáticamente la primera vez que se hace “deploy” a un proyecto.

El modo configuración, es el modo en el que debe permanecer el scan engine cuando no se está simulando, o también se cambia a esta forma cuando se desea detener la simulación; además en este modo es donde se le pueden hacer cambios a la aplicación.

La ruta para cambiar entre modos el scan engine se muestra en la figura 54.

Figura 54. Ruta de los modos del Scan engine.

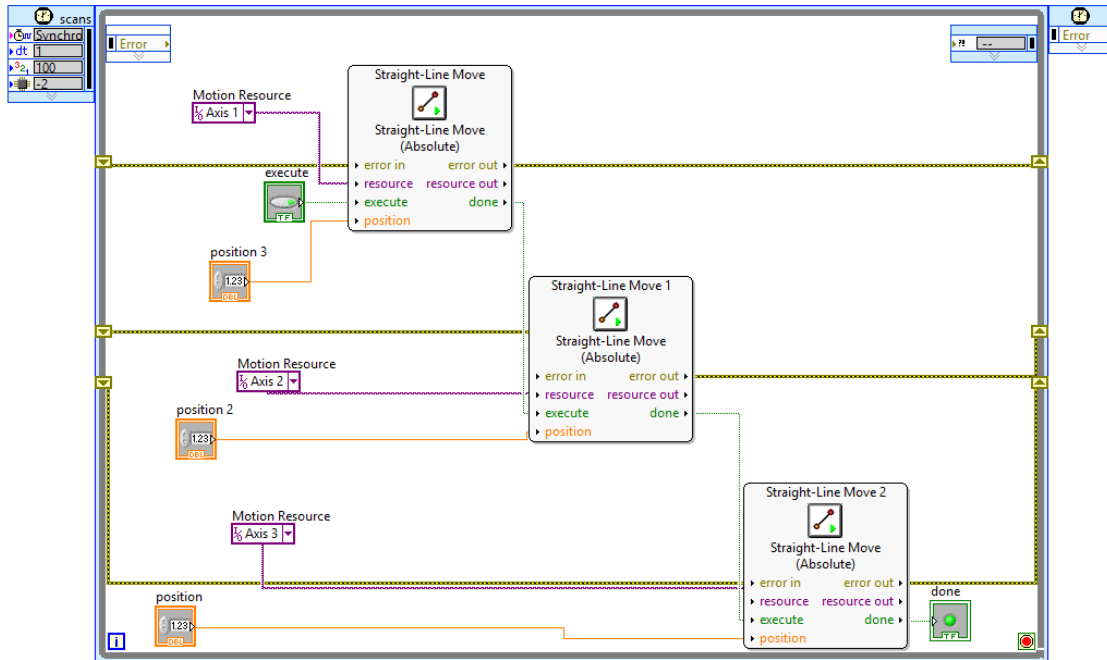


Fuente: NI LabVIEW.

4.6.5 Programación en serie y paralelo. Existen dos maneras de conectar las funciones de movimiento, en serie o en paralelo. Estas conexiones se logran gracias a las características de los terminales “Execute” y “Done”, para controlar cuando se debe ejecutar en qué orden deben realizarse.

Elegir entre un modo u otro depende enteramente de las necesidades del programador. Por ejemplo, si se desean mover los brazos del manipulador de manera que el brazo 1 se mueva primero y el brazo 3 de último, se necesita una conexión en serie para realizar un movimiento ordenado entre funciones de movimiento. Un ejemplo de esta programación se muestra en la figura 55.

Figura 55. Conexión de funciones en serie.

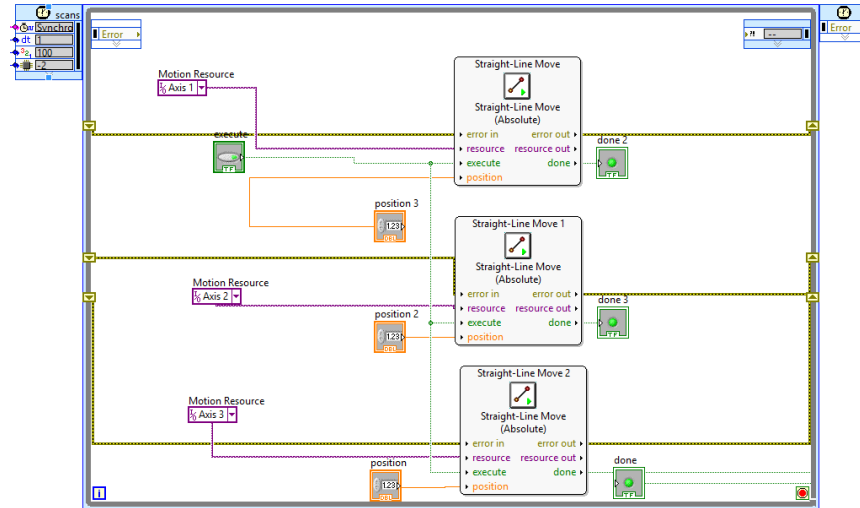


Fuente: NI LabVIEW.

Como se puede observar en la figura anterior, hay un solo interruptor “Execute” y la salida “Done” de una función se convierte en la entrada “Execute” de la otra; esto le indica al programa que, inicie la primera función de línea e inmediatamente después de terminar el movimiento, inicie con el de la segunda y así sucesivamente hasta llegar a la última función y terminar el movimiento encendiendo el indicador “Done”.

Si se desean mover los tres brazos del manipulador al mismo tiempo, es necesario emplear la conexión en paralelo que se muestra en la figura 56. En ella se puede notar que la entrada “Execute” se encuentra conectada al mismo nodo de las tres funciones de línea y cada una posee un indicador “Done”; el programa interpreta esta conexión de tal manera que, al presionar el botón de ejecutar, las tres funciones de movimiento se activarán al mismo tiempo para realizar el movimiento deseado.

Figura 56. Conexión de funciones en paralelo.



Fuente: NI LabVIEW.

Se pueden emplear ambos tipos de conexión si es necesario realizar movimientos más complejos que requieran que los terminales se muevan en un orden y después al mismo tiempo.

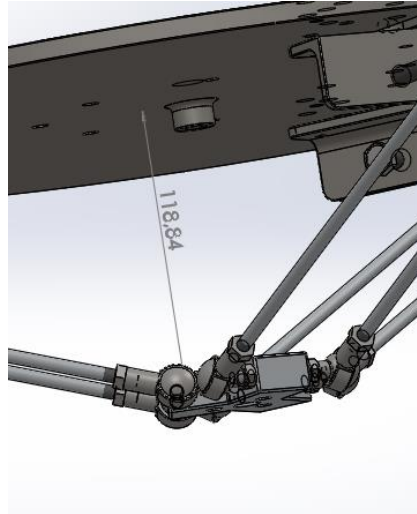
En el proyecto se utilizará la conexión en paralelo, debido a que es necesario mover los tres brazos al mismo tiempo.

4.6.6 Sensores de SolidWorks en LabVIEW. Gracias a la conexión que se puede realizar entre SolidWorks y LabVIEW, el usuario cuenta con la posibilidad de emplear sensores virtuales en su proyecto que funcionan como los sensores reales dentro de un mecanismo. Los sensores creados están basados en las dimensiones del ensamblaje y emitirán una señal lógica booleana (verdadero o falso) de acuerdo a la condición de alerta que se especifique.

Para agregar un sensor el primer paso es crear la dimensión, esta dimensión será la que representará al sensor y debe ser colocada entre dos componentes. Para crear una dimensión dentro del ensamblaje basta con poner una cota inteligente entre los componentes que se desee censar (es importante que la cota se cree en la ventana de modelado y no la de movimiento).

Se utiliza la cota inteligente como dimensión para el sensor debido a que cuando los componentes se muevan, la cota se actualiza al instante; en la figura 57 se aprecia una dimensión creada entre la base fija y la móvil.

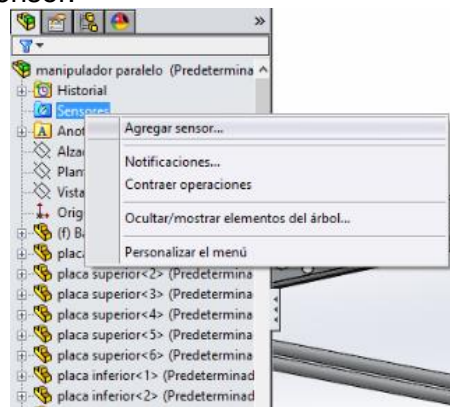
Figura 57. Dimensión (cota) entre dos caras.



Fuente: NI LabVIEW.

El siguiente paso consiste en agregar el sensor a SolidWorks; para lograrlo, se debe hacer click derecho en la carpeta de sensores en el feature manager y después en agregar sensor, como se ilustra en la figura 58.

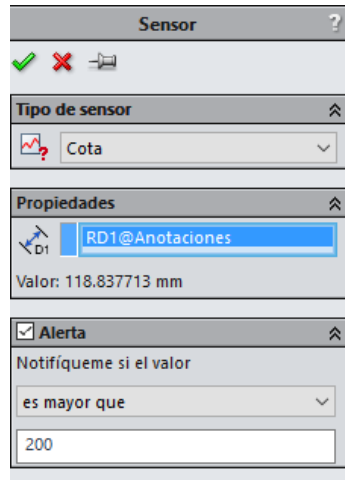
Figura 58. Agregando un sensor.



Fuente: NI LabVIEW.

Inmediatamente se abrirá una ventana como la que se muestra en la figura 59, en esta ventana se debe definir el sensor de la siguiente manera: en el espacio “tipo sensor” se debe seleccionar cota, después se debe seleccionar la distancia a la cual será ligada el sensor; es decir la dimensión, y finalmente elegir el tipo de alerta deseada.

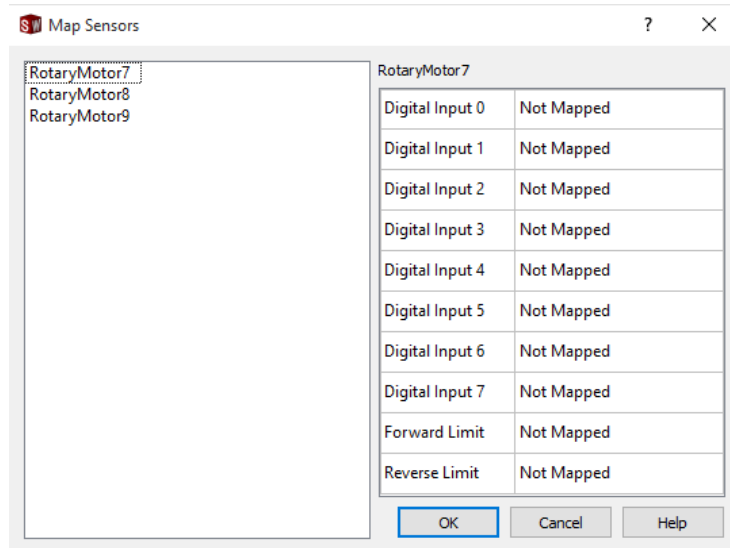
Figura 59. Definición del sensor.



Fuente: NI LabVIEW.

El tercer paso consiste en mapear o ligar el sensor a una línea digital en LabVIEW, para lograrlo se requiere situarse sobre el ensamblaje en el explorador de proyectos, después dar click derecho y seleccionar el campo Map sensors. Se abrirá una ventana como la que se observa en la figura 60, del lado izquierdo se tienen todos los ejes disponibles y del otro lado se observan las líneas digitales para cada uno de estos ejes. Para cada eje se cuenta con una lista de sensores creados en SolidWorks (es necesario sincronizar el ensamblaje de nuevo para que los cambios surtan efecto).

Figura 60. Ventana de definición de las líneas.



Fuente: NI LabVIEW.

En la ventana de la figura 60 se seleccionan el o los sensores para cada eje y de esta manera se mapean a una línea digital iniciando desde la línea digital cero; es

decir, el primer sensor creado se asignará a la línea digital cero, el segundo a la 1 y así sucesivamente.

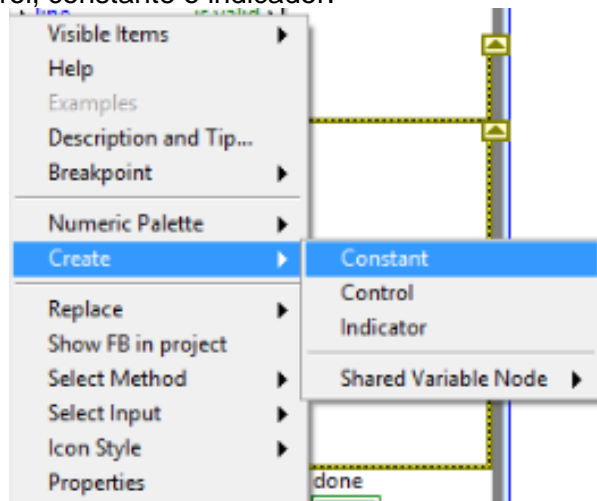
El último paso consiste en hacer que LabVIEW lea el valor del sensor y, para lograrlo se hará uso de la función “Read” de la paleta de funciones de NI SoftMotion. Esta función se encuentra de la misma manera que las funciones de movimiento descritas anteriormente en el ítem “Function blocks”.

Primero se debe seleccionar el tipo de datos que va a recibir la función. Se debe dar click derecho en la función, después en “Select method” y finalmente seleccionar la opción “Digital line”.

Al cambiar el método se puede observar que se agrega una entrada llamada “line” y otra llamada “Resource” que consiste en un SoftMotion axis al que se encuentra mapeado un sensor. La entrada “line” es utilizada para especificar que sensor será leído por esta función; por ejemplo, se desea utilizar un sensor que se encuentra mapeado a uno de los ejes y en el lado derecho corresponde a la línea digital 0, entonces en la entrada “line” se debe elegir una constante con el valor de 0.

Para asignar una constante, control o indicador en cualquier entrada o salida, basta con dar click derecho sobre la entrada o salida y seleccionar la opción “create” como se muestra en la figura 61.

Figura 61. Crear control, constante o indicador.



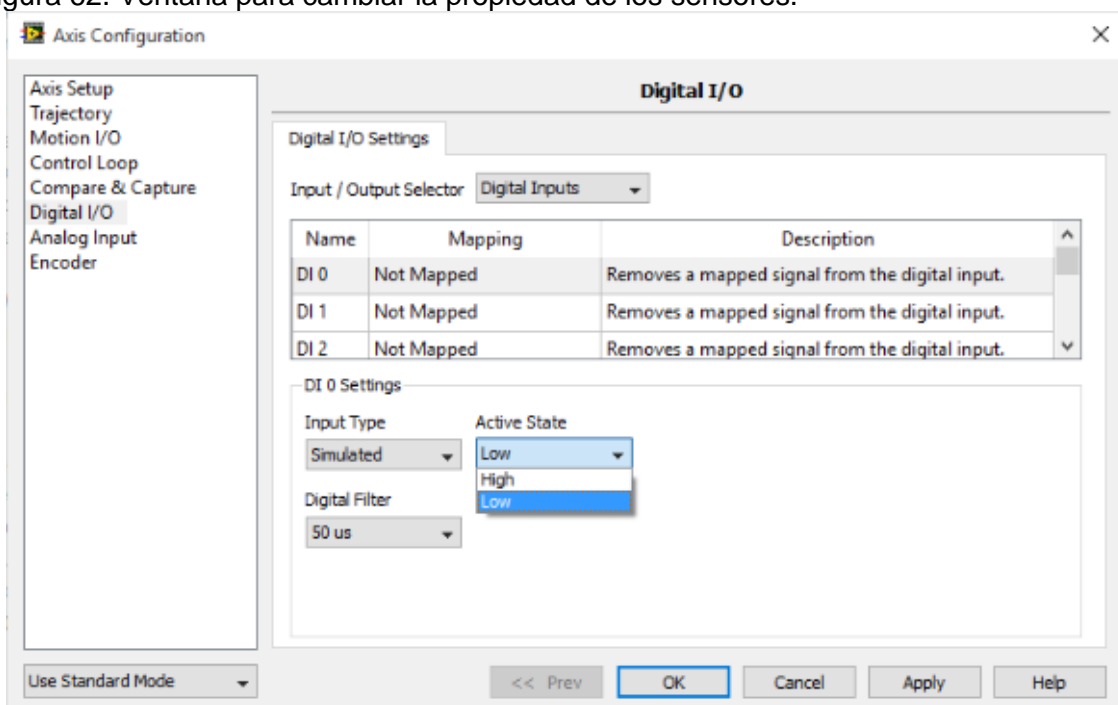
Fuente: NI LabVIEW.

En las salidas de la función se pueden encontrar dos opciones nuevas: “is valid” y “data”, la primera entrega un valor booleano verdadero o un flanco positivo cuando la lectura se lleva a cabo de manera normal. La única manera de que ocurra lo contrario es que se pierda la lectura durante un ciclo del scan engine por errores de programación o similares. La salida “data” es la que se encarga de dar aviso cuando

la alarma se haya disparado; en LabVIEW los sensores están pre configurados en modo “active low”, que significa que al activarse la alarma enviará un flanco negativo o falso para indicar la ocurrencia de un evento.

Por esta razón usualmente en la programación de los sensores se coloca una compuerta not a la salida de la terminal data para convertir el flanco negativo en uno positivo cuando se activa el sensor. También se puede cambiar este comportamiento en los sensores haciendo click derecho sobre el SoftMotion axis al cual está ligado el sensor, seleccionando en “properties”, después en “Digital I/O y se abrirá una ventana en la cual se puede modificar la propiedad como se muestra en la figura 62.

Figura 62. Ventana para cambiar la propiedad de los sensores.



Fuente: NI LabVIEW.

Los sensores permiten ser configurados de tal manera que se puedan detectar colisiones entre las piezas. También en las conexiones en serie o paralelo permiten tener control de las secuencias de ejecución, teniendo en cuenta el valor del sensor que activará la salida “data” que se puede convertir en una entrada “Execute” de la siguiente función.

CAPITULO 5


PRESENTACIÓN DEL PROTOTIPO VIRTUAL CON SU RESPECTIVA PROGRAMACION



Con lo aprendido en los capítulos anteriores sobre SolidWorks y LabVIEW, ya se pueden poner en práctica todos los conceptos con el fin de integrar las características de ambos programas y desarrollar el prototipo virtual de un manipulador paralelo de tres grados de libertad tipo DELTA.

Se iniciará presentando el modelo final del prototipo virtual del manipulador, explicando algunos conceptos extra para hacer más realista la simulación, también se explicarán algunos detalles de las funciones de movimiento y programación que no fueron mencionadas anteriormente para crear el panel de control que manipulará el prototipo.

5.1 Prototipo virtual del manipulador paralelo DELTA 720

El prototipo virtual, al igual que el modelo real, consta de tres brazos y tres antebrazos cuya longitud total extendidos cada uno es de 720mm; el material de los brazos, antebrazos y conectores corresponde a aleación de aluminio 6061 y el de las bases, rotulas y demás accesorios es acero AISI 1020.

Para analizar el movimiento bajo cargas de trabajo, se pueden añadir fuerzas o pares torsores con el icono , se debe seleccionar una cara, vértice o punto para fuerzas y una cara o perfil circular para los pares motores.

Si el modelo a construir posee un sistema fuerza-resorte-amortiguador, también se pueden añadir a la simulación mediante los iconos  para resorte y  para amortiguador respectivamente.

La fricción que se añade a la simulación corresponde a contacto metal-metal dependiendo de las piezas que hay en contacto (aluminio-aluminio o aluminio acero) con lubricación (greasy) en las opciones de contacto que ofrece SolidWorks.

Con el modelo completamente definido, se procede a realizar la programación correspondiente en LabVIEW para controlar los brazos del manipulador de acuerdo a las ecuaciones de cinemática inversa definidas en el ítem 3.3.1 y las funciones de movimiento explicadas anteriormente.

5.2 Descripción de la aplicación de control para el prototipo virtual

En este apartado, se dará explicación del funcionamiento del panel de control, además de otras características de programación en LabVIEW empleadas para complementarlo con funciones útiles.

5.2.1 Funcionamiento del panel de control. El panel de control ofrece dos opciones de movimiento: movimiento al ingresar la coordenada deseada (Cinemática inversa) y trazado de trayectoria, en la cual, mediante una tabla de puntos, la base móvil del manipulador seguirá una trayectoria definida.

Para la primera opción, se desarrolló una aplicación en LabVIEW que resuelve las ecuaciones de la cinemática inversa y estos valores los envía como entradas en las funciones de movimiento dentro del diagrama de bloques.

El diagrama de bloques consta de 3 funciones de movimiento de línea que mueven cada uno de los motores conectados en los brazos; además, como se desea que se muevan al mismo tiempo al recibir la orden, estas funciones estarán conectadas en paralelo.

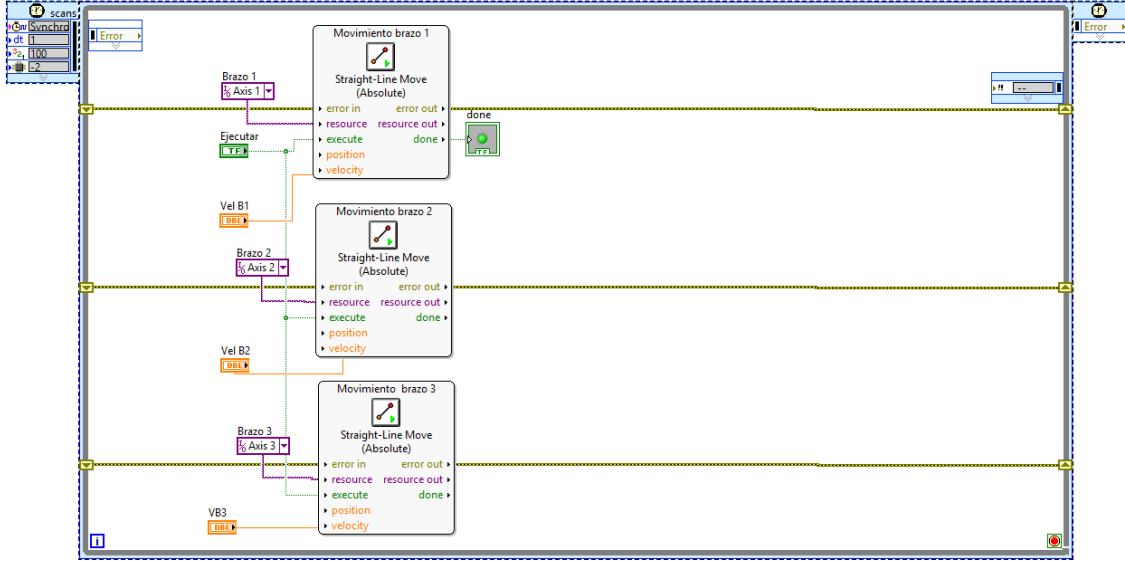
Para la segunda opción, se utiliza una función de trayectoria independiente de las funciones de línea anteriores que manipulará los tres motores mediante un sistema coordinado.

Además, el panel de control contará con dispositivos para controlar la velocidad de los brazos y también cuenta con paneles que indican en tiempo real características del movimiento como par motor, velocidad y posición.

5.2.2 Programación del diagrama de bloques. A continuación, se explicará cómo se creó el diagrama de bloques cuyo funcionamiento se mostró en el ítem anterior; integrando las funciones de movimiento propias de SoftMotion y otras aplicaciones propias de LabVIEW en el diagrama de bloques.

En primer lugar, dentro de la estructura de Timed Loop se crearon las tres funciones de movimiento de línea y se conectaron en paralelo. Cada uno de los SoftMotion axis fue conectado a las entradas y fueron creados los controles para velocidad cada uno como se ilustra en la figura 63.

Figura 63. Conectando las funciones de línea en paralelo.

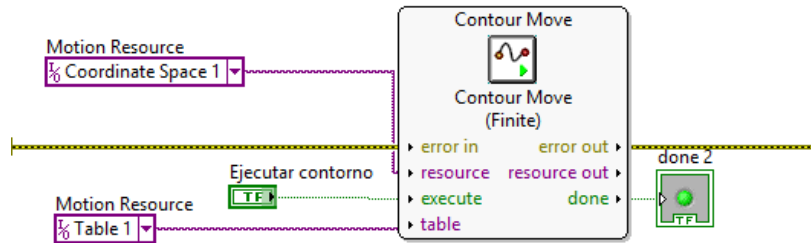


Fuente: NI LabVIEW.

Como se puede observar en la figura anterior, los iconos de posición y ejecución aparecen de otra forma, esto se puede lograr haciendo click derecho sobre cualquier icono y seleccionar la opción "Show as icon" para facilitar la visibilidad.

El siguiente paso consiste en agregar la función de movimiento de contorno con un control independiente para su ejecución como aparece en la figura 64.

Figura 64. Conectando la función de trayectoria.

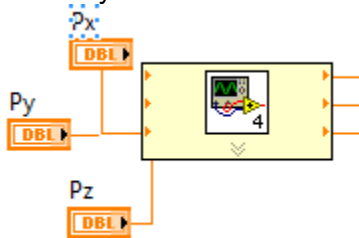


Fuente: NI LabVIEW.

Como se puede notar en la figura 64, no aparecen indicadores de control para la posición de los elementos; esto se debe a que dichos controles serán manipulados con un instrumento virtual realizado aparte denominado Sub-VI, el cual contiene todo el código de programación de un VI en un solo bloque.

Para crear un sub VI basta con seleccionar en un recuadro el código que se desea convertir; después en la barra de herramientas del diagrama de bloques se da click en “edit” y luego en “create subVI” y se creará un recuadro como el que aparece en la figura 65.

Figura 65. Conectando la función de trayectoria.



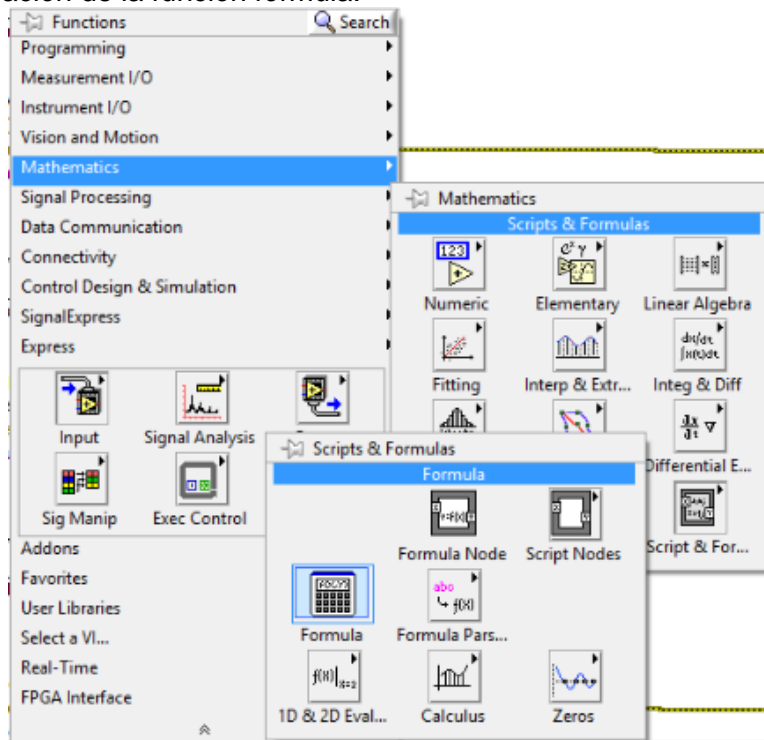
Fuente: NI LabVIEW.

El subVI presenta entradas y salidas al igual que cualquier bloque y dentro de él se tiene el código de programación, el cual puede contener más sub VI cuando se trabaja con código extendido. En este caso el subVI contiene el código necesario para resolver las ecuaciones de cinemática inversa que permitirán mover a la base móvil al lugar deseado. Se puede crear un subVI dentro del código principal de la programación del manipulador copiando y pegando de un VI al diagrama de bloques del VI que se desea, luego se convierte en subVI. Hay que tener en cuenta que al transformar un código general en un subVI solo aparecerán las entradas y salidas las cuales tengan controles, constantes o indicadores.

Para resolver las ecuaciones de la cinemática inversa, se utilizó la herramienta “fórmula” que posee LabVIEW, la cual permite crear las variables, escribir las ecuaciones y crea un bloque en el cual las entradas son las variables creadas y la salida el resultado. Al unir varias funciones de fórmula se pueden crear ecuaciones más complejas y con la ayuda de los subVI se evitan varios problemas al manejar muchos cables de datos.

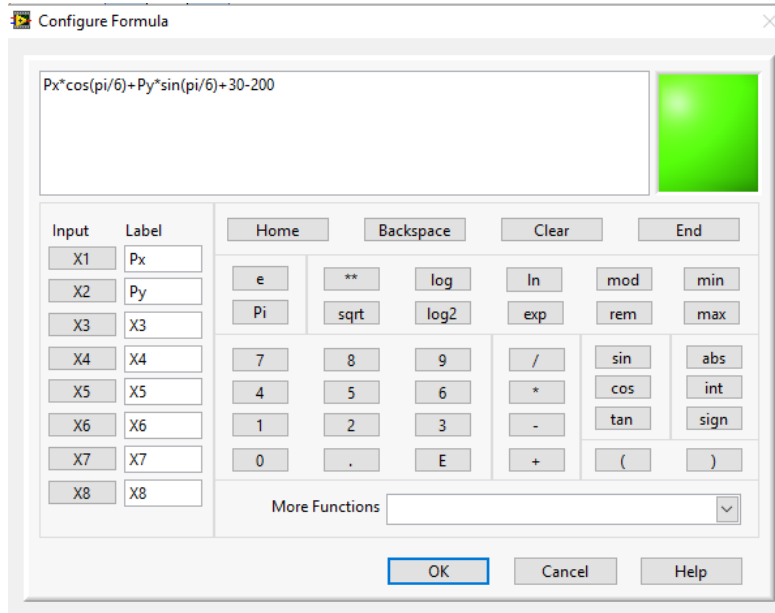
La ubicación de “fórmula” se muestra en la figura 66, al seleccionar esta herramienta se abrirá una ventana con una calculadora, la cual se usará para escribir la fórmula deseada. En la figura 67 se muestra un ejemplo de una fórmula hecha con esta herramienta y en la figura 68 un código de uno de los subVI del proyecto con varias funciones de fórmula conectadas.

Figura 66. Ubicación de la función fórmula.



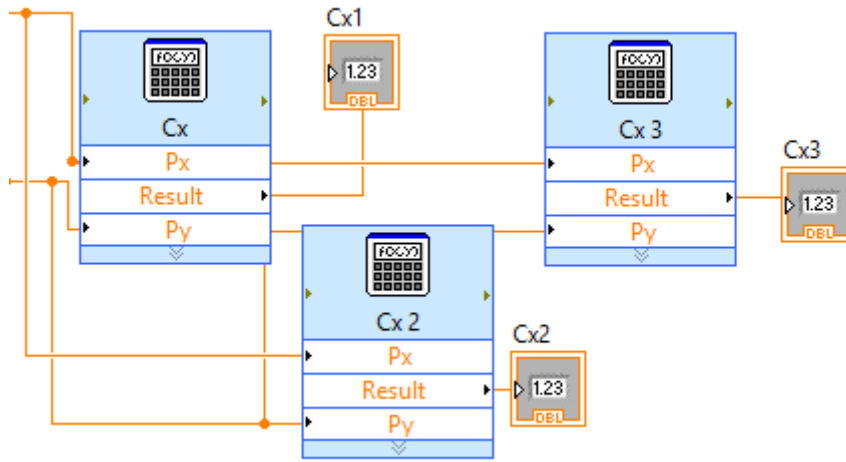
Fuente: NI LabVIEW.

Figura 67. Ventana de la función fórmula.



Fuente: NI LabVIEW.

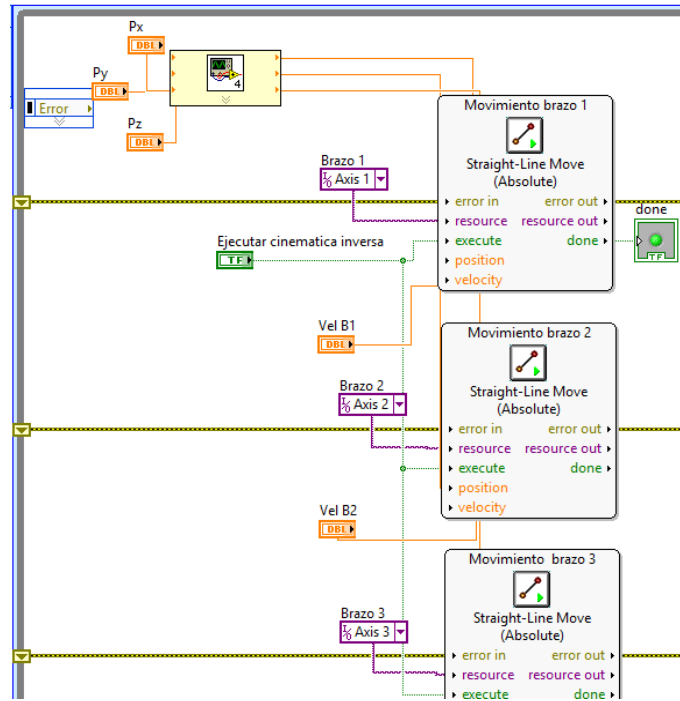
Figura 68. Código de un subVI con varias fórmulas.



Fuente: NI LabVIEW.

El subVI mostrado en la figura 65 tiene como entradas las coordenadas P_x , P_y y P_z y como salidas los ángulos en grados que debe mover cada brazo del manipulador para alcanzar dicha coordenada. Las salidas del subVI se conectan en la entrada de posición de cada una de las funciones de movimiento como se muestra en la figura 69.

Figura 69. SubVI que controla la posición de los brazos.



Fuente: NI LabVIEW.

En el documento se dio explicación sobre cómo utilizar las funciones en el diagrama de bloques y, el panel de control solo se utilizó para ejecutar la simulación y no se mencionaron las funciones que este posee para tener una mejor visualización del panel. A continuación, se dará una breve explicación de cómo agregar pestañas y graficas al panel de control para manejar el espacio disponible y tener a disposición gráficos con los factores que se deseen estudiar.

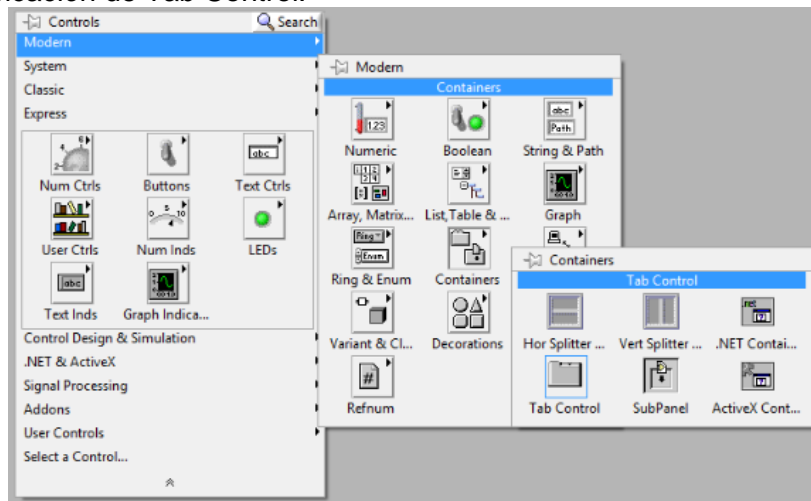
5.2.3 Programación del Panel frontal. Como se explicó, el panel de control es aquel que permite controlar el modelo y visualizar sus características, ya sea por medio de graficas o números o ambos. Cuando un modelo tiene muchas variables que deben ser estudiadas, como es el caso del manipulador cuyos tres motores deben ser monitoreados, se ocupa mucho espacio en el panel de control con los gráficos y recuadros de información; siendo los gráficos muy pequeños para que se puedan ver en la página del panel de control. Para solucionar el problema de espacio se dispone de una herramienta llamada “Tab Control” que consiste en crear diferentes pestañas dentro del panel de control para facilitar la visualización de diferentes gráficos de tamaño considerable en el mismo panel de control.

5.2.3.1 Añadiendo pestañas al panel frontal. El panel frontal al igual que el diagrama de bloques posee sus propias funciones y de la misma manera estas funciones se ven reflejadas en el diagrama de bloques, es decir, si se crea un control en el panel frontal, este aparecerá también en el diagrama de bloques para conectarlo a la entrada de alguna función.

La ubicación de la herramienta Tab Control se muestra en la figura 70. Al utilizar esta herramienta aparecerá una ventana en dicho panel como se puede observar en la figura 71 y su reflejo en el diagrama de bloques se puede ver en la figura 72.

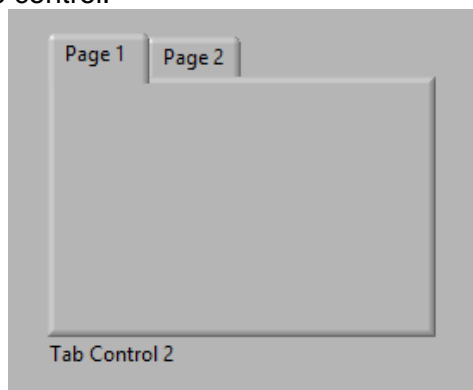
El icono de tab control en el diagrama de bloques no se manipula, aunque tiene una salida, al crear un indicador o control aparecerá otro tab control. Para utilizar esta herramienta basta con modificar el tamaño de la ventana y arrastrar los componentes que se deseen del panel frontal original a esta pestaña como en la figura 73.

Figura 70. Ubicación de Tab Control.



Fuente: NI LabVIEW.

Figura 71. Ventana de Tab control.



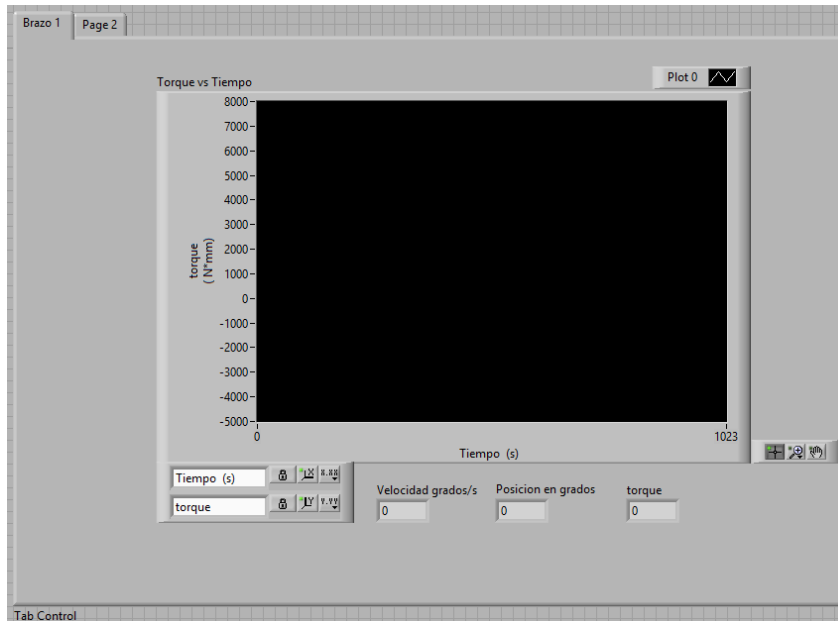
Fuente: NI LabVIEW.

Figura 72. Icono de Tab control en el diagrama de bloques.



Fuente: NI LabVIEW.

Figura 73. Ventana Tab control con elementos en su interior.



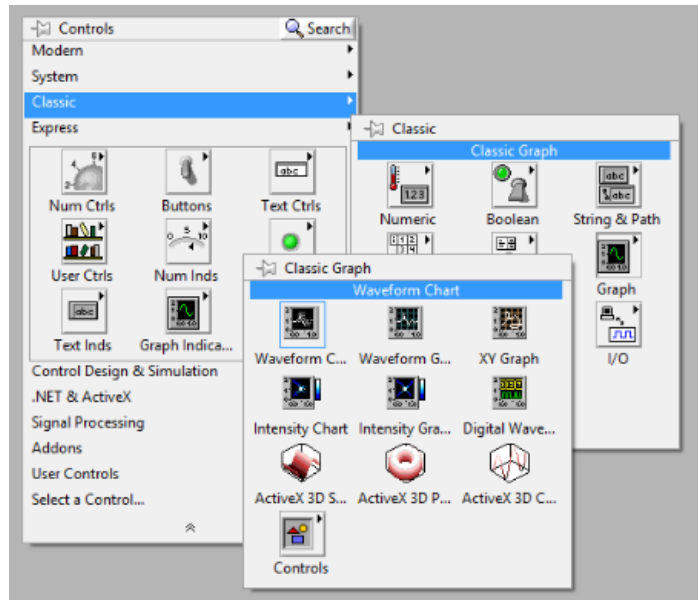
Fuente: NI LabVIEW.

Todos los nombres que aparecen, tanto de la ventana como de las pestañas se pueden modificar dando doble click, y si se desea añadir más pestañas se debe seleccionar una de las pestañas con click derecho y después en alguna de las opciones “add page after o add page before” que añade una nueva página antes o después de la pestaña seleccionada.

En la figura 73 aparece una gráfica dentro del tab control que muestra el par motor en función del tiempo del motor que está conectado al brazo 1. La gráfica permite añadir botones para realizar zoom o moverse dentro de ella para visualizar mejor el comportamiento de la variable estudiada; además, permite personalizar tanto el nombre de los ejes como el nombre de la gráfica o los colores dentro de esta.

5.2.3.2 Creación de un gráfico. Para crear un gráfico que indique alguna variable dentro del panel frontal basta con utilizar la herramienta “Waveform Chart” siguiendo la ruta que se muestra en la figura 74 en el panel de control.

Figura 74. Ubicación de la herramienta Waveform Chart.



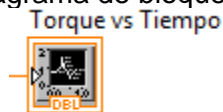
Fuente: NI LabVIEW.

Al seleccionar la herramienta, aparecerá un gráfico como el que se muestra e la figura 73 pero sin los botones que aparecen allí. Para añadir los botones que facilitan la visualización del gráfico se da click derecho en la zona del gráfico y se despliega la opción “visible ítems” donde se pueden seleccionar los que se desean visualizar; los más útiles son Scale palette y Graph legend, el primero sirve para ajustar la precisión de la escala y ajustar la misma al tamaño de la ventana del gráfico y el segundo se utiliza para realizar zoom en el gráfico y moverse en este para hallar los picos deseados.

Después de definir como se desea que aparezca en gráfico, el siguiente paso es enviar los datos a la entrada del mismo, para ello se debe pasar al diagrama de bloques.

El icono de gráfico en el diagrama de bloques aparece como se ve en la figura 75. Éste posee una entrada correspondiente a una entrada de datos. Para crear la entrada de datos del gráfico se hará uso de la herramienta “Read” mostrada en el apartado 4.5.6 correspondiente a sensores. Sin embargo, en este caso no se hará la lectura de un sensor sino de un motor (SoftMotion axis).

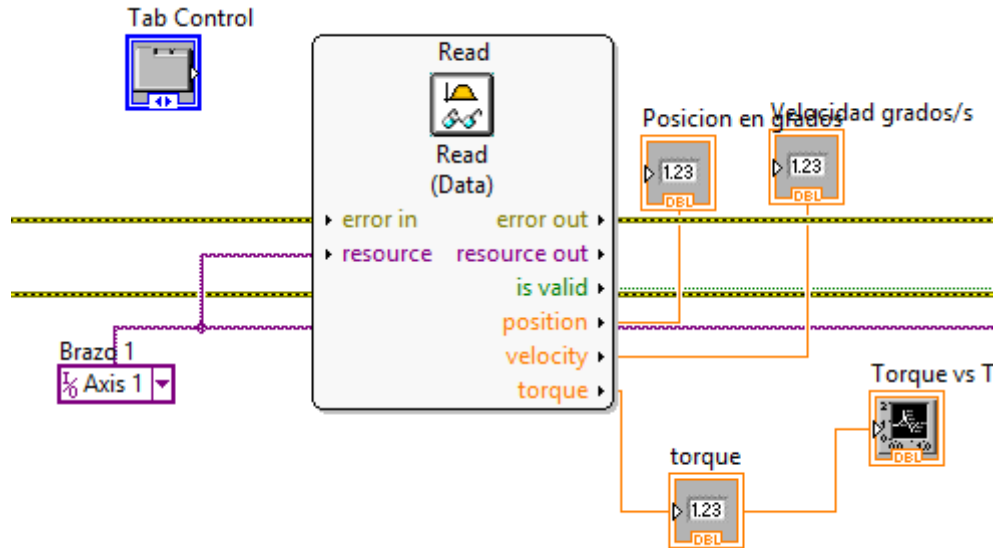
Figura 75. Icono de gráfico en el diagrama de bloques.



Fuente: NI LabVIEW.

A diferencia de los sensores, el método de la función read debe ser de datos y no de línea digital. En la entrada “resource” se ingresa el motor deseado, en este caso el motor del brazo 1 y en las salidas se pueden conectar gráficos o indicadores numéricos o ambos en una misma línea, como se puede notar en la figura 76.

Figura 76. Herramienta read en modo “Data”.

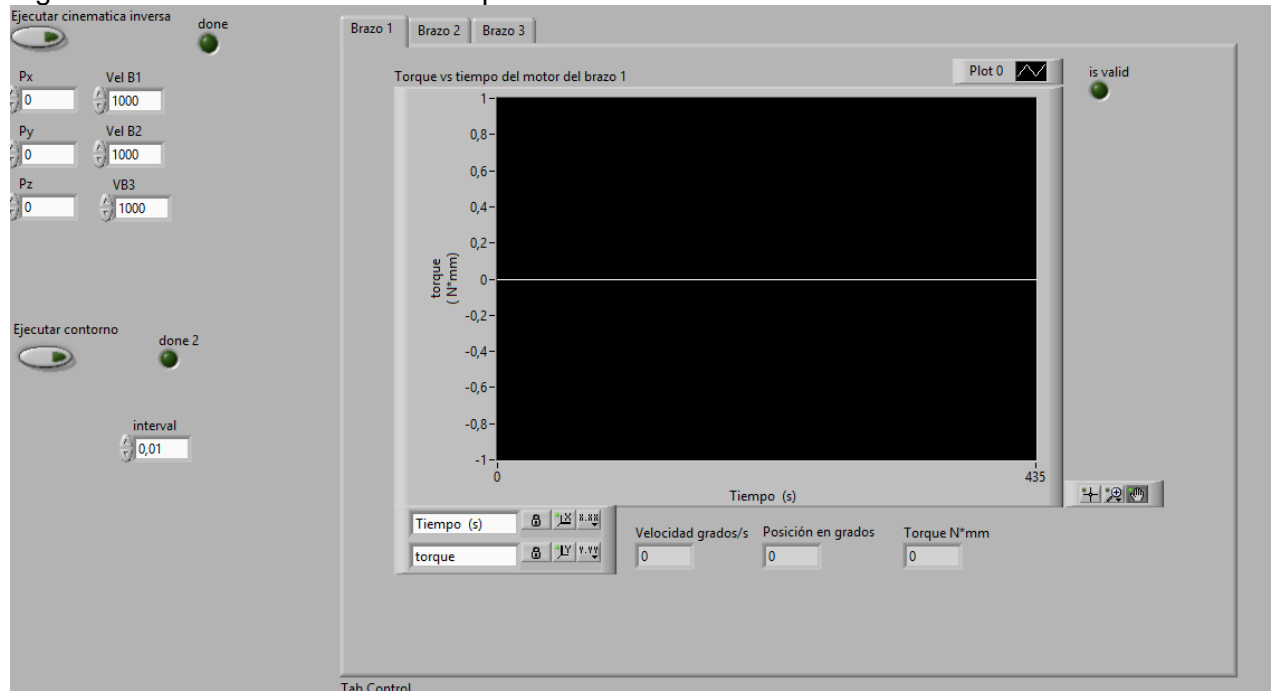


Fuente: NI LabVIEW.

Al igual que con sensores hay que configurar el motor de la misma manera como se presenta en la figura 62 poniéndolo el motor en modo “Low”.

5.2.4 Panel frontal del manipulador paralelo delta 720. Con todo lo indicado anteriormente, en la figura 77 se presenta el panel frontal perteneciente al manipulador paralelo de tres grados de libertad tipo delta 720.

Figura 77. Panel de control del manipulador



Fuente: NI LabVIEW.

CAPITULO 6 PRUEBAS Y RESULTADOS

6.1 Prueba de movimiento del prototipo virtual

En este apartado se realizarán dos tipos de pruebas al manipulador: la primera consiste en pruebas de posición del elemento terminal para determinar su exactitud; la segunda consiste en una prueba de trazado de trayectoria para determinar su comportamiento y los pares motores que se generan en el proceso. Además, la última prueba se hará dos veces: una sin carga de trabajo y otra con carga de trabajo.

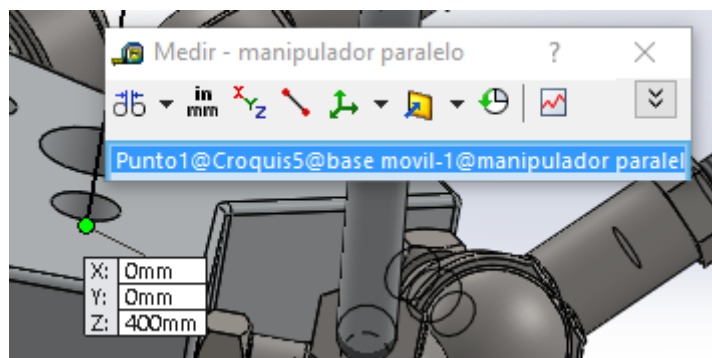
6.1.1 prueba de posición del elemento terminal del manipulador paralelo DELTA 720. La prueba que se realizará en el prototipo virtual será la misma que se desarrolló en el proyecto de grado del manipulador de la referencia [2]; la cual consiste en probar tres posiciones conocidas del punto P (x, y, z) y después corroborar los ángulos obtenidos y la posición final de la base móvil del manipulador.

Prueba numero 1: determinación de la posición angular de los motores a partir del punto conocido P de coordenadas $P_x=0$; $P_y=0$; $P_z=400$; además se comprobará la posición final del elemento terminal en SolidWorks y se comparará el resultado con el obtenido por el manipulador paralelo DELTA 720.

Utilizando el panel de control del prototipo virtual del manipulador, se ingresó el punto de coordenadas establecido arriba y se obtuvo lo que se muestra a continuación:

- En los ángulos de los brazos se obtienen los siguientes valores:
 $\Theta_{11}= 31,0936$; $\Theta_{12}= 31,0936$; $\Theta_{13}= 31,0936$
- En la figura 78 se muestra la coordenada final de la base móvil medida en SolidWorks.

Figura 78. Primera prueba de posición del manipulador.



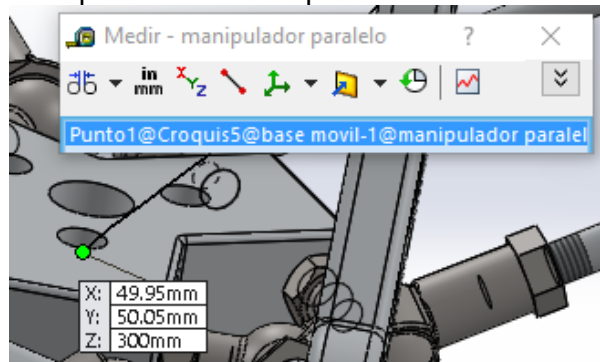
Fuente: SolidWorks.

Prueba numero 2: determinación de la posición angular de los motores a partir del punto conocido P de coordenadas $P_x=50$; $P_y=50$; $P_z=300$; además se comprobará la posición final del elemento terminal en SolidWorks y se comparará el resultado con el obtenido por el manipulador paralelo DELTA 720 de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Utilizando el panel de control del prototipo virtual del manipulador, se ingresó el punto de coordenadas establecido arriba y se obtuvo lo que se muestra a continuación:

- En los ángulos de los brazos se obtienen los siguientes valores:
 $\Theta_{11}= -2,64698$; $\Theta_{12}= 22,9275$; $\Theta_{13}= 30,8554$
- En la figura 79 se muestra la coordenada final de la base móvil medida en SolidWorks.

Figura 79. Segunda prueba de posición del manipulador.



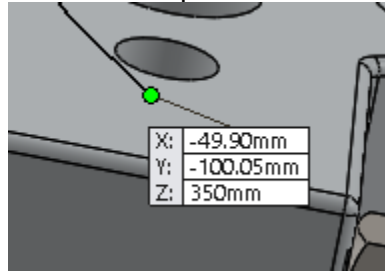
Fuente: SolidWorks.

Prueba numero 3: determinación de la posición angular de los motores a partir del punto conocido P de coordenadas $P_x=-50$; $P_y=-100$; $P_z=350$; además se comprobará la posición final del elemento terminal en SolidWorks y se comparará el resultado con el obtenido por el manipulador paralelo DELTA 720 de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Utilizando el panel de control del prototipo virtual del manipulador, se ingresó el punto de coordenadas establecido arriba y se obtuvo lo que se muestra a continuación:

- En los ángulos de los brazos se obtienen los siguientes valores:
 $\Theta_{11}= 46,74$; $\Theta_{12}= 29,0608$; $\Theta_{13}= 2,12076$
- En la figura 80 se muestra la coordenada final de la base móvil medida en SolidWorks.

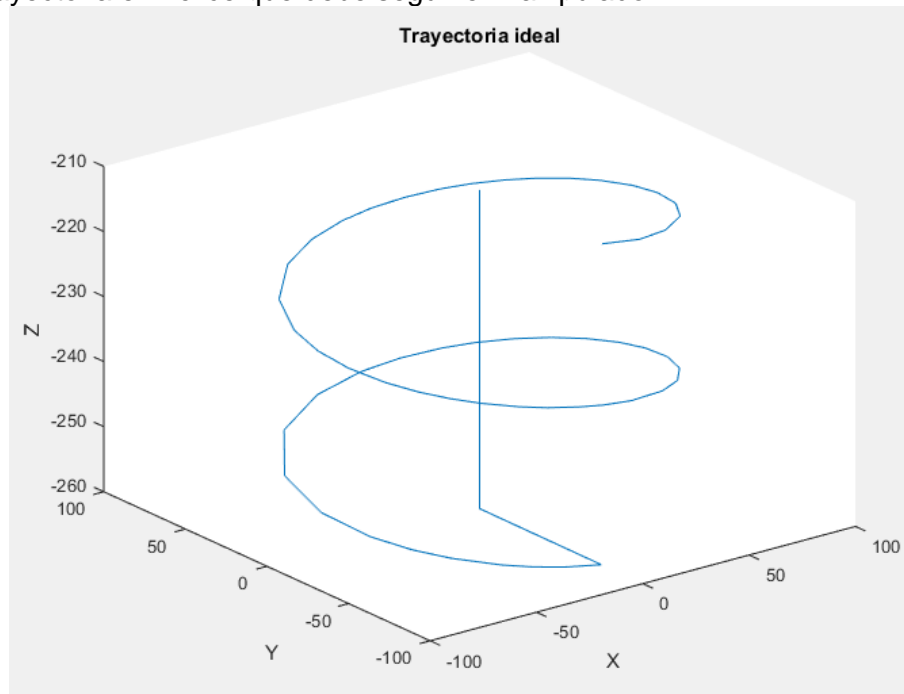
Figura 80. Tercera prueba de posición del manipulador.



Fuente: SolidWorks.

6.1.2 Prueba de trayectoria del manipulador ideal. En el trabajo de grado sobre el manipulador paralelo DELTA 720 de la referencia [2], se muestra una trayectoria espiral diseñada con la ayuda de 50 puntos $P(x, y, z)$ que la conforman. Se opta por diseñar de manera similar la trayectoria espiral en SolidWorks como se muestra en la figura 81; después se trazan puntos sobre ella y se sacan las coordenadas necesarias para hallar los ángulos de los motores e ingresarlos a la tabla de SoftMotion.

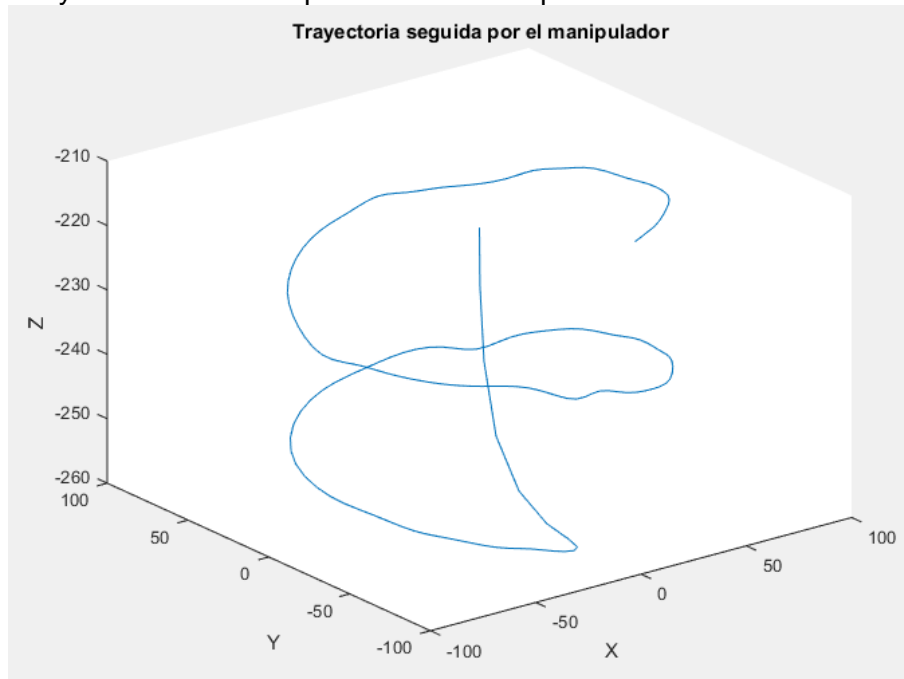
Figura 81. Trayectoria en hélice que debe seguir el manipulador.



Fuente: Matlab.

Al ingresar los puntos a la tabla de SoftMotion, el manipulador realizó la trayectoria que se puede ver en la figura 82

Figura 82. Trayectoria en hélice que realiza el manipulador.



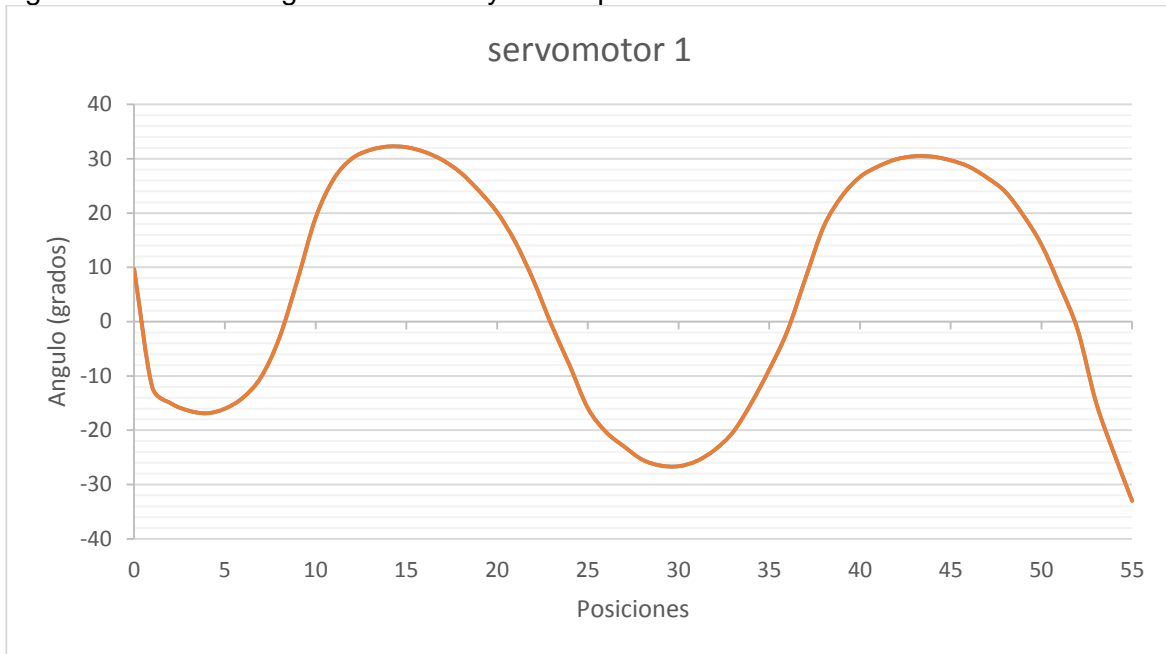
Fuente: Matlab.

La trayectoria dibujada por el manipulador virtual no pasa exactamente por los puntos definidos, sino que lo hace cerca de ellos. Esto se debe a que la función de trayectoria del módulo SoftMotion extrapola los puntos que se encuentran definidos en la tabla de SoftMotion y los aproxima a medida que ocurre la simulación, dando como resultado una trayectoria equivalente a la deseada.

Al finalizar la trayectoria, se crean los siguientes gráficos para ser analizados:

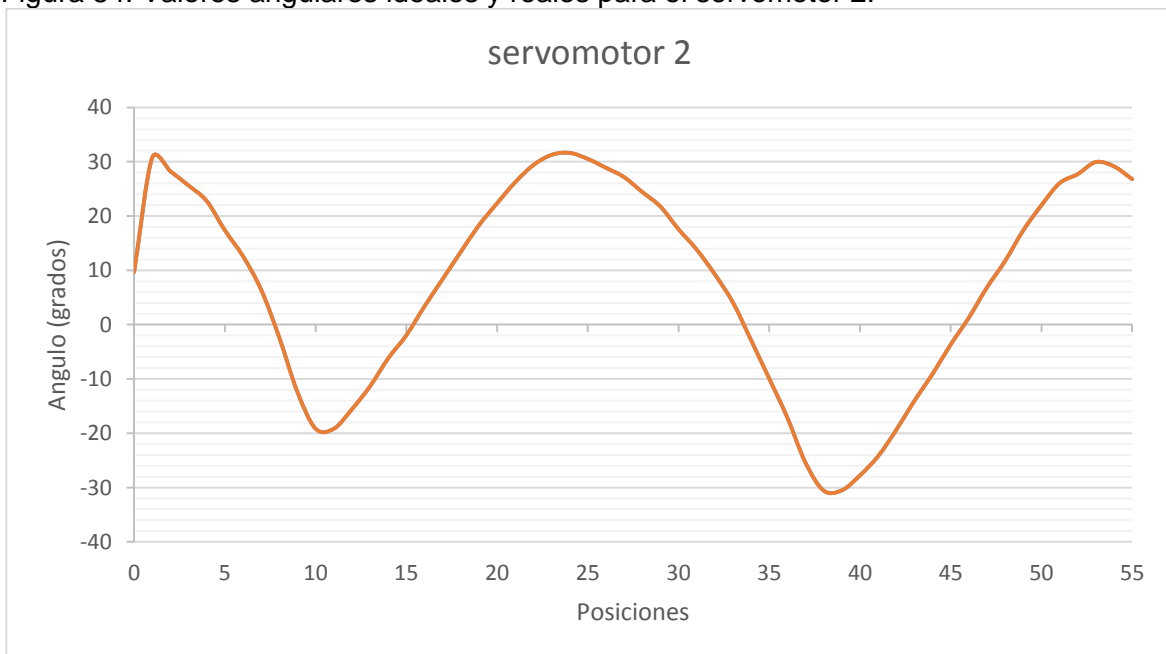
6.1.2.1 Comparación de los ángulos en los brazos esperados con los obtenidos en SolidWorks. Con los ángulos obtenidos para cada uno de los servomotores en el apartado anterior, se procede a ingresarlos uno a uno en el panel de control del manipulador y medir mediante la herramienta "cota inteligente" el ángulo en SolidWorks obtenido para cada medición y realizar el gráfico correspondiente con estos valores para cada dato, los cuales se muestran en las figuras 83 a 85.

Figura 83. Valores angulares ideales y reales para el servomotor 1.



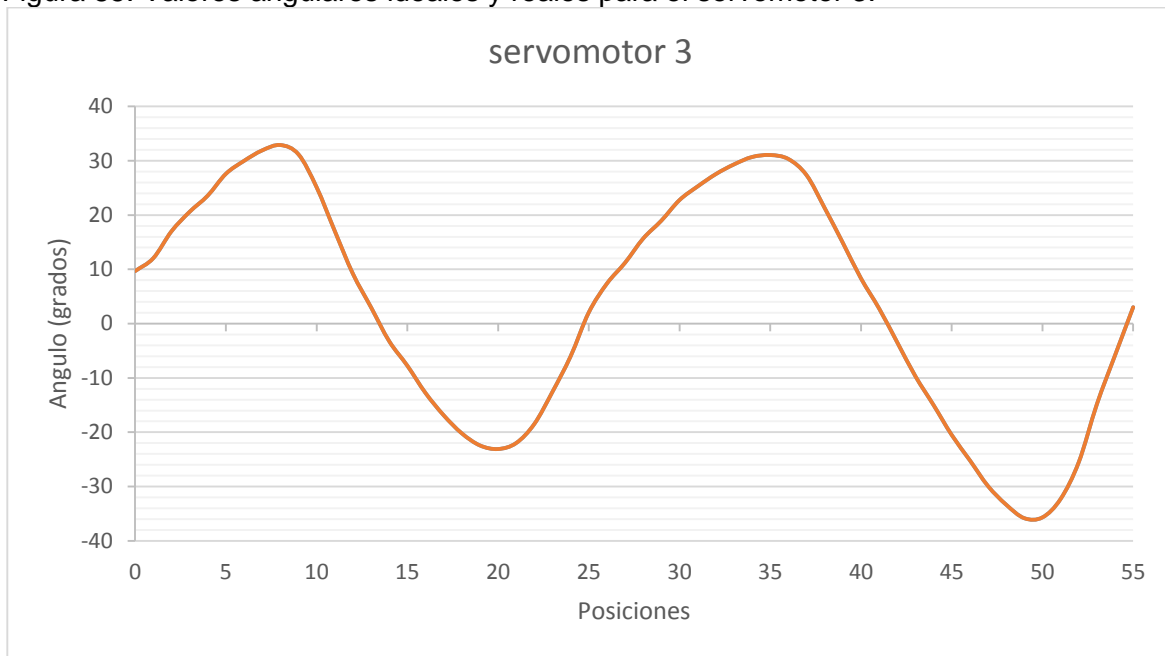
Fuente: Excel.

Figura 84. Valores angulares ideales y reales para el servomotor 2.



Fuente: Excel.

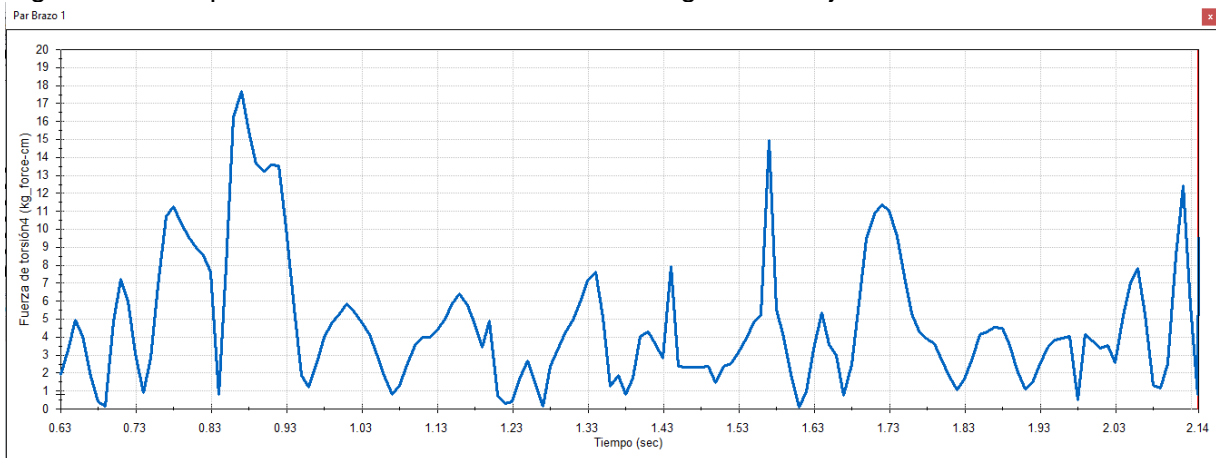
Figura 85. Valores angulares ideales y reales para el servomotor 3.



Fuente: Excel.

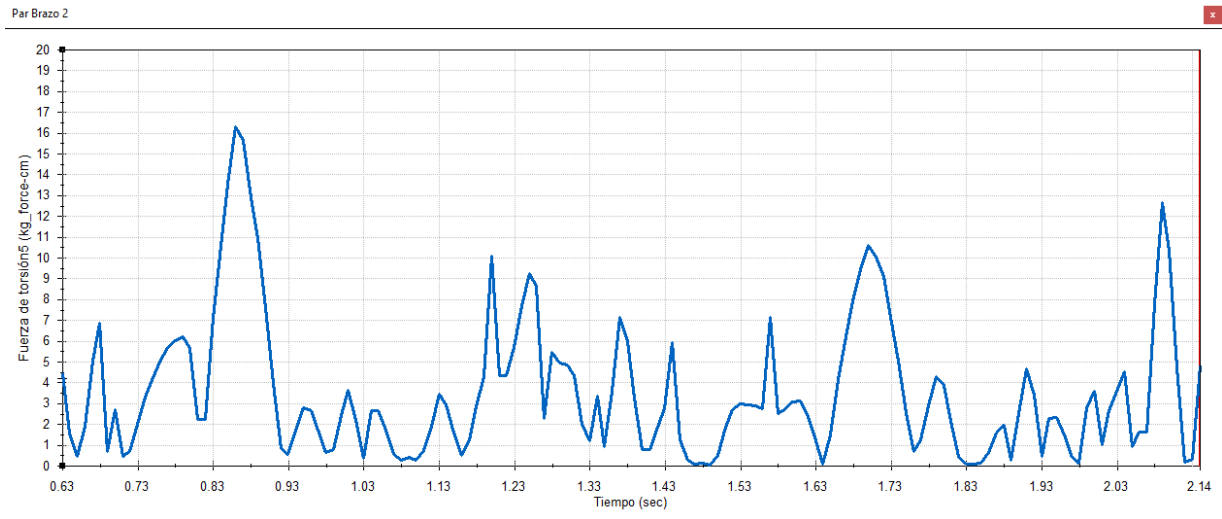
6.1.2.2 Par torsor obtenido durante la trayectoria sin carga de trabajo. De la misma manera, gracias a la opción “resultados” de SolidWorks se obtienen los gráficos del par torsor vs tiempo de cada uno de los servomotores del prototipo virtual que se pueden apreciar en las figuras 86 a 88.

Figura 86. Par que consume el servomotor 1 sin carga de trabajo.



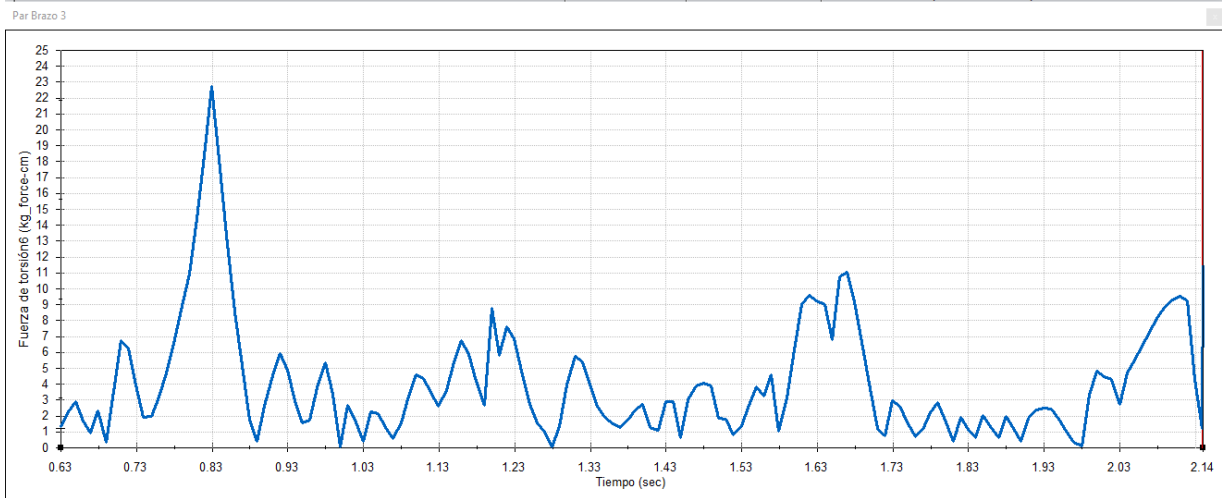
Fuente: SolidWorks.

Figura 87. Par que consume el servomotor 2 sin carga de trabajo.



Fuente: SolidWorks.

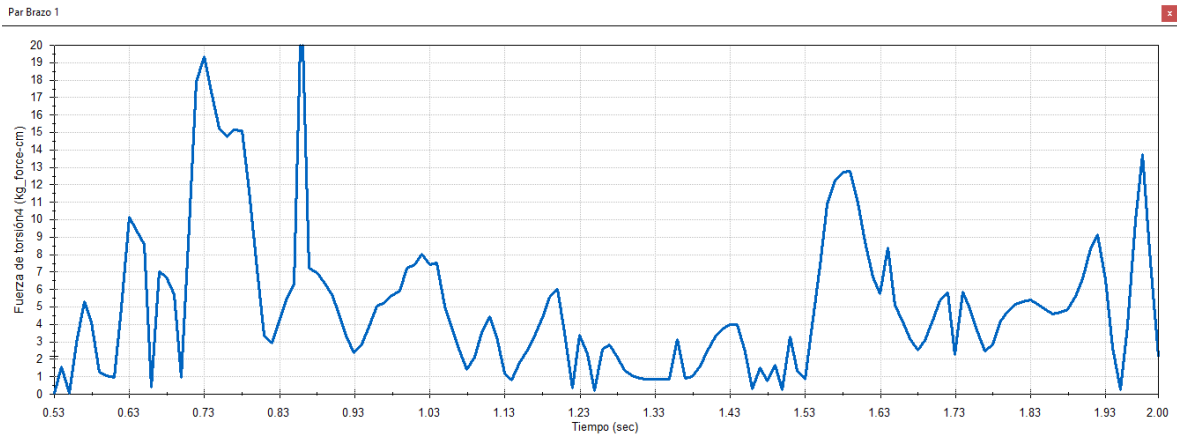
Figura 88. Par que consume el servomotor 3 sin carga de trabajo.



Fuente: SolidWorks.

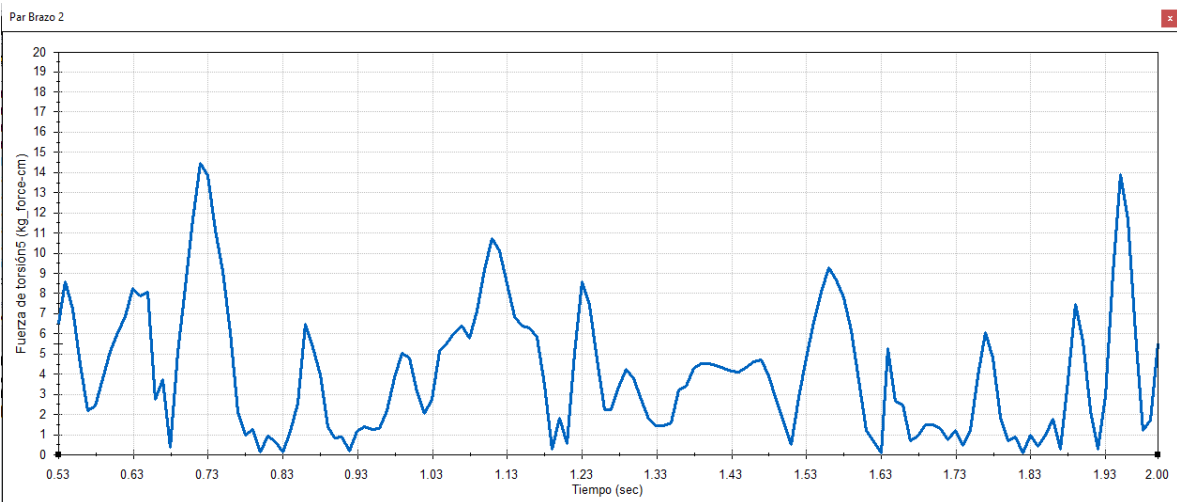
6.1.2.3 Par torsor obtenido durante la trayectoria con carga de trabajo. Al igual que en el proyecto de la referencia [2], se añade una carga de 1,8 N en el centro de la plataforma móvil del manipulador virtual y se realiza el recorrido nuevamente, obteniéndose los gráficos que se muestran en las figuras 89 a 91.

Figura 89. Par que consume el servomotor 1 con carga de trabajo.



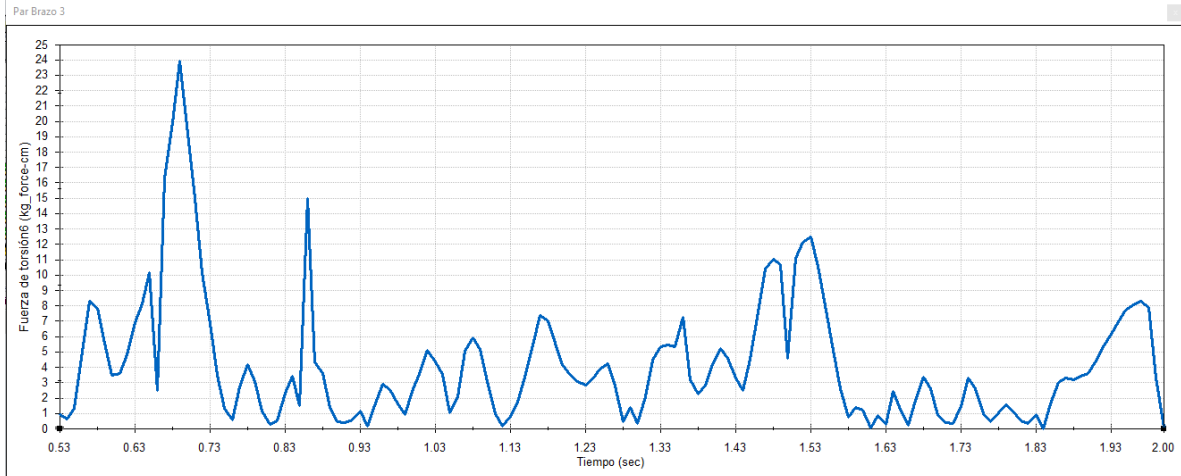
Fuente: SolidWorks.

Figura 90. Par que consume el servomotor 2 con carga de trabajo.



Fuente: SolidWorks.

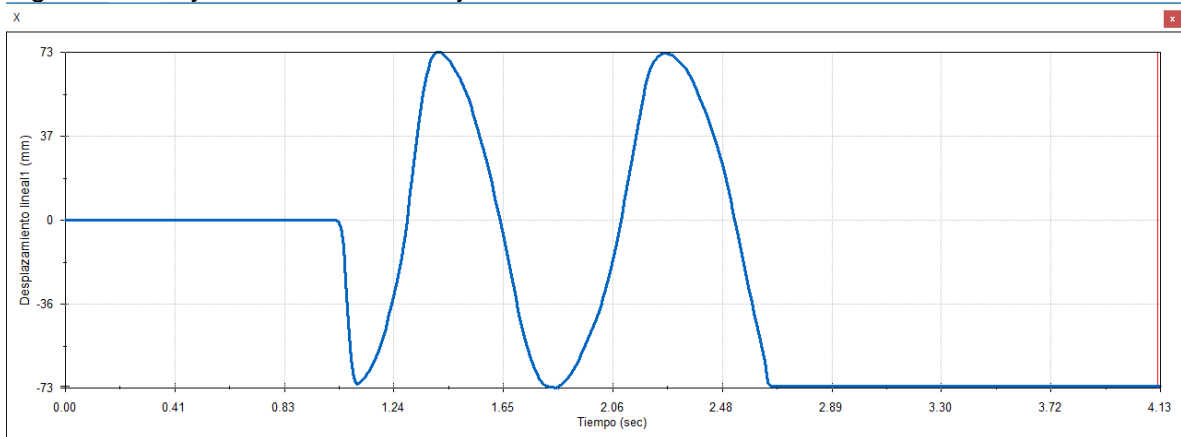
Figura 91. Par que consume el servomotor 3 con carga de trabajo.



Fuente: SolidWorks.

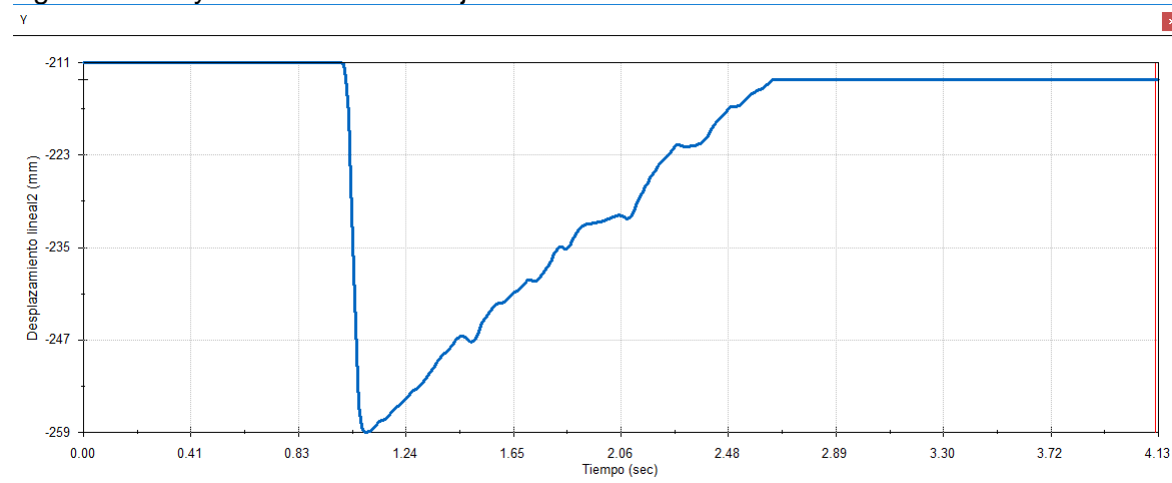
6.1.2.4 Posición en X, Y, Z del elemento terminal durante el recorrido. Finalmente se añaden tres gráficos más que aparecen en las figuras 92 a 94, en los que se muestra el desplazamiento del punto P (x, y, z) a lo largo del trayecto.

Figura 92. Trayectoria de P en el eje X.



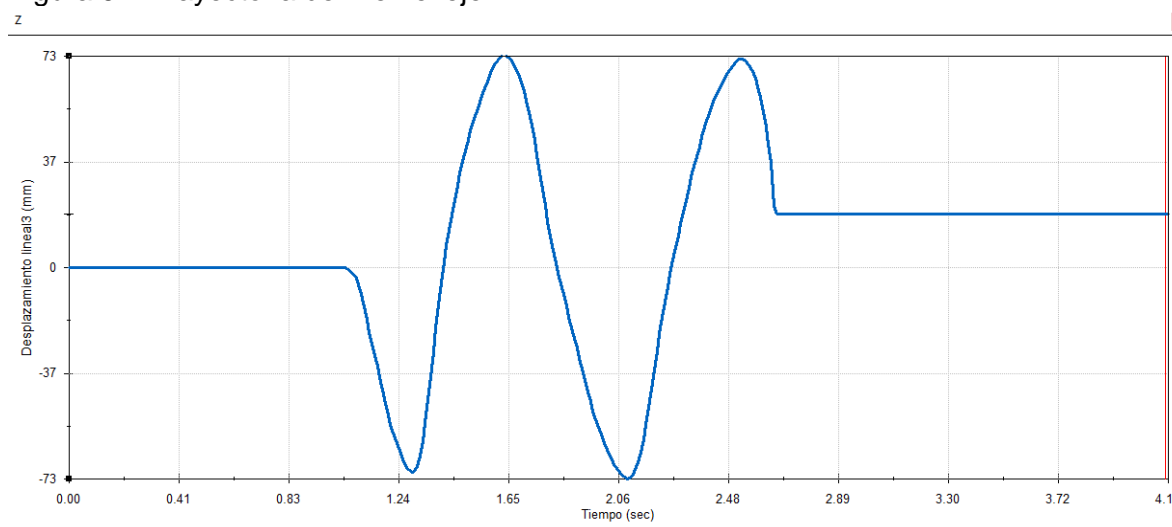
Fuente: SolidWorks.

Figura 93. Trayectoria de P en el eje Y.



Fuente: SolidWorks.

Figura 94. Trayectoria de P en el eje Z.



Fuente: SolidWorks.

6.2 Análisis de resultados

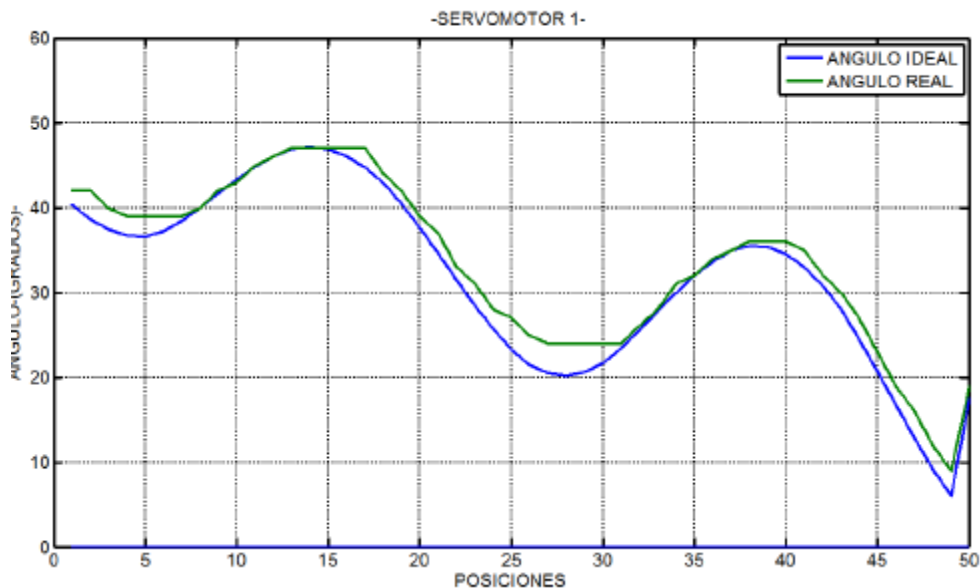
En el ítem 6.1.1 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de posición realizadas al prototipo virtual. En ellos se puede comprobar que los ángulos obtenidos para determinar la posición deseada corresponden con los del manipulador físico que se encuentran en el proyecto de grado de la referencia [2]. También se puede confirmar que la posición final de la base móvil corresponde con la deseada del punto P (x , y , z) como se observa en las figuras 78 a 80; por otra parte, se identifican desviaciones de la coordenada respecto a la deseada en 0,05 mm. Sin embargo, este valor corresponde a un error de Solidworks al medir la

coordenada respecto a un origen creado por el usuario, si se mide la coordenada respecto al origen por defecto de SolidWorks no aparece la desviación.

En las gráficas de las figuras 83 a 85 se puede observar solo una curva de datos; esto se debe a que el ángulo ideal y el ángulo real son el mismo para el prototipo virtual tanto en LabVIEW como en SolidWorks, ya que no existen imperfecciones geométricas en el modelo CAD construido y al no haber un movimiento continuo como en la trayectoria, el sistema no aproxima al punto; por lo tanto, LabVIEW llevará los brazos del manipulador a los valores angulares deseados, siempre y cuando la geometría lo permita.

Tomando como referencia la figura 95 [2], se nota la diferencia entre los resultados, ya que las dimensiones de los componentes del manipulador físico se ven afectadas por el proceso de manufactura, la fricción entre sus componentes varía y, por lo tanto, las inercias que se manejan también son diferentes al prototipo virtual. Todos estos factores impiden que los servomotores alcancen exactamente el ángulo requerido.

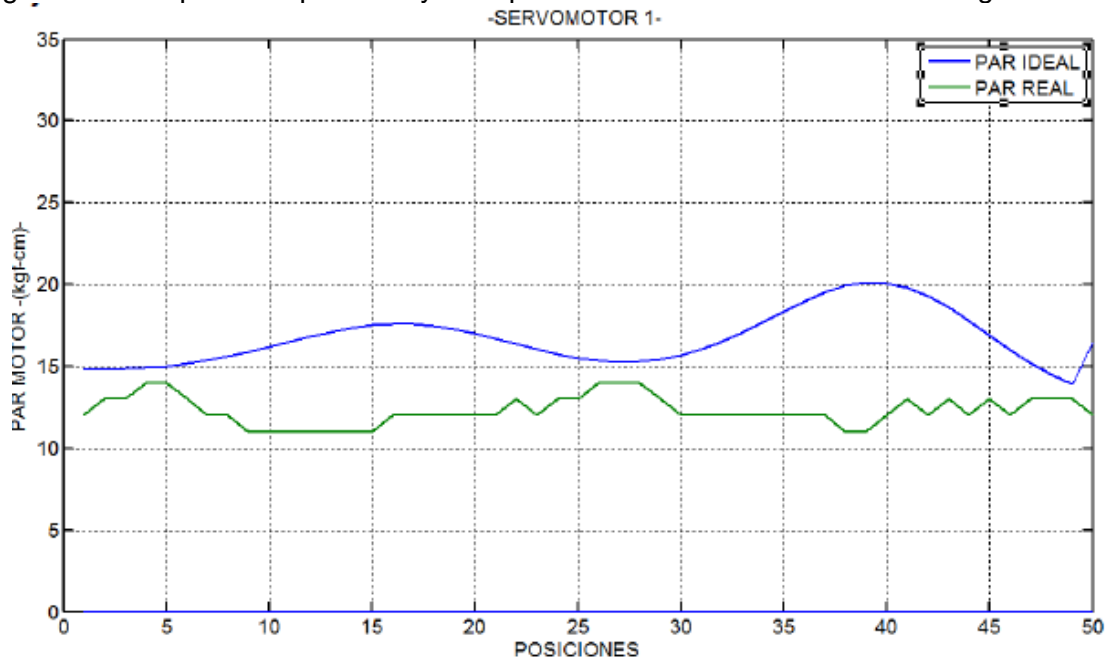
Figura 95. Valores angulares ideales y reales para el servomotor 1 sin carga de trabajo.



Fuente: Referencia [2].

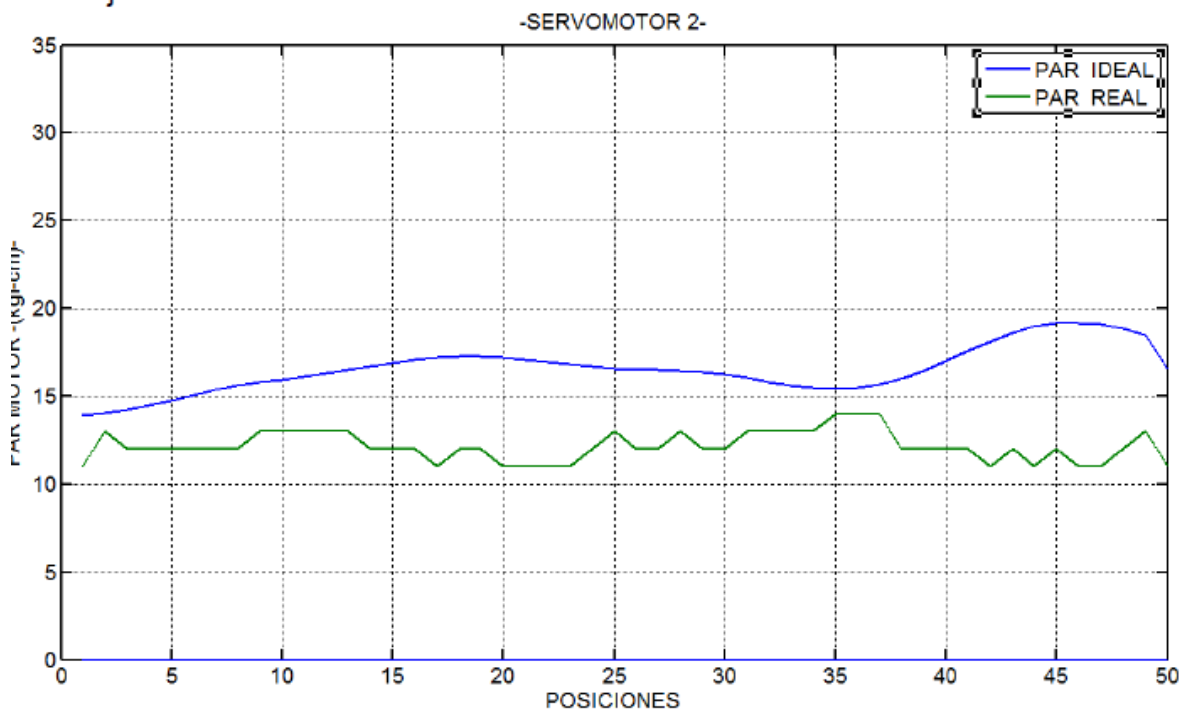
En las figuras 96 a 98 se muestran los resultados obtenidos al medir el par sin carga de trabajo del manipulador real DELTA 720.

Figura 96. Comparación par ideal y real que consume el servomotor 1 sin carga de trabajo.



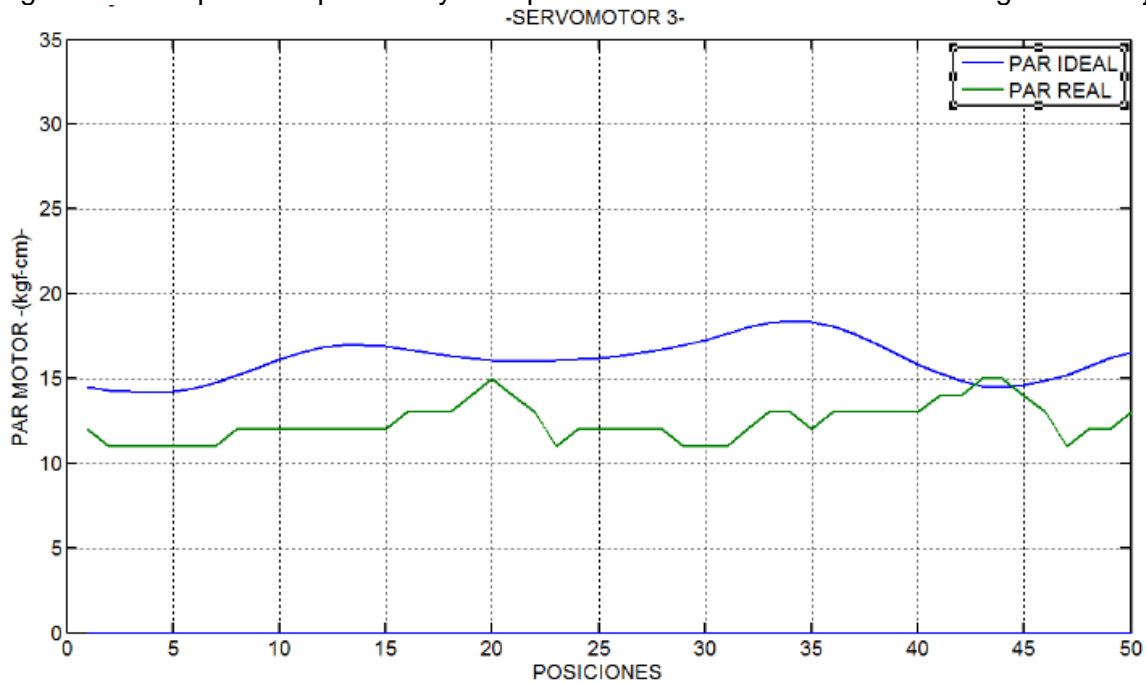
Fuente: Referencia [2].

Figura 97. Comparación par ideal y real que consume el servomotor 2 sin carga de trabajo.



Fuente: Referencia [2].

Figura 98. Comparación par ideal y real que consume el servomotor 3 sin carga de trabajo.

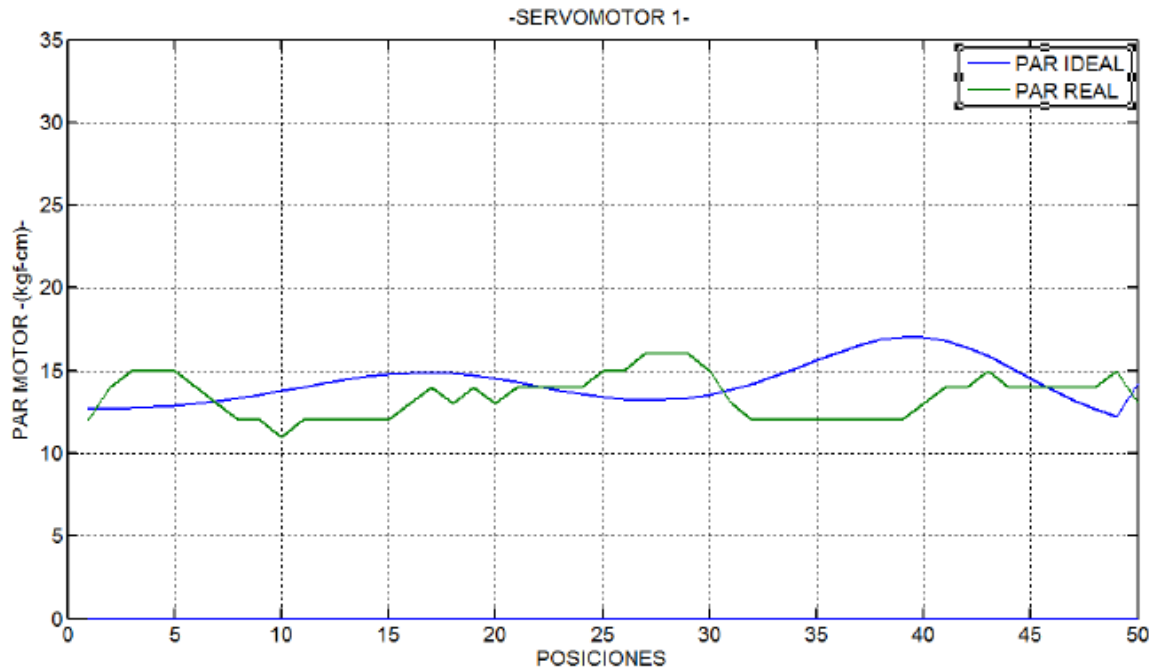


Fuente: Referencia [2].

Se puede notar al comparar los gráficos de las figuras 86 a 88 con los de las figuras 96 a 98 que el par motor obtenido por el manipulador virtual es menor que el obtenido por el manipulador físico. Además, se observa que el comportamiento de la curva presentado por el manipulador virtual presenta una serie de picos en periodos cortos de tiempo y en ningún momento aparece el par motor constante como se ilustra en las figuras 96 a 98.

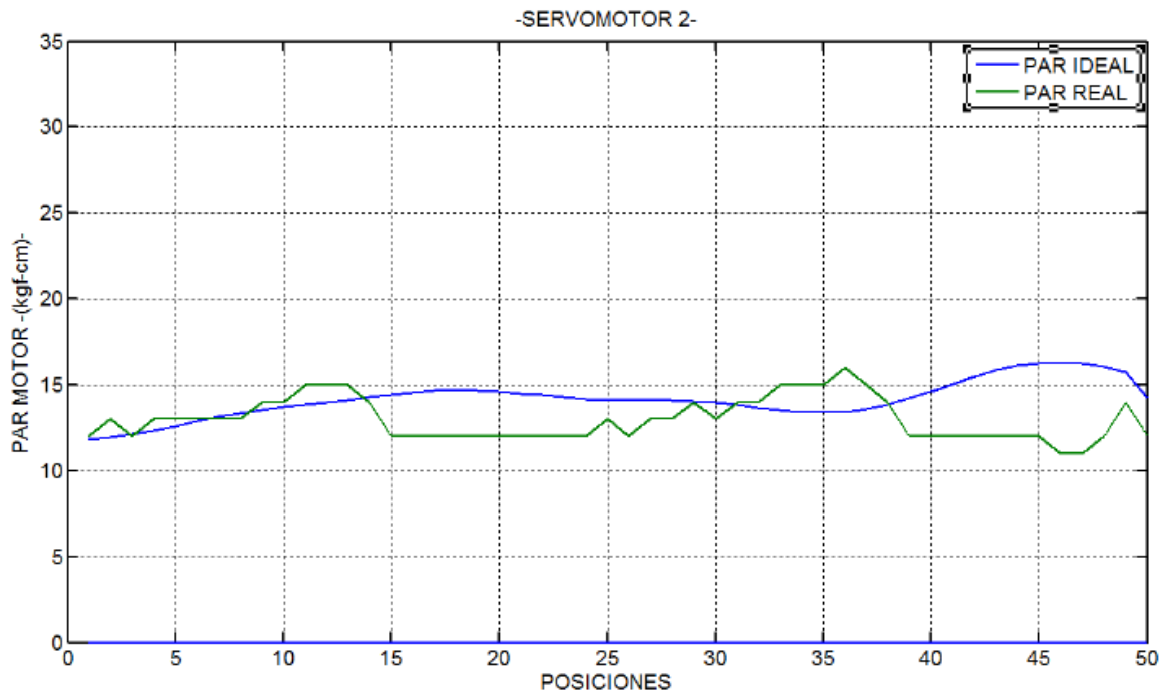
Para finalizar con los pares torsores, en las figuras 99 a 101 aparecen los pares motores de los servomotores del manipulador real sometido a una carga de 1,8 N.

Figura 99. Comparación par ideal y real que consume el servomotor 1 con carga de trabajo.



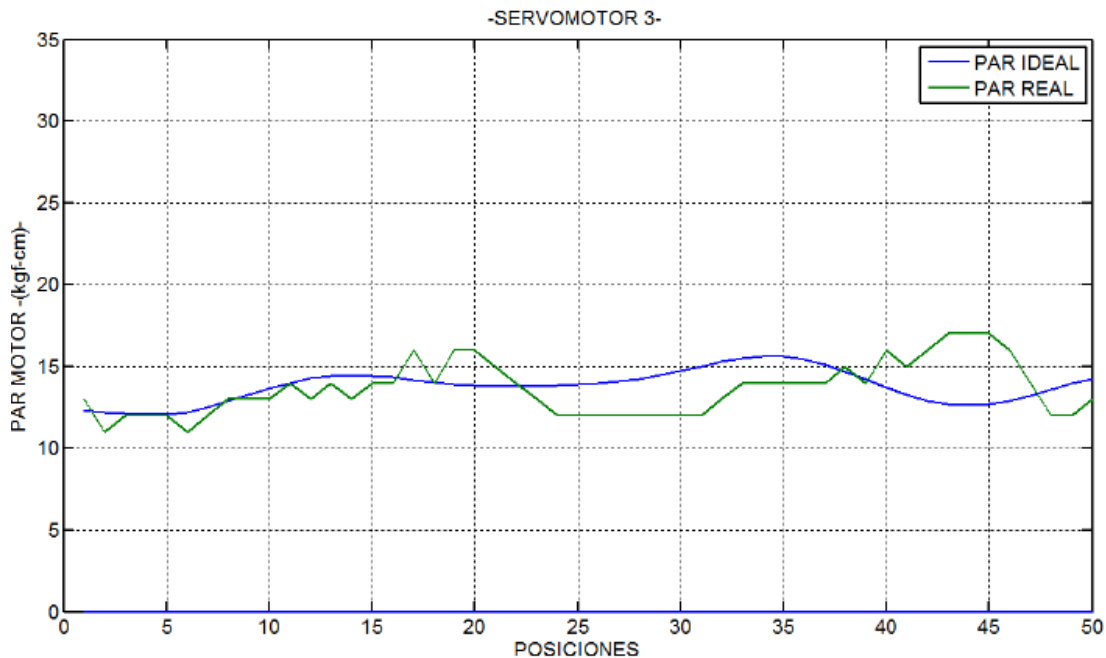
Fuente: Referencia [2].

Figura 100. Comparación par ideal y real que consume el servomotor 2 con carga de trabajo.



Fuente: Referencia [2].

Figura 101. Comparación par ideal y real que consume el servomotor 3 con carga de trabajo.



Fuente: Referencia [2].

Realizando una comparación entre los gráficos de las figuras 96 a 98 y 99 a 101 se puede observar que la demanda de par del motor aumenta debido a la carga de trabajo añadida, el mismo comportamiento se puede observar con el par del manipulador virtual observando las figuras 86 a 88 y 89 a 91 en donde al agregar la carga de 1,8 N aumenta un poco el par motor necesario para realizar la trayectoria durante la mayor parte del recorrido. Por lo cual se obtiene el comportamiento esperado del manipulador frente a estímulos externos como son las fuerzas.

En las figuras 92 a 94 se muestra el recorrido realizado por el elemento terminal a través del tiempo durante el trayecto; el comportamiento de la trayectoria en X y Z es el esperado, ya que es una trayectoria en forma de espiral. Sin embargo, el comportamiento del eje Y presenta caídas en la distancia, lo cual no debería pasar debido a que el elemento terminal siempre está subiendo a lo largo del recorrido.

La función de trayectoria de LabVIEW SoftMotion extrapola los puntos de la tabla y envía esta información a SolidWorks para ejecutar el movimiento. Entre menor sea la cantidad de puntos, mayor será el error al aproximarlos y, como consecuencia, se presentan las caídas en la distancia en Y que se ilustra en la figura 94 y no se alcanzan exactamente los ángulos deseados a diferencia de la función de línea.

CAPITULO 7

CONCLUSIONES, APORTES Y SUGERENCIAS

CONCLUSIONES

1. Se integraron exitosamente los programas SolidWorks y LabVIEW mediante el módulo de LabVIEW SoftMotion para la construcción del prototipo virtual de un manipulador paralelo tipo DELTA 720 de tres grados de libertad basado en el diseño del manipulador que se encuentra en la Universidad Tecnológica de Pereira.
2. Se obtuvo una metodología adecuada para que tanto estudiantes, profesores o terceros tengan la capacidad de crear y controlar un prototipo virtual con la ayuda de SolidWorks y LabVIEW.
3. El sistema de control creado en LabVIEW emplea la cinemática inversa del manipulador para asignar los ángulos a los respectivos motores que se encuentran en cada brazo.
4. La geometría general del prototipo virtual obtenido es proporcional a la del manipulador físico, respetando las dimensiones básicas de los elementos del manipulador para replicar el movimiento. Algunos elementos pueden diferir en tamaño con respecto al modelo real debido a que la forma del instrumento de medida empleado (calibrador) dificulta la toma de datos en el manipulador ensamblado.
5. Las pruebas de posición realizadas al prototipo virtual concuerdan con los resultados de las pruebas realizadas en el manipulador físico, donde se pueden corroborar nuevamente las ecuaciones de cinemática inversa.
6. La función de trayectoria de NI SoftMotion permite realizar recorridos complejos como el de hélice empleado en las pruebas y, solo con cambiar los puntos de la tabla, se puede seguir cualquier clase de trayectoria que el espacio de trabajo permita.
7. A diferencia del manipulador físico, el prototipo virtual siempre alcanza el ángulo esperado incluso con una precisión de 0,0001 mm; por el contrario, cuando se utilizan funciones como circular o de trayectoria, SoftMotion extrapola los puntos de las tablas aproximando los ángulos deseados para general la trayectoria requerida. En este aspecto el manipulador virtual tiende a comportarse de manera similar al modelo físico.

8. El comportamiento del par torsor frente a la carga de trabajo del prototipo virtual es proporcional al del modelo físico, presentando incremento en el par torsor debido a la acción de la carga.

APORTES

1. Se construyó un modelo virtual de un manipulador paralelo tipo DELTA 720 de tres grados de libertad que permite realizar estudios sobre este tipo de elementos sin recurrir al modelo físico.
2. Se diseñó un sub VI encargado de resolver la cinemática inversa del manipulador, introduciendo los ángulos necesarios para el movimiento de los brazos en SolidWorks.
3. Se creó un instrumento virtual que permite controlar el movimiento del manipulador diseñado; además, si se cambia el sub VI encargado de resolver la cinemática inversa, es posible controlar otras clases de manipulador con el mismo VI.
4. Se dejan los planos del manipulador virtual para posteriores estudios que requieran la construcción de un segundo prototipo físico, debido a que no se disponen de los planos originales del manipulador DELTA 720 de la Universidad Tecnológica de Pereira.
5. Se presenta la metodología adecuada para integrar exitosamente SolidWorks y LabVIEW para controlar el movimiento de prototipos virtuales.
6. Se realizó una ponencia sobre el proyecto en el tercer congreso internacional sobre tecnologías avanzadas de mecatrónica, diseño y manufactura (AMDM).

SUGERENCIAS

De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo de grado, se propone el estudio más profundo en temas relacionados con el prototipado virtual como una opción económica y efectiva de presentar proyectos de grado cuyos fondos no permitan la construcción del modelo real del producto deseado.

1. Estudiar el efecto de las fuerzas que se producen en el manipulador debido a su movimiento, de tal manera que se puedan probar diversos materiales para optimizar el diseño del manipulador variando el tamaño y material de sus componentes reduciendo costos sin perder eficiencia.

2. Agregar uno grado más de libertad al manipulador en su base móvil creando un diseño específico para uso industrial o en la medicina.
3. Realizar diversos estudios identificando las necesidades que hay en el sector productivo que puedan ser solucionadas utilizando los manipuladores.
4. Crear prototipos virtuales de toda clase empleando SolidWorks y LabVIEW como base para manipular de manera controlada su movimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J.P, merlet. Pararel Robots. Second Edition. Springer, 2006
- [2] Herrera, Marlon Jhair. PEÑA, Darly Babeth. Aporte al Estudio de Manipuladores Paralelos: Construcción y Pruebas de un Módulo Didáctico de Manipuladores Tipo Delta. Pereira, 2013, 98 h. Trabajo de Grado (Maestría en Sistemas Automáticos de Producción). Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería Mecánica. Departamento de Diseño.
- [3] Luna, Cauhtémoc Vladimir. Diseño e Implementación de un Prototipo Virtual de una Mesa de Coordenadas. Ciudad de México. Tesis profesional (Ingeniero Mecatrónico). Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. 2014.
- [4] Definition of a manipulating industrial robot. International Organization for Standarization. 1996, ISO 8373
- [5] Torres Charry, Giovanny. (2001) Que es y para qué sirve el prototipado virtual [En línea]. <<http://www.utp.edu.co/~gtorres/VARDOCS/Virtual%20prot.pdf>>
- [6] Dassault Systèmes. Introducción a SolidWorks, Capitulo 1. Aron S.A.S. Colombia.
- [7] Mendoza, Giovanni. Pulido, Julio Amadeus. integración de LabVIEW, SolidWorks
- [8] Reyes, Lucelly. Introducción a los Instrumentos Virtuales. [En línea] <http://fisica.udea.edu.co/~labgicm/Curso%20de%20Instrumentacion/2011_%20programacion%20basica%20LabVIEW.pdf>
- [9] López, Carlos H. Diseño de Control Para Troqueladora de Lámina de Matriz Posicionada por Medio de Servomotores. Guatemala, 2011, 398 h. Trabajo de Grado (Ingeniero Electrónico). Universidad San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
- [10] Error connecting LabVIEW with SolidWorks [En línea]. <<http://forums.ni.com/t5/LabVIEW/error-connecting-Labview-with-Solidworks/td-p/1148903>>
- [11] Dassault Systèmes. Training SolidWorks Motion 2012. Aron S.A.S. Colombia.
- [12] Escuela Superior de Ingeniería de Gijon. Ayuda SolidWorks Motion [En línea]<<http://www.unioviado.es/DCIF/IMecanica/Motion/ayuda.pdf>>

- [13] Problem with Contour Move in SoftMotion [En línea]. <http://forums.ni.com/t5/LabVIEW/Problem-with-Contour-Move-in-Softmotion/td-p/2694645>
- [14] Aracil R. Saltaren R. J. Sabater J. M. Reinoso O. Robots paralelos: Máquinas con un pasado para una robótica del futuro. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial. Vol. 3. Núm. 1, 2006.
- [15] R. Clavel. "Conception d' un robot parallel rapide á 4 degrés de liberté. Lausanne", Thèse de doctorat. Departament de microtecnica, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne. 1991.
- [16] L. Rey and R. Clavel. "The delta parallel robot. in Parallel Kinematic Machines and Theoretical Aspects and industrial requirements" En: Advanced Manufacturing. C. R Boer, L. Molinari y K. S. Smith, Eds. Springer-Verlag, pp. 401-417, 1999.
- [17] Guía del estudiante para el aprendizaje del software SolidWorks [En línea]. <https://www.solidworks.com/sw/docs/Student_WB_2011_ESP.pdf>
- [18] SolidWorks para dibujo y diseño mecánico [En línea]. <<https://lisandroingmec.files.wordpress.com/2013/08/63932037-46117885-solid-works-para-dibujo-y-diseno-mecanico.pdf>>
- [19] Gomez G. Sergio. El gran libro de SolidWorks. Segunda edición. Marcombo.
- [20] Lajara V. José Rafael, Pelegrí S. José. LabVIEW: entorno gráfico de programación. Segunda edición. Marcombo. Mexico, 2011.
- [21] Thomas J. Bress. Effective LabVIEW programming. National Technology & Science, 2013.
- [22] Jovitha Jerome. Virtual Instrumentation using LabVIEW. Learning Private Limited. New Delhi, 2010.
- [23] Kuang-Hua, Chang. Motion simulation and mechanism design with SolidWorks motion 2013. SDC publications, 2014.
- [24] Huei-Huang Lee. Engineering dynamics labs with SolidWorks Motion 2015. SDC publications, 2015.
- [25] Rix J., Haas S., Teixeira J. Virtual prototyping, Virtual environments and the Product design process. Chapman & Hall, 1994.
- [26] Bordegoni Monica, Rizzi Caterina. Innovation in Product Design: From CAD to Virtual Prototyping. Springer, 2011.

- [27] Merlet, J-P. Pararel Robots. Kluwer academic publishers, 2000.
- [28] National Instruments. Getting Started with NI SoftMotion for SolidWorks [En línea]. < <http://www.ni.com/pdf/manuals/372876e.pdf>>
- [29] Travis, Jeffrey y KING, Jim. LabVIEW for everyone: graphical programming made easy and fun. 3a.ed. Estados Unidos: Pentice-Hall, 2007. 981 p.
- [30] McCleery, Bryan. Virtual prototyping training series. [seminario web]. Estados Unidos: National Instruments, Agosto 2009 [En línea]. <<http://www.ni.com/virtualprototyping/training.htm>>
- [31] Gómez S. El gran libro de SolidWorks. Primera edición, Marcombo Ediciones Técnicas, Barcelona,2008.
- [32] Rojas O., Rojas L., “Diseño asistido por computador”, Revista Diseño y Tecnología, 2006.

9. ANEXOS

ANEXO A: RECOMENDACIONES PARA UNA CORRECTA INSTALACIÓN

9.1 Recomendaciones para una correcta instalación

Para un buen funcionamiento de la integración de SolidWorks y LabVIEW es necesario tener presente que versiones de ambos programas se van a utilizar, su instalación y preparación de los módulos necesarios para que todo el conjunto se ejecute sin problemas.

9.1.1 Versiones del software. Durante la etapa de investigación de este proyecto se pudo identificar diversos problemas con respecto a la conexión entre SolidWorks y LabVIEW; la cual presentaba errores que impedían que se ejecutara la simulación. Por ende, se probaron diferentes combinaciones de versiones del software para dar con alguna que presentara la compatibilidad deseada para proceder con el proyecto.

Las combinaciones de versiones que presentaron errores fueron:

- LabVIEW 2013 y SolidWorks 2015.
- LabVIEW 2013 y SolidWorks 2014.
- LabVIEW 2012 y SolidWorks 2014.
- LabVIEW 2012 y SolidWorks 2012.

Como se puede observar, no todas las versiones de LabVIEW presentan compatibilidad inmediata con SolidWorks. al investigar en los foros en línea de la empresa NI Instruments no se pudo llegar a una solución a estos problemas de compatibilidad debido a que a algunos usuarios le funcionaba a la primera y otros presentaban los problemas que se presentaron al probar las combinaciones anteriores, [10].

Las versiones de LabVIEW y SolidWorks que presentaron la compatibilidad deseada fueron Ni LabVIEW 2009 y SolidWorks 2012 o SolidWorks 2014. Por lo tanto, se utilizarán LabVIEW 2009 y SolidWorks 2014 para desarrollar el proyecto.

9.1.2 Recomendaciones de instalación y configuración de SolidWorks. En la pantalla de selección de productos se debe tener muy presente seleccionar los que se muestran en la figura 102, ya que sin estos no será posible ejecutar la simulación en SolidWorks.

Figura 102. Pantalla de selección de productos de SolidWorks 2014.

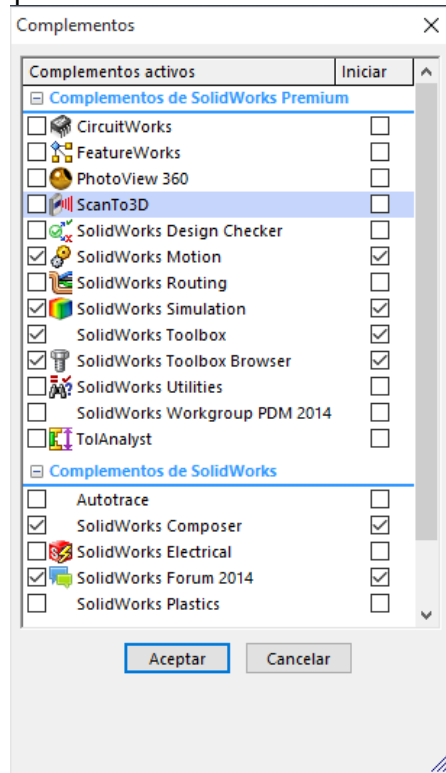


Fuente: NI LabVIEW.

Para configurar SolidWorks para que funcione correctamente durante la simulación se procede con lo siguiente:

- Se ejecuta SolidWorks.
- En el menú desplegable ubicado en la parte superior izquierda se selecciona la pestaña “Herramientas” y después en “Complementos”.
- Se abre una ventana (ver figura 103) donde se deben seleccionar tanto a la izquierda como a la derecha los complementos: SolidWorks Motion y SolidWorks Simulation; la casilla de la derecha se selecciona para evitar realizar este procedimiento cada vez que se ejecute el programa, ya que se activarán automáticamente cada vez que se ejecute SolidWorks.
- Finalmente se selecciona el botón “Aceptar” y el programa estará listo para proceder con las simulaciones.

Figura 103. Ventana de complementos de SolidWorks 2014.

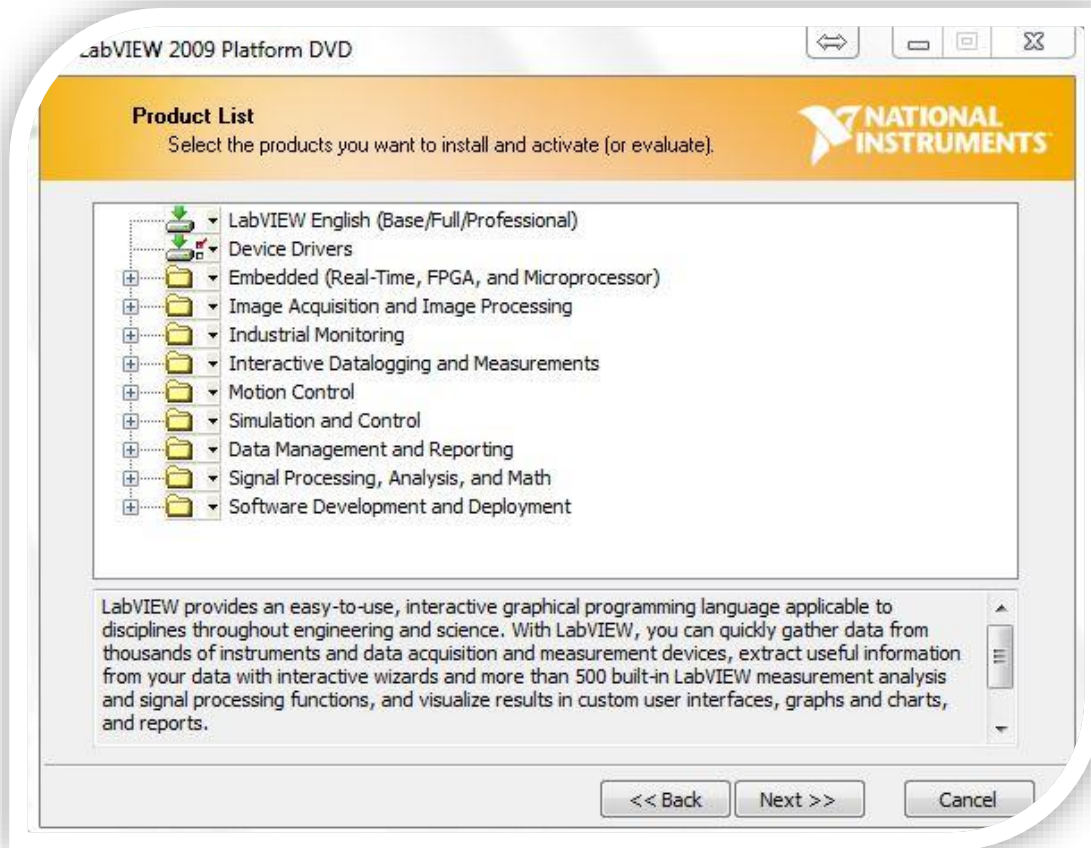


Fuente: SolidWorks.

9.1.3 Recomendaciones de instalación y configuración de NI LabVIEW. Al igual que con SolidWorks, LabVIEW también requiere de la instalación de toolkits o módulos para realizar la simulación; por tanto, se explicará cómo debe instalarse Ni LabVIEW y que módulos deben ser seleccionados.

En la pantalla de lista de productos, se presentan varios menús desplegables tal como se muestra en la figura 104.

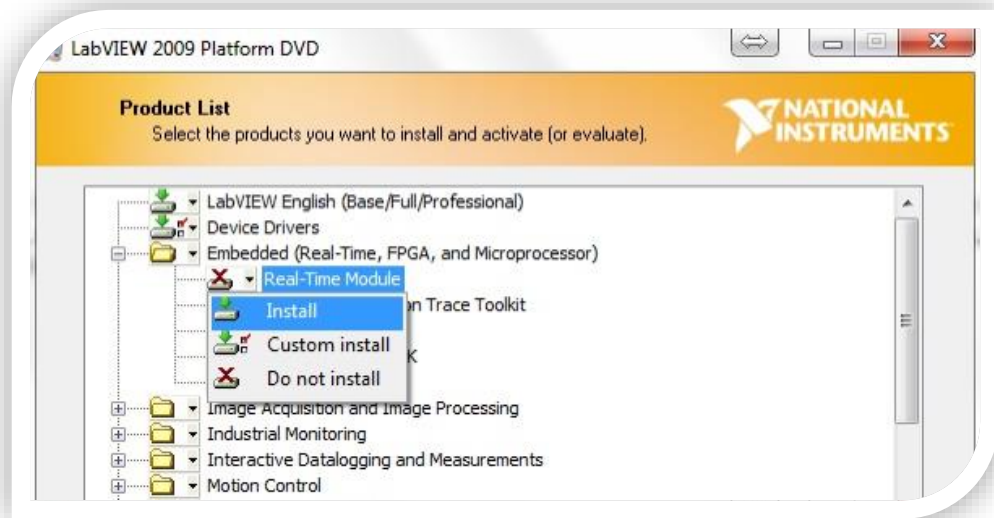
Figura 104. Ventana de lista de productos de LabVIEW 2009.



Fuente: NI LabVIEW.

En la casilla Embeddedd (Real-Time, FPGA, and Microprocessor) se despliega el menú y con haciendo click sobre la imagen del disco duro con una X se selecciona instalar a los módulos Real-Time Module y Real Time Execution Trace Toolkit, tal como se muestra en la figura 105.

Figura 105. Ventana de lista de productos de LabVIEW 2009: instalación de módulos.



Fuente: NI LabVIEW.

De la misma forma, se procede a desplegar el menú de la carpeta *Motion control* y se instalan los módulos *NI SoftMotion Module* y *NI Motion Assistant*; finalmente, se selecciona la carpeta *Simulation and Control* y se instala el Módulo *Control Design and Simulation*.

Los módulos mencionados anteriormente son los necesarios para establecer la conexión entre LabVIEW y SolidWorks. Si se desea instalar los demás Módulos no se presentará ningún problema.

Al realizar la activación del programa, se debe tener en cuenta de activar los módulos instalados y, además activar el toolkit NI SoftMotion for SolidWorks.

El procedimiento descrito es suficiente para establecer la integración entre SolidWorks y LabVIEW. La configuración dentro del programa se presentará más adelante.

ANEXO B: CONTRUCCIÓN DE LAS PIEZAS

9.2 Construcción de las piezas

Con las dimensiones del manipulador obtenidas mediante la toma de datos del manipulador físico, se procede a construir las piezas que lo conforman. El manipulador está compuesto básicamente por una placa móvil, una placa fija, tres antebrazos y tres brazos. Gracias a las ventajas que ofrece el diseño en CAD solo es necesario construir una vez la pieza que se repite.

9.2.1 Consejos para la correcta realización de una pieza. Antes de comenzar a realizar el croquis de la pieza se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Definir las unidades con las que se desea trabajar: metros, pulgadas, milímetros, entre otros.
- Seleccionar el plano en el cual se desea trabajar para tener una espacial de la pieza.
- Establecer el primer plano de acuerdo con la complejidad de la pieza que se va a fabricar, debido a que algunas piezas son más o menos difíciles de hacer según con el lado donde se comience.
- A la hora de comenzar a realizar el croquis se recomienda dibujar sobre el plano normal a la pantalla para evitar confusiones.
- Comenzar a dibujar el croquis en el origen.

9.2.2 Diseño de una pieza básica. Para comenzar a crear la pieza, en SolidWorks


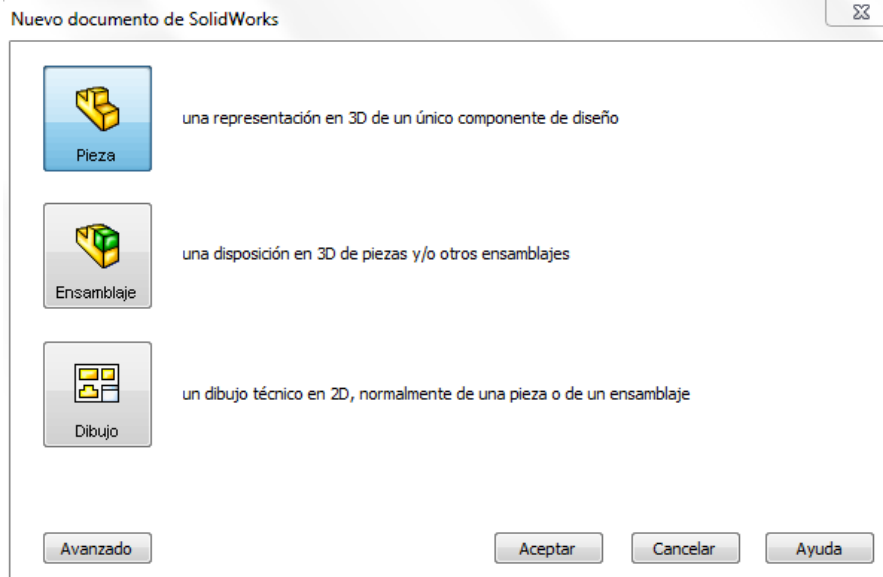
se selecciona el ícono de Nuevo  , se abrirá una ventana en la cual se selecciona el ícono de “Pieza”, tal como se muestra en la figura 106 y finalmente click en aceptar.

Figura 106. Ventana de selección de módulo de SolidWorks.



Fuente: SolidWorks.

Al presionar el botón aceptar, se abrirá la interfaz de SolidWorks que permite la creación de piezas como se muestra en la figura 107

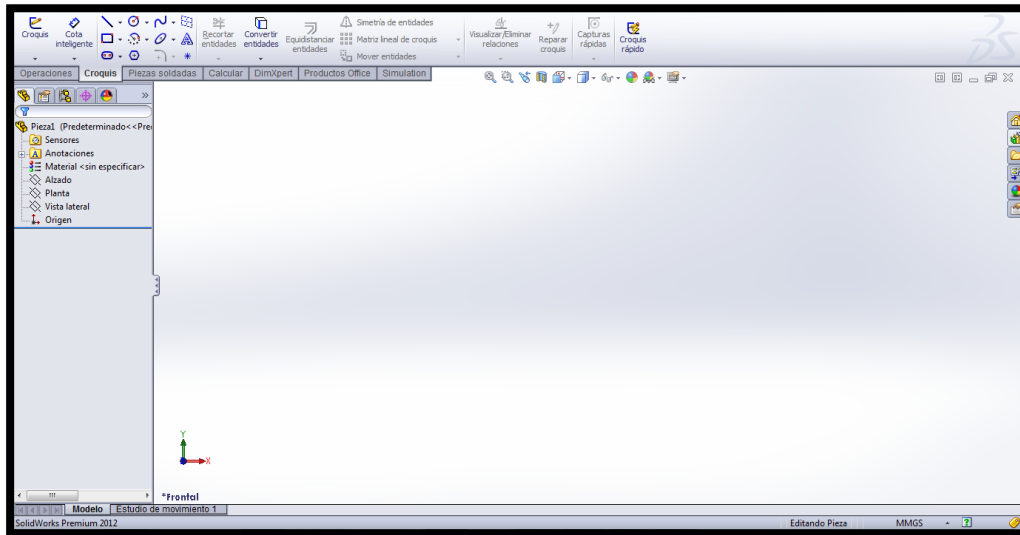
En la parte superior se encuentran los comandos para la construcción de la pieza; tales como croquis, cota inteligente, operaciones de extrucción y corte; además de herramientas especiales como el asistente para taladro o matriz, entre otros.

En la parte lateral izquierda se encuentra el Feature Management, el cual se encarga de mostrar las operaciones realizadas en la pieza, los errores, las configuraciones, la selección del material, entre otras características que cambian dependiendo del módulo en el que se esté trabajando.


En la zona lateral derecha se encuentran diversos íconos en donde se encuentran los tutoriales, las bibliotecas de diseño, explorador de archivos, entre otros.

En la parte inferior se pueden cambiar las unidades del documento en plena construcción si así se desea; finalmente, por debajo de la barra de comandos se encuentran íconos que facilitan adaptar la vista que se desea de la pieza; tales como: cortes de sección, vista frontal, lateral, superior, isométrica, entre otras; además, se puede cambiar el fondo sobre el que se trabaja y acceder a la vista normal al plano que se desea.

Figura 107. Ventana del módulo pieza de SolidWorks.

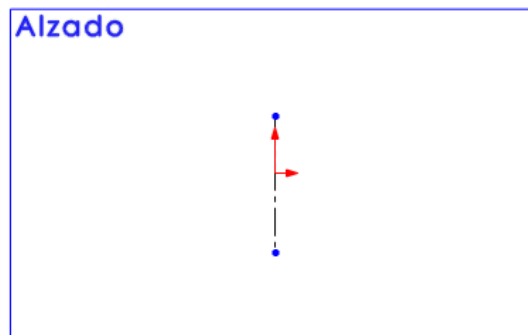


Fuente: SolidWorks.

En la interfaz de pieza, se selecciona el ícono de “croquis” ; el programa pedirá seleccionar el plano sobre el que se desea dibujar, en este caso se comenzará en el plano alzado.

Como la forma del brazo es simétrica, se realiza una línea de construcción vertical que servirá como referencia para realizar operaciones de simetría (ver figura 108).

Figura 108. Línea de construcción.



Fuente: SolidWorks.


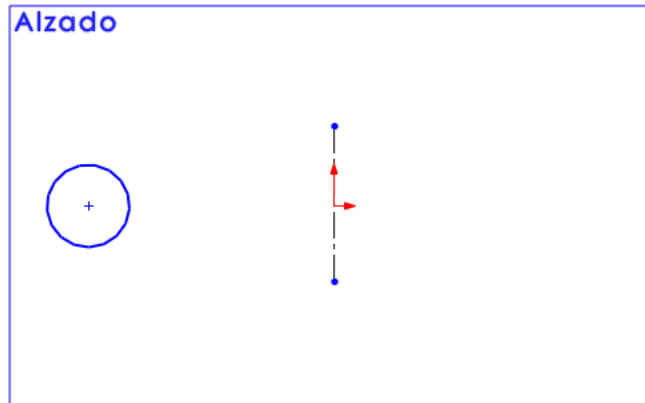
Con la herramienta “circulo” , se crea uno alejado de la línea, pero en posición horizontal con el origen en el eje x; tal como se muestra en la figura 109.

Figura 109. Creación de un círculo.



Fuente: SolidWorks.


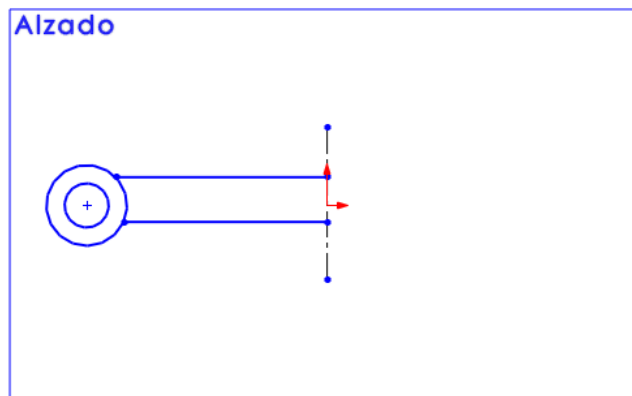
De la misma manera, se crea un círculo dentro del que se creó anteriormente y con la herramienta "línea" , se crean dos líneas coincidentes al círculo exterior y la línea de construcción, paralelas con el eje x (Figura 110)

Figura 110. Construcción del brazo.



Fuente: SolidWorks.


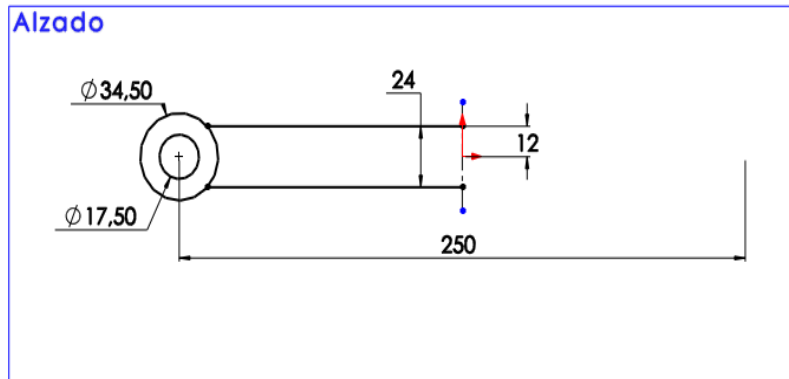
La cota inteligente  es una herramienta muy poderosa para definir las dimensiones del croquis de la pieza, con ella, se define el diámetro de ambos círculos, la distancia entre centros con los círculos que habrá en el lado derecho y la distancia entre las líneas; tal como se muestra en la figura 111.

Figura 111. Definición de las cotas iniciales.



Fuente: SolidWorks.

Como se puede observar en la figura 111, ahora las líneas del croquis pasaron de ser azules a negras, esto se debe a que cuando el croquis se encuentra totalmente definido; es decir, posee todas las medidas necesarias cambia a color negro.


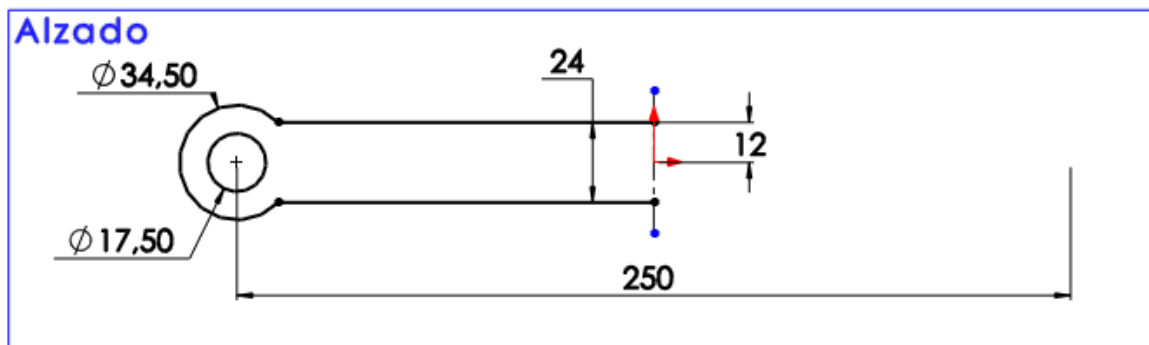
Con la herramienta “recortar”  se procede a retirar el excedente de croquis, el cual es la zona de círculo exterior que se encuentra entre las dos líneas, tal como se ve en la figura 112.

Figura 112. Empleo de la herramienta recortar.



Fuente: SolidWorks.


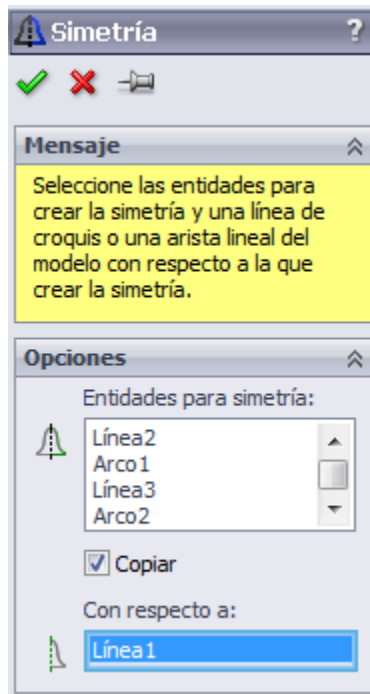
El siguiente paso es crear el lado derecho del brazo empleando la herramienta de simetría , la cual en su menú requiere que se ingrese el contorno que se desea copiar y el eje de referencia con el que se hará la simetría (figura 113).

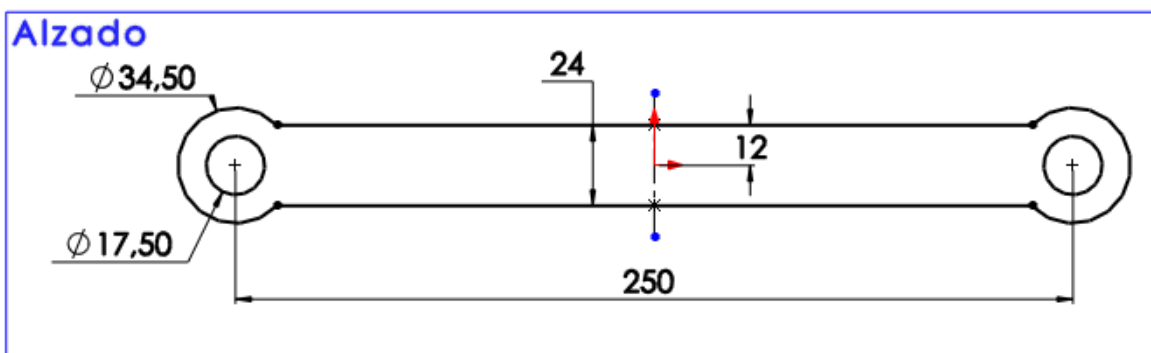
Figura 113. Menú de la herramienta simetría.




Fuente: SolidWorks.

Al presionar aceptar, se obtendrá un croquis completo del brazo, tal como se ve en la figura 114.

Figura 114. Croquis exterior del brazo completo.

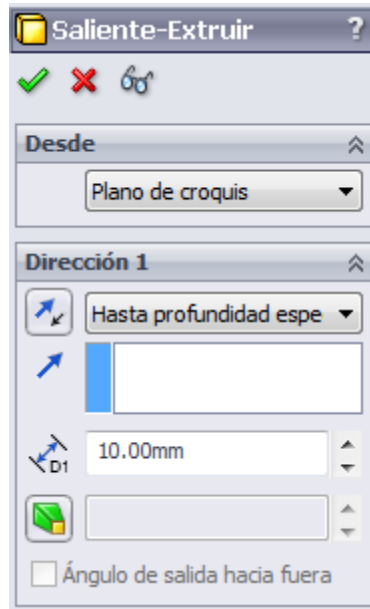


Fuente: SolidWorks.

Ahora para dar volumen a la pieza, se empleará la herramienta de “extruir saliente base”  que se encuentra en la pestaña de operaciones del menú de comandos.

Esta herramienta requiere que se defina el contorno que se desea extruir y el espesor (figura 115).

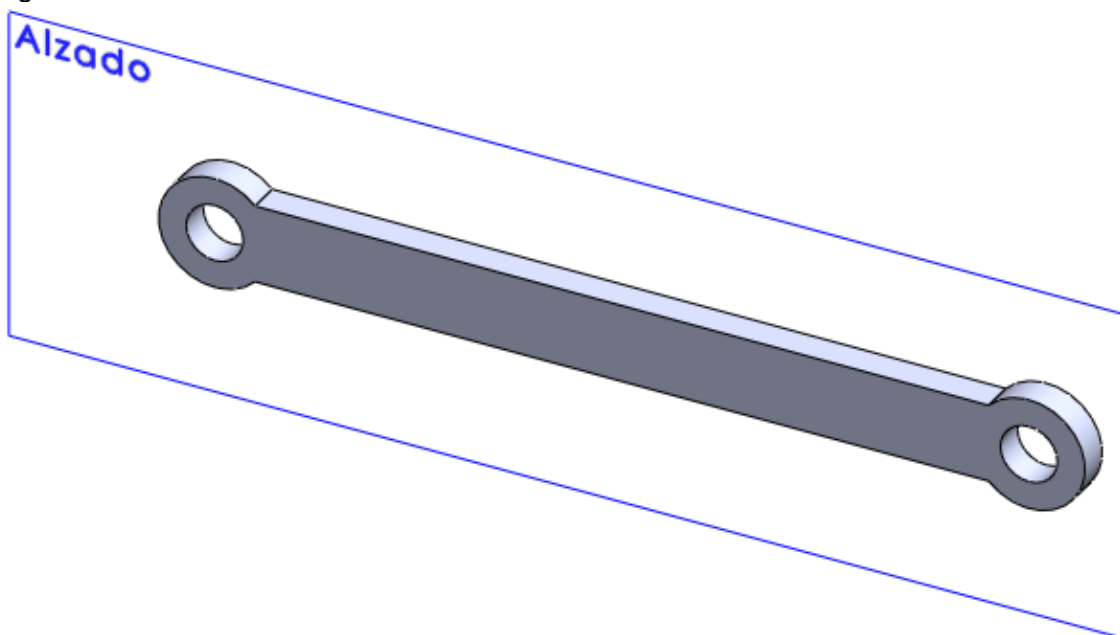
Figura 115. Función extruir.



Fuente: SolidWorks.

Al aceptar la extrucción, la pieza gana el volumen que se requiere para el brazo del manipulador (figura 116).

Figura 116. Brazo.



Fuente: SolidWorks.


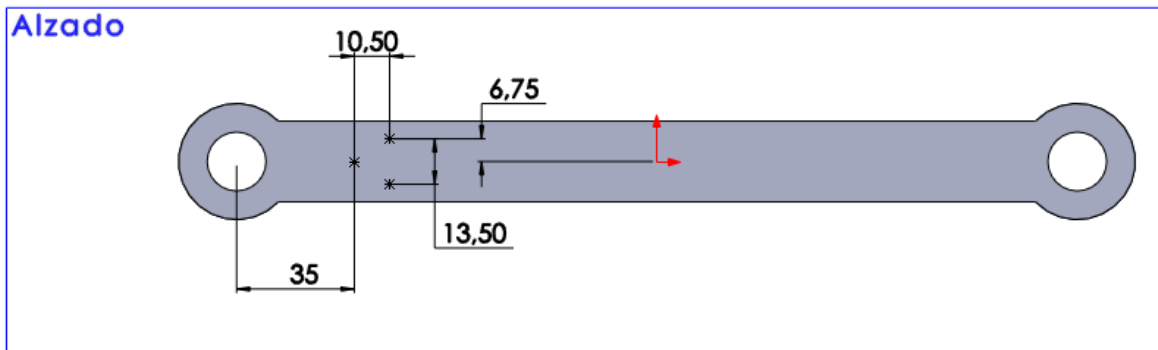

Los agujeros interiores del brazo se pudieron haber realizado empleando el croquis, pero para efectos ilustrativos se realizarán empleando una herramienta de SolidWorks denominada “Asistente para taladro”  que posee diversos métodos para realizar agujeros en una pieza. Antes de comenzar a emplear el asistente, se recomienda crear croquis de puntos sobre la pieza en donde se harán los agujeros, tal como se ve en la figura 117.

Figura 117. Croquis de los agujeros para el taladro.

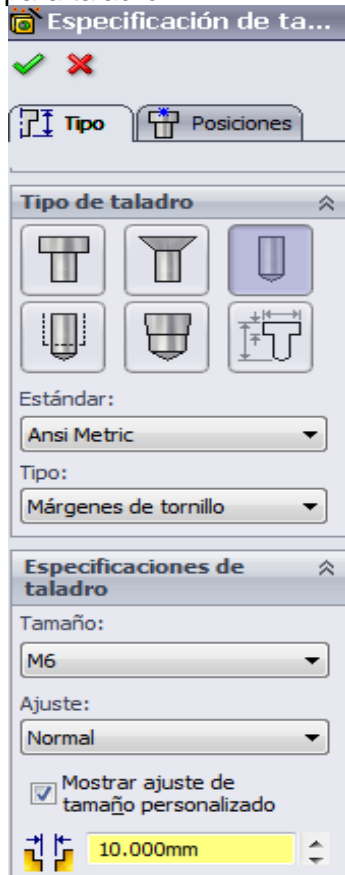


Fuente: SolidWorks.

Se puede observar que no se realizaron puntos por toda la pieza, en este caso es impráctico, ya que la pieza posee muchos agujeros; por ende, se empleará otra útil herramienta denominada “matriz lineal”  que permite realizar copias de una operación a lo largo de la pieza; pero antes se empleará el asistente para taladro para realizar los respectivos agujeros sobre la pieza.

Al iniciar el asistente para taladro, se observa un menú en el cual se debe seleccionar el tipo de taladro y las dimensiones del agujero que se realizará sobre la pieza (figura 118).

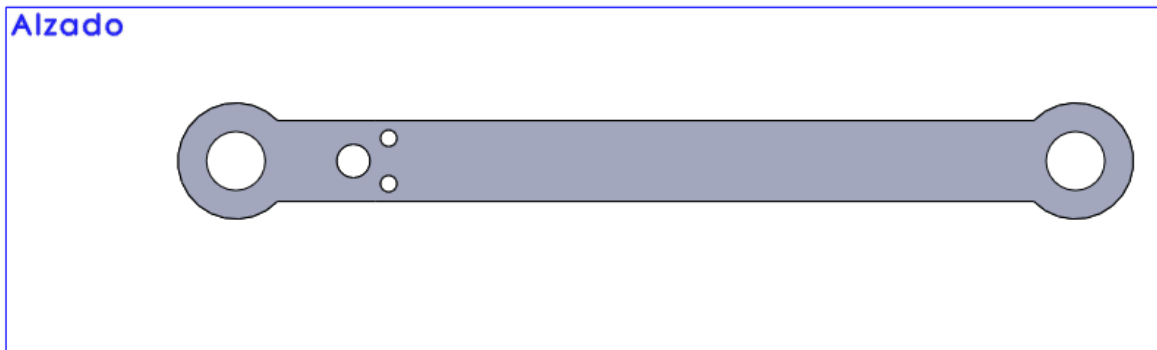
Figura 118. Menú del asistente para taladro.



Fuente: SolidWorks.

Después de haber definido las características del taladro, se pasa a la pestaña posiciones y allí seleccionar croquis 3D; se habilitará la opción de realizar agujeros solo con hacer click sobre la pieza, en este caso se hará click sobre el agujero de 10 mm y se repite el procedimiento anterior para los agujeros de 5mm tal como se ve en la figura 119.

Figura 119. Brazo con los agujeros.



Fuente: NI LabVIEW.

Para realizar los agujeros restantes, se utilizará la herramienta de matriz lineal. En el menú, matriz lineal de operación necesita datos sobre las operaciones que se desean copiar, la cantidad de operaciones, el espacio entre ellas y su dirección; estas características se pueden ver en la figura 120.

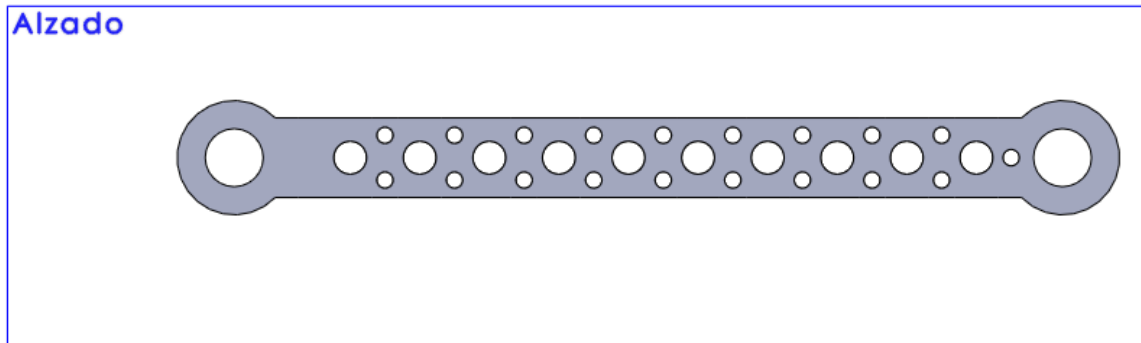
Figura 120. Menú de la herramienta matriz lineal.



Fuente: SolidWorks.


Se seleccionó solo el agujero de 10 mm debido a que la pieza no es simétrica y si se seleccionaban todos los agujeros la pieza no quedaría como se espera; por ende, se debe repetir el paso anterior para los otros agujeros, pero con 9 instancias para copiar. El producto casi terminado se muestra en la figura 121.

Figura 121. Brazo con los agujeros frontales.



Fuente: SolidWorks.

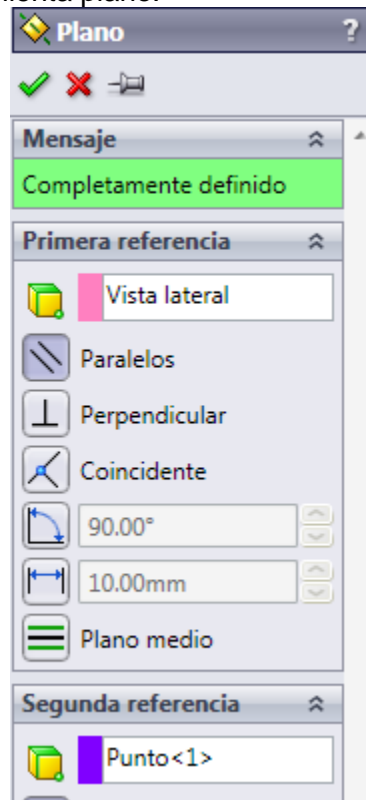
El agujero restante se realiza de la misma manera que los demás, con la herramienta asistente para taladro.

El brazo posee 4 agujeros más en las cabezas para sujetarse por medio de tornillos a la base fija y al antebrazo, por lo cual también se realizarán por medio de la herramienta taladro con la ayuda de otra herramienta denominada "Plano" que se encuentra como submenú de "geometría de referencia" .

Para realizar los respectivos agujeros se utilizarán dos planos paralelos: uno con respecto al plano planta y el otro con respecto al plano vista lateral. Para realizar dichos planos, el menú de plano muestra diferentes opciones para crear planos sobre la pieza, tal como se muestra en la figura 122.

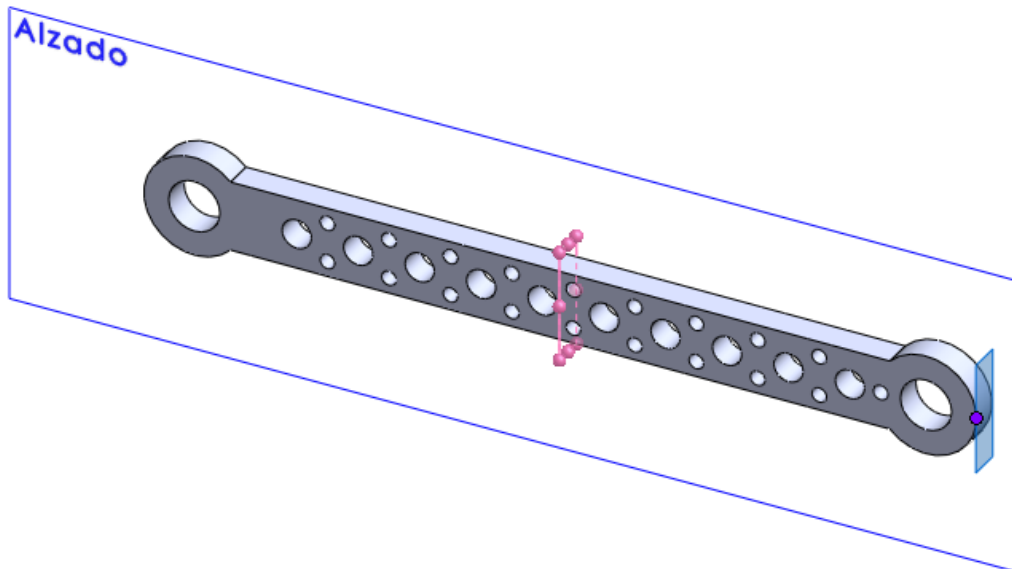
En el menú se selecciona el plano de vista lateral y en la pestaña "segunda referencia" se elige uno de los puntos de los cuadrantes del círculo para definir la distancia en que se creará el plano (figura 123).

Figura 122. Menú de la herramienta plano.



Fuente: SolidWorks.

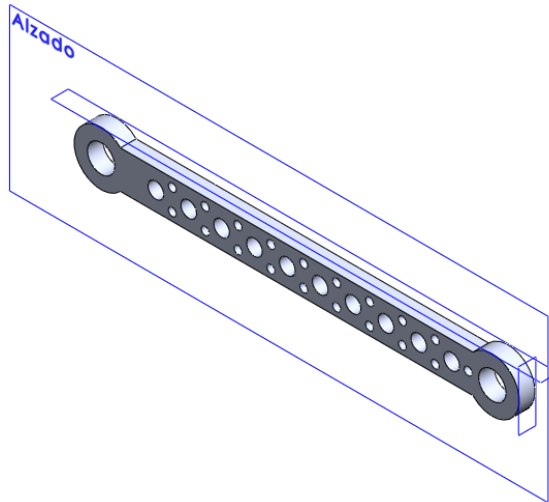
Figura 123. Creación de un plano.



Fuente: SolidWorks.

Para el segundo plano no se definirá una referencia y se empleará la opción de distancia para definir el nuevo plano y la pieza quedaría como en la figura 124.

Figura 124. Pieza con los nuevos planos.



Fuente: SolidWorks.


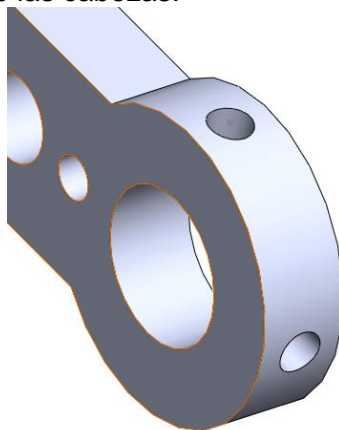
Para realizar los agujeros restantes, se utilizará la herramienta de “extruir corte”  ; donde se trazarán círculos en el lugar van los agujeros y como distancia de corte se selecciona 15mm (figura 125).

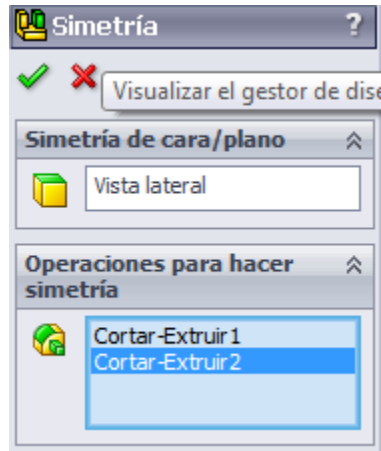
Figura 125. Agujeros en una de las cabezas.



Fuente: SolidWorks.

Para no repetir el proceso anterior al otro lado del brazo, se empleará la herramienta “simetría de operación” que se encuentra como submenú de la opción de matriz lineal. En simetría se debe consignar las operaciones que se desean copiar y el plano con respecto al que se hará, en este caso se utilizará el plano de vista lateral (figura 126).

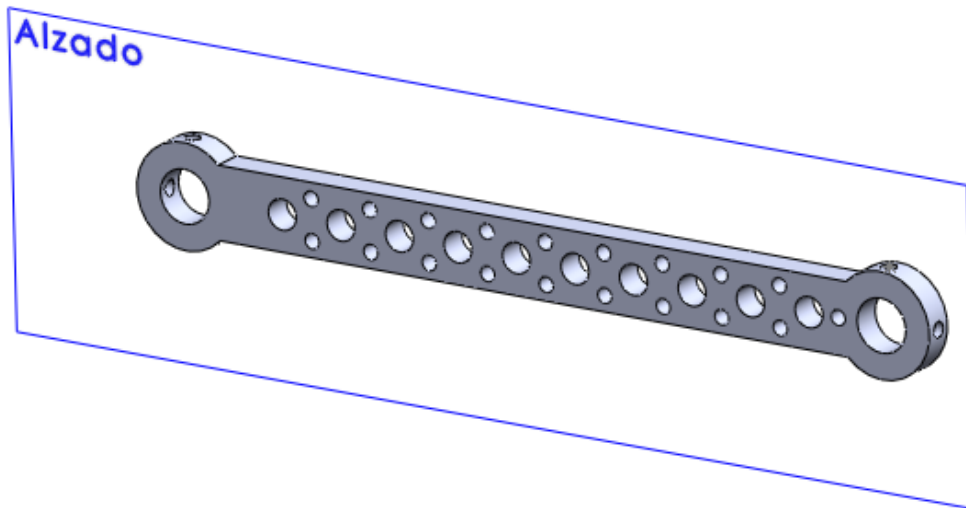
Figura 126. Menú de la simetría.



Fuente: SolidWorks.

Al aceptar la pieza quedará con los 4 agujeros que se encuentran en las cabezas del brazo, tal como se ve en la figura 127.

Figura 127. Brazo con todos los agujeros.



Fuente: SolidWorks.


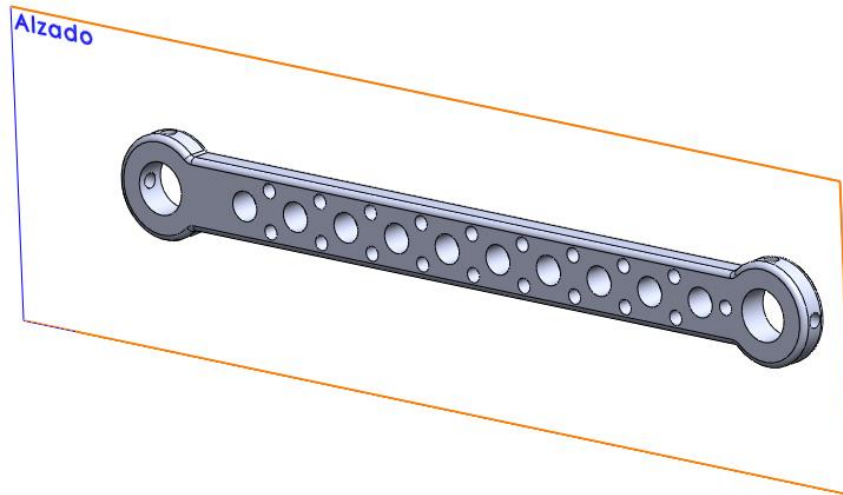
Con la ayuda de la herramienta “redondeo” , se suavizarán las aristas de la pieza con un radio de 2mm dando como resultado el brazo casi terminado de la figura 128.

Figura 128. Brazo con aristas redondeadas.

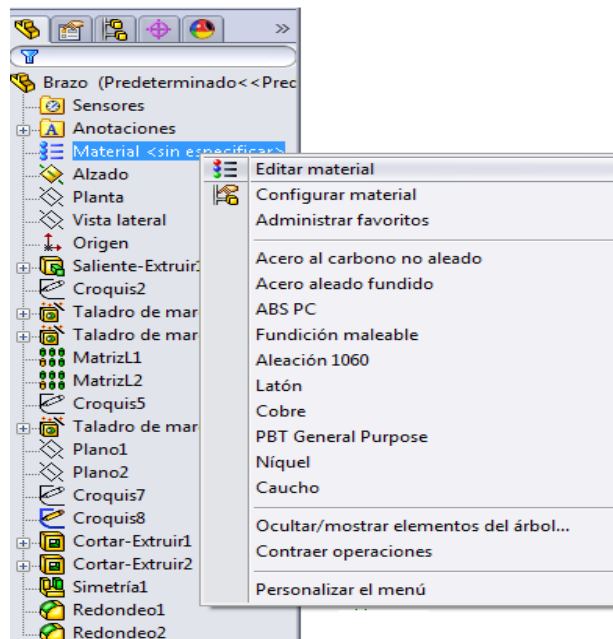


Fuente: SolidWorks.

Finalmente, se definirá el material del brazo; el cual está conformado en su totalidad de aleación de aluminio 6061. Para definir el material, en el Feature Manager, se da click derecho sobre el ítem material (figura 129), después en editar material.

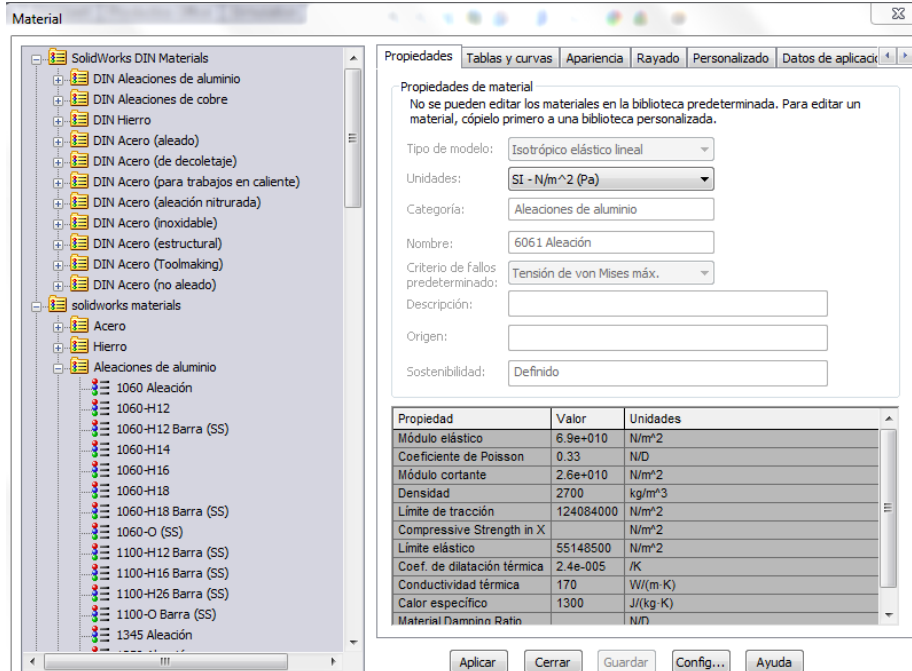
Se abrirá una ventana como en la figura 130 en la cual se seleccionará en la opción de aleaciones de aluminio 6061 Aleación y se presiona el botón aplicar.

Figura 129. Selección de la opción material.



Fuente: SolidWorks.

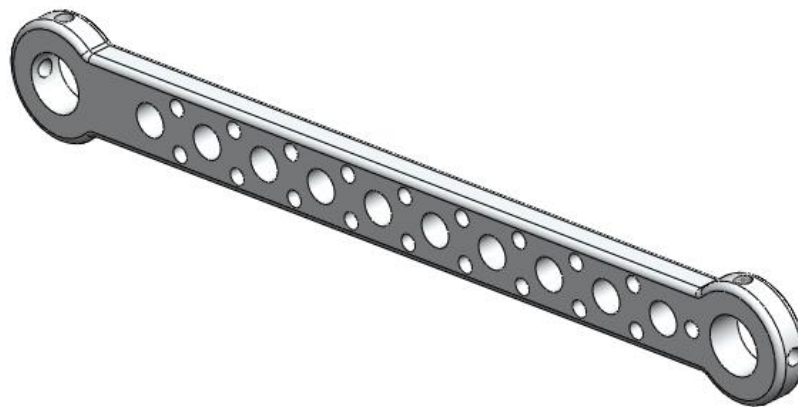
Figura 130. Selección del material.



Fuente: SolidWorks.

Finalmente, el brazo quedará como se ve en la figura 131, con todas las dimensiones definidas y el material.

Figura 131. Brazo completo.



Fuente: SolidWorks

Para las demás piezas del manipulador, se siguen procedimientos similares.

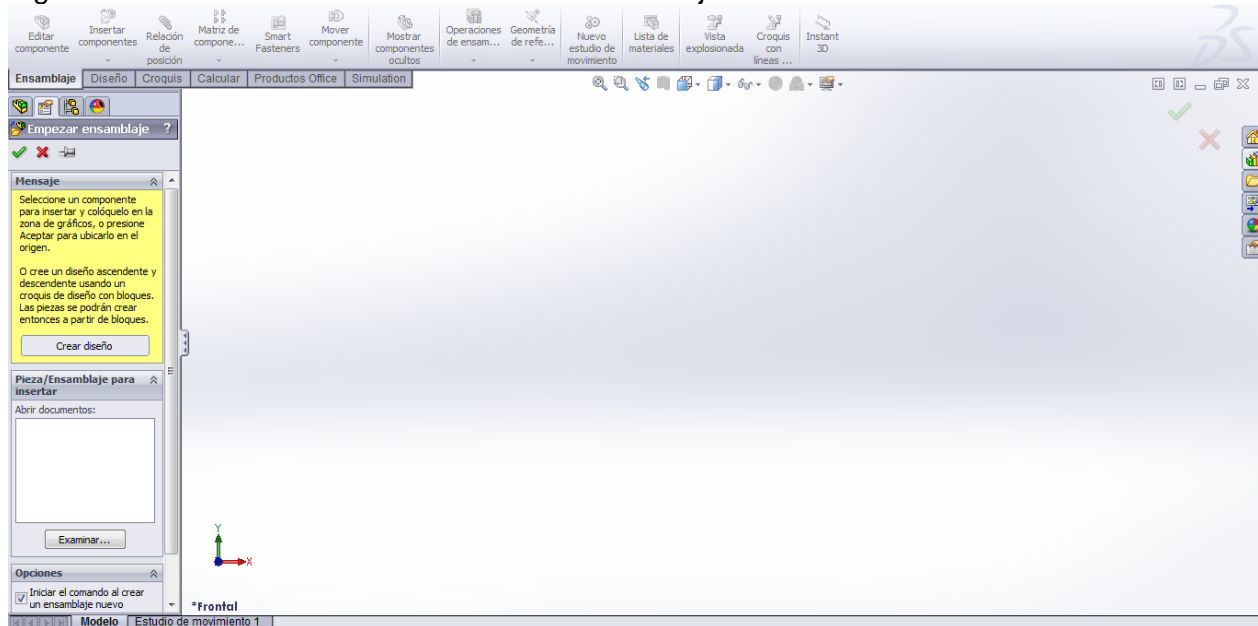
ANEXO C: CONSTRUCCIÓN DEL ENSAMBLAJE

9.3 Construcción del ensamblaje

Al poseer todas las piezas del manipulador ya se puede proceder con su ensamblaje. Como en el apartado anterior, se explicarán algunos conceptos básicos sobre el ensamblaje ensamblando uno de los tres brazos que componen el manipulador, ya que para los otros dos brazos el procedimiento es exactamente el mismo.

Mediante la ventana de selección de módulo de SolidWorks (figura 106), se debe presionar el botón “Ensamblaje”; al igual que en módulo “Pieza” se abrirá la interfaz de usuario correspondiente al módulo ensamblaje, tal como se muestra en la figura 132

Figura 132. Interfaz de usuario del módulo Ensamblaje



Fuente: SolidWorks.

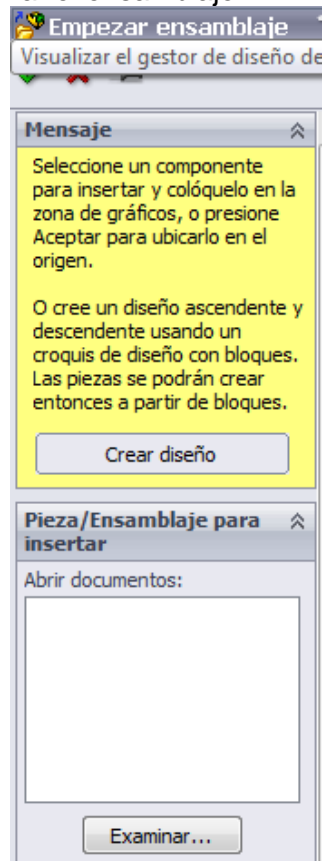
En este caso, se reemplaza la pestaña de operaciones por la de ensamblaje, mediante la cual se pueden realizar diversas acciones referentes al ensamblaje de las piezas como: insertar las piezas, moverlas, crear relaciones de posición, entre otros.

La primera pieza que se inserta en el módulo ensamblaje automáticamente se convierte en la pieza de soporte; es decir, dicha pieza no podrá moverse dentro del ensamble ya que queda fija automáticamente.

Se comenzará creando 4 sub ensamblajes que facilitarán la tarea de realizar el ensamblaje principal; hay que destacar que dichos sub ensamblajes no poseen piezas móviles.

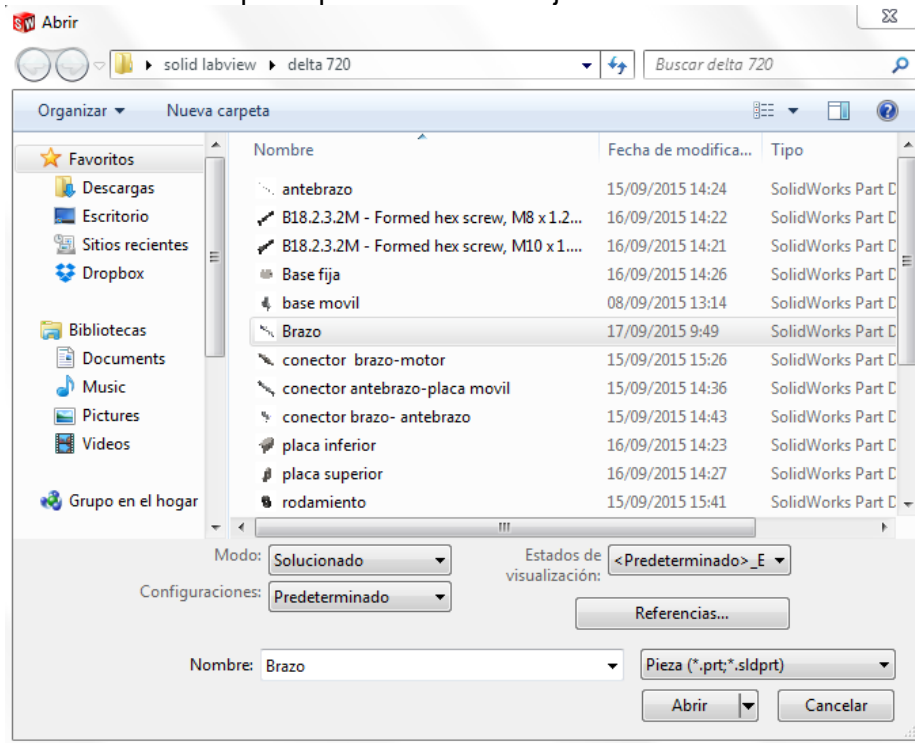
9.3.1 Creación del sub ensamblaje brazo-conector brazo/motor. En la parte izquierda de la interfaz de usuario aparece una ventana con el título “empezar ensamblaje”. Al igual que en la figura 133, al presionar sobre el botón “examinar” se abrirá la ventana de explorador de archivos mediante la cual se buscará la pieza de “brazo” y se selecciona abrir para finalizar (figura 134).

Figura 133. Ventana para comenzar el ensamblaje.



Fuente: SolidWorks.

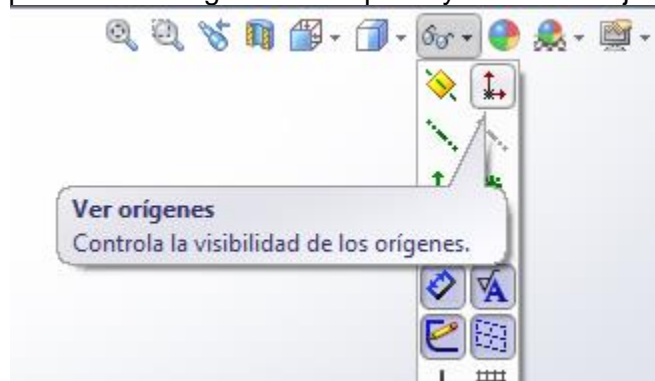
Figura 134. Selección de la pieza para un ensamblaje.



Fuente: SolidWorks.

Al abrir la pieza, el programa pedirá la ubicación en la cual se desea colocar la pieza, para este caso y los demás, se puede seleccionar en cualquier lugar de la pantalla, aunque si se desea se puede ubicar en el origen del ensamblaje habilitando la opción de ver orígenes de la interfaz (figura 135).

Figura 135. Opción para ver los orígenes de la pieza y el ensamblaje.



Fuente: NI LabVIEW.


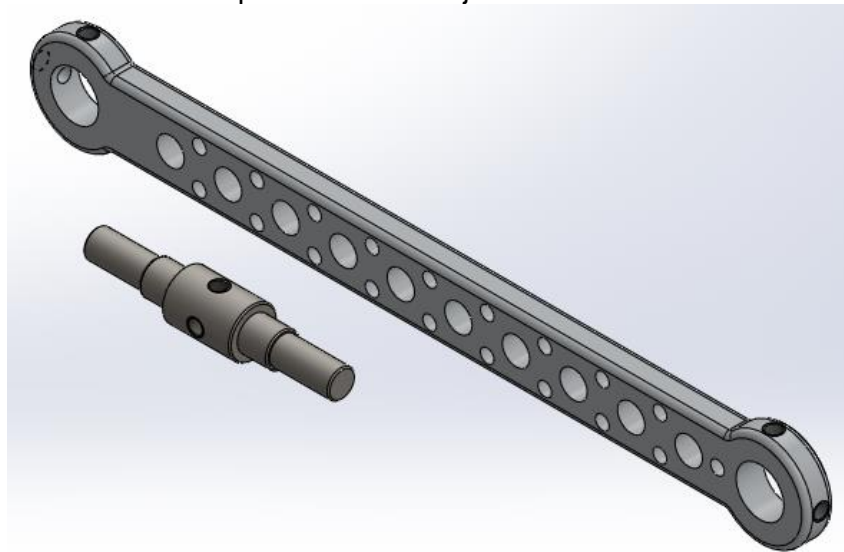
Una vez ubicada la pieza, se procede a abrir la segunda, que se conectará con el brazo; se abrirá la pieza que conecta el brazo con el motor. En la pestaña de herramientas se selecciona la opción “insertar componente”  y se sigue el mismo procedimiento que con el brazo para abrir y ubicar la pieza en el espacio como en la figura 136.

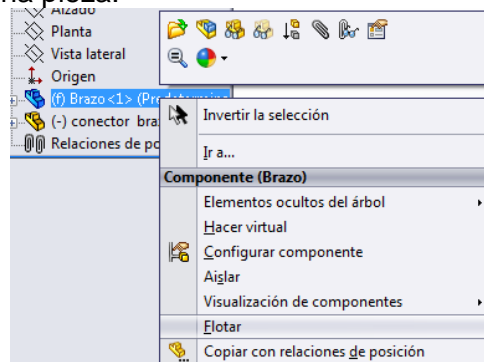
Figura 136. Piezas insertadas para el ensamblaje.



Fuente: SolidWorks.

La única pieza que se puede mover es el conector. Si se desea desactivar la fijación del brazo, en el Feature Management se da click derecho sobre el brazo y aparecerá la opción de “Flotar” que permitirá mover el brazo (figura 137). De la misma manera también se pueden fijar piezas para evitar que se muevan.

Figura 137. Flotar o fijar una pieza.



Fuente: SolidWorks.


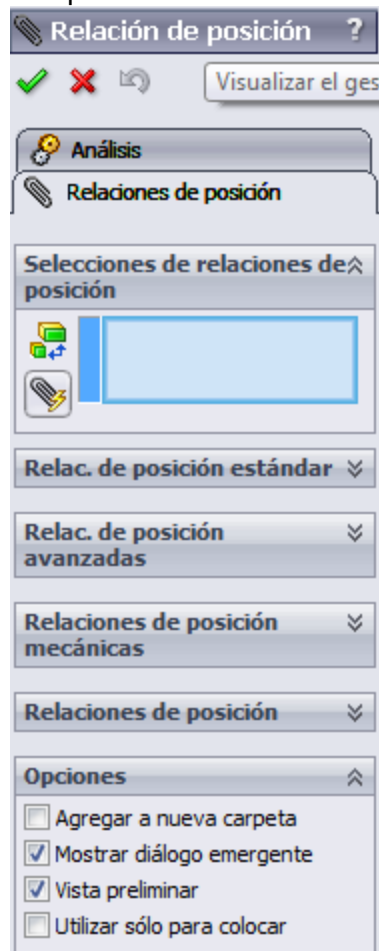
Una vez definidos los elementos del ensamblaje, se procede a crear las relaciones de posición, para ello se selecciona el botón “relaciones de posición”  en la barra de herramientas y se abrirá una ventana en el lado izquierdo con las diferentes opciones para crear relaciones de posición, como se ve en la figura 138.

Figura 138. Menú de relaciones de posición.



Fuente: SolidWorks.

Como se puede observar, hay tres posibilidades para crear relaciones de posición:

- Relaciones de posición estándar. Son las más básicas y a la vez las más usadas, al desplegar el menú se abrirá una ventana con las relaciones básicas disponibles (Figura 139).

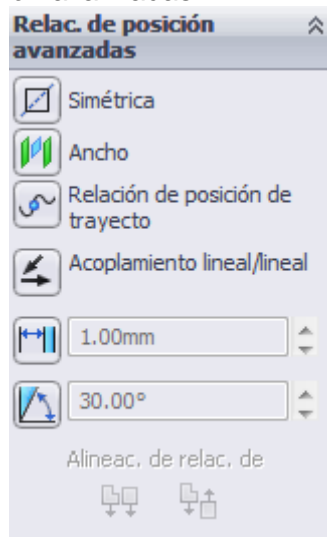
Figura 139. Relaciones de posición estándar.



Fuente: SolidWorks.

- Relaciones de posición avanzadas. Son más complejas y se utilizan cuando las básicas no permiten obtener la relación deseada o se necesitan varias relaciones básicas para hacer lo mismo que una sola avanzada (Figura 140).

Figura 140. Relaciones de posición avanzadas.



Fuente: SolidWorks.

- Relaciones de posición mecánicas. Permite que SolidWorks identifique una relación de posición de manera diferente a como lo haría con los casos

anteriores; de tal forma que identifique por ejemplo relaciones entre piñones o leva y seguidor (figura 141).

Figura 141. Relaciones de posición mecánicas.



Fuente: SolidWorks.

Debido a que el manipulador no posee las piezas mecánicas mencionadas en la figura 141, no se utilizará dicha opción.


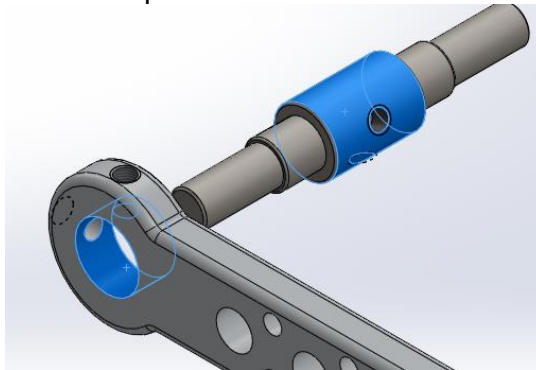
La primera relación de posición que se creará será una estándar concéntrica entre el conector y uno de los agujeros del brazo; para ello, se selecciona la cara exterior del cilindro del conector y la cara interior del agujero del brazo, tal como se muestra en la figura 142. SolidWorks asignará automáticamente la relación de posición estándar que mejor se adapte a los elementos seleccionados; usualmente para elementos cilíndricos o esféricos se seleccionará la opción de “concéntrico” .

Figura 142. Selección de las caras para la relación.

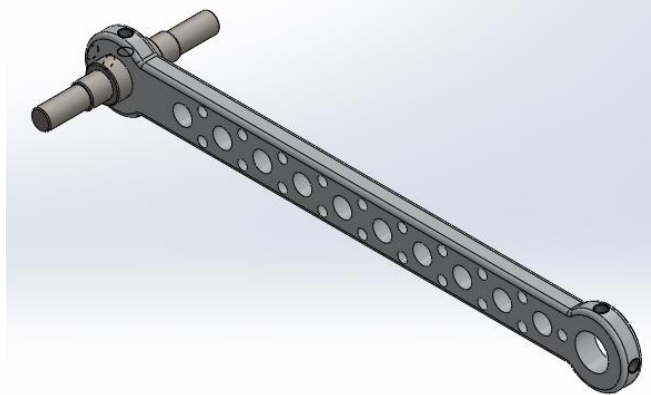


Fuente: NI LabVIEW.

La acción anterior también puede ser ejecutada seleccionando las aristas del agujero y el cilindro.

La segunda relación de posición será concéntrica entre el agujero que se encuentra en el cilindro y el agujero del brazo (figura 143), al realizar esta relación, el sub ensamble quedará completamente definido y se guardará como “brazo”.

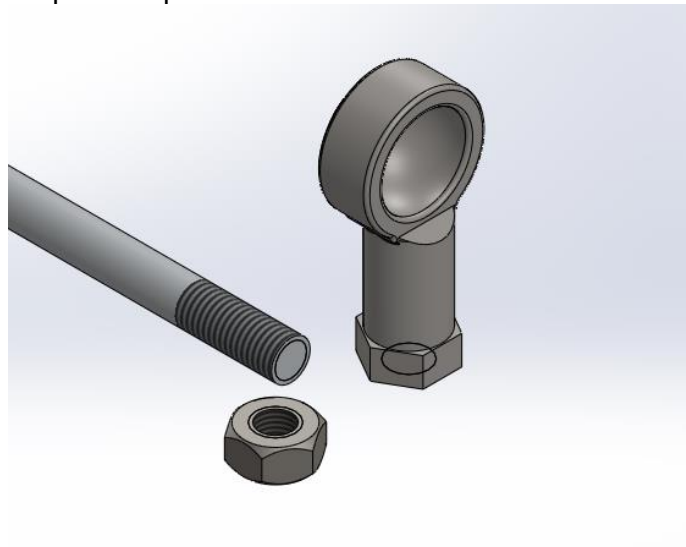
Figura 143. Sub ensamble brazo.



Fuente: NI LabVIEW.

9.3.2 Creación del sub ensamblaje antebrazo. Primero se abre la pieza “antebrazo”; después se insertarán las piezas “Tuerca” y “rotula macho” tal como se muestra en la figura 144.

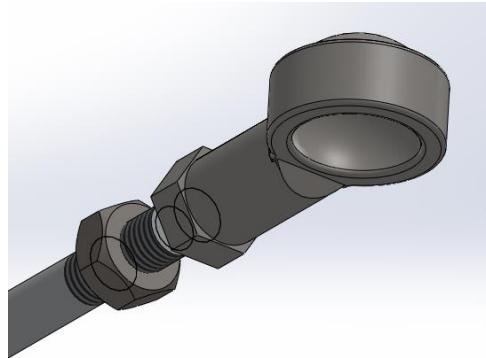
Figura 144. Piezas requeridas para el antebrazo.



Fuente: SolidWorks.

Como en pasos anteriores, primero se crearán relaciones de posición concéntricas: rótula/antebrazo, tuerca/ antebrazo; como en la figura 145.

Figura 145. Relaciones concéntricas.



Fuente: SolidWorks.


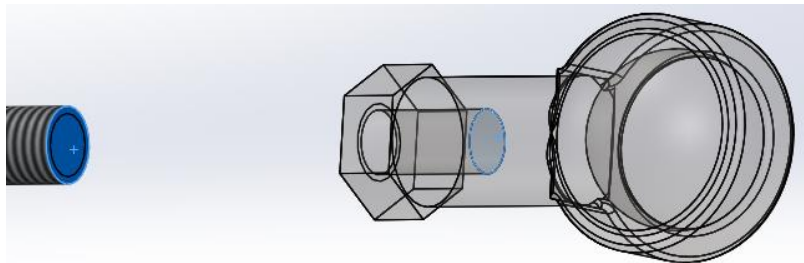
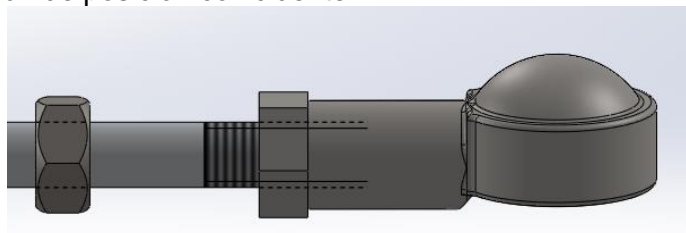
El siguiente paso es crear una relación de posición coincidente entre la cara del agujero de la rótula y la cara del extremo del antebrazo; como en el caso anterior, SolidWorks selecciona automáticamente “coincidente”  cuando se seleccionan caras o planos (figuras 146 y 147).

Figura 146. Selección de las caras.



Fuente: SolidWorks

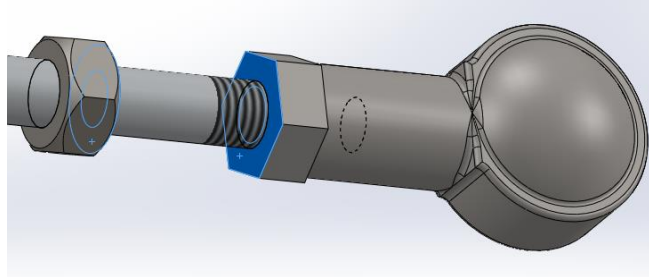
Figura 147. Relación de posición coincidente.



Fuente: SolidWorks.

También se realizará una relación coincidente entre una de las caras de la tuerca y la cara inferior de la rótula (figura 148).

Figura 148. Relación de posición coincidente b.



Fuente: SolidWorks.


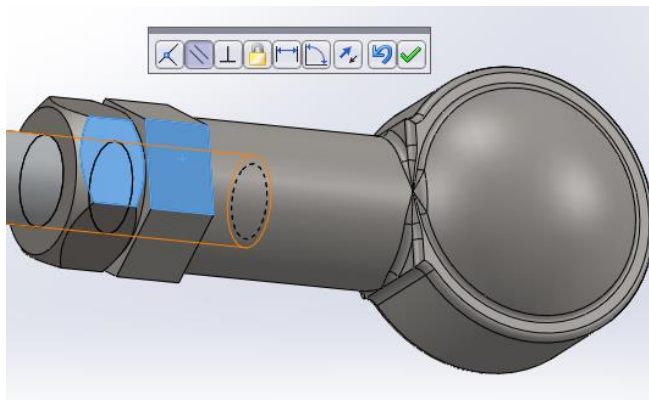
Para mantener una buena estética entre las piezas, se realizará una relación de posición “paralela”  entre una de las caras laterales de la tuerca con una de las caras laterales de la rótula (figura 149).

Figura 149. Relación de posición paralela.



Fuente: SolidWorks.

SolidWorks tratará de realizar una relación de posición coincidente entre las caras; sin embargo, al existir una relación de posición concéntrica previa, las piezas no se pueden mover hasta coincidir. SolidWorks arrojará un error, el cual se soluciona al seleccionar una relación de posición que satisfaga la geometría de las piezas que en este caso es “paralelo”.

Para evitar que la rótula se mueva con respecto al tubo del antebrazo, se creará una relación de posición paralela o coincidente entre los planos del antebrazo y la rótula de la siguiente manera:


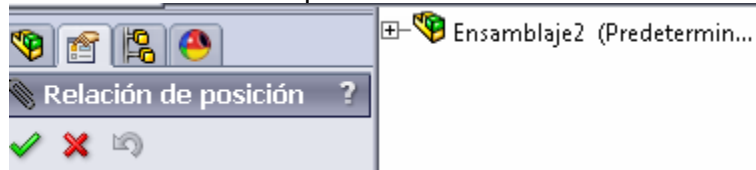
Se selecciona el icono de “relación de posición”  y a continuación se despliega el menú que se encuentra al lado del feature manager (figura 150).

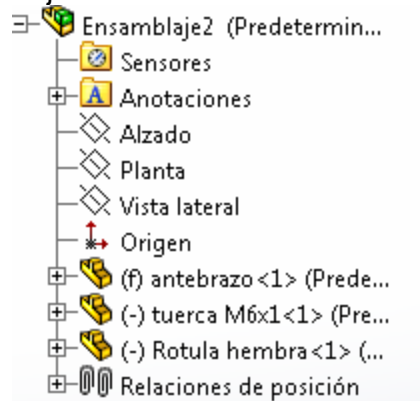
Figura 150. Selección del menú de las piezas.



Fuente: SolidWorks.

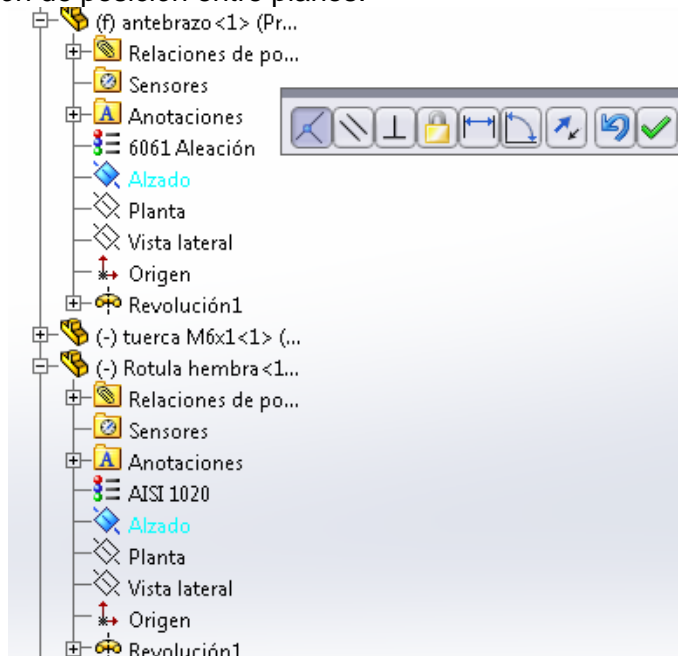
Al desplegar, se verán las opciones de las piezas que se encuentran en el ensamblaje como se muestra en la figura 151. Se desplegarán también las opciones del antebrazo y de la rótula hembra y se seleccionarán los planos de Alzado de ambas piezas, generando una relación de posición coincidente o paralela (figura 152).

Figura 151. Menú del ensamblaje.



Fuente: SolidWorks.

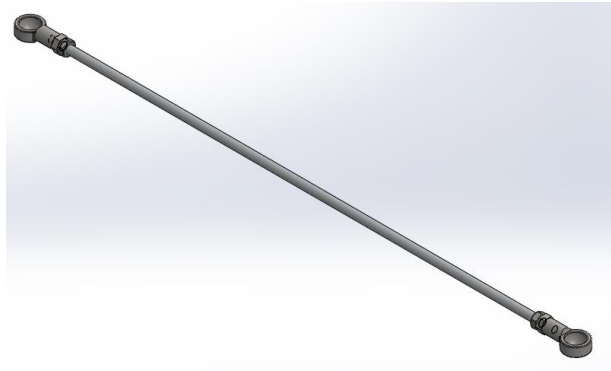
Figura 152. Relación de posición entre planos.



Fuente: SolidWorks.

Al aceptar, ni la rótula ni la tuerca se moverán con respecto al antebrazo. Para finalizar el ensamblaje se repiten los procedimientos para el otro extremo del tubo como en la figura 153, (no utilizar simetría de componente).

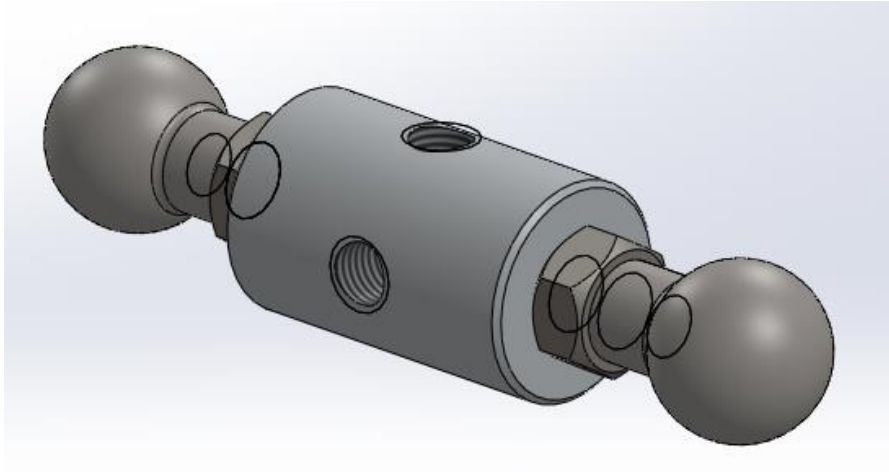
Figura 153. Sub ensamblaje antebrazo.



Fuente: NI LabVIEW.

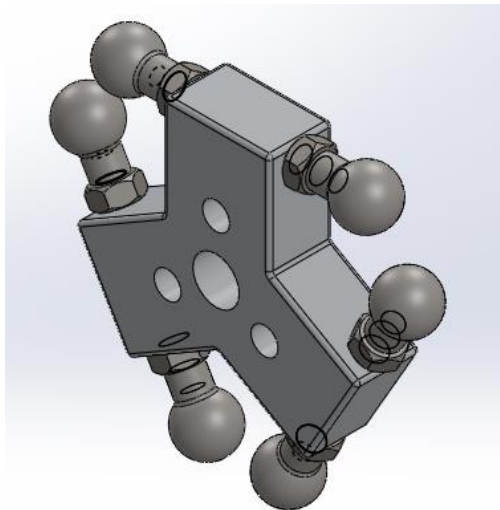
Para los dos sub ensamblajes siguientes se siguieron procedimientos similares con las relaciones de posición, por lo cual no se mostrará su procedimiento sino el producto final en las figuras 154 y 155.

Figura 154. Sub ensamble conector brazo/antebrazo.



Fuente: NI LabVIEW.

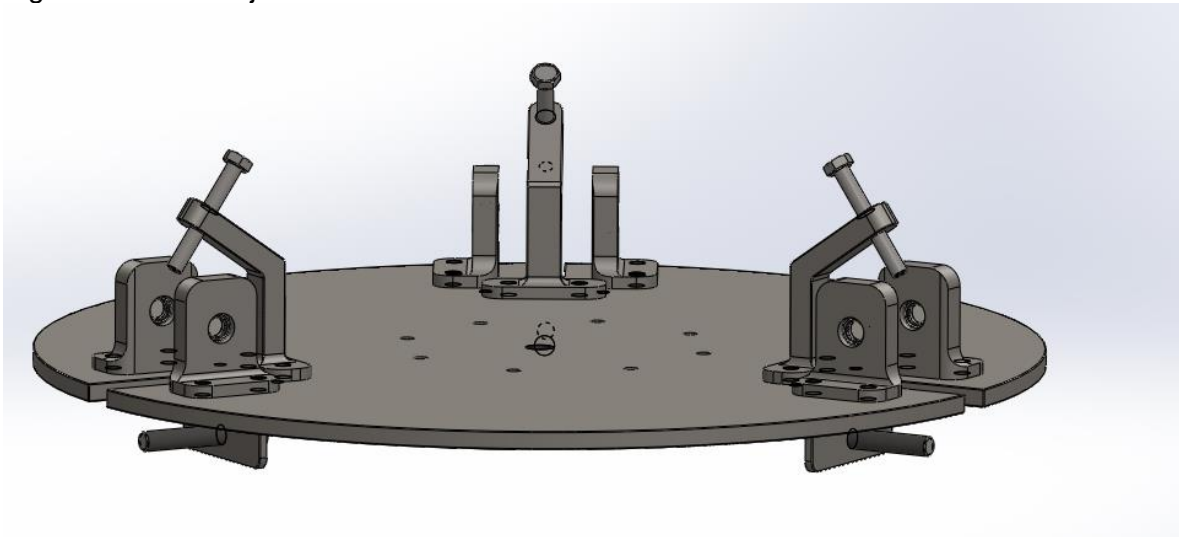
Figura 155. Sub ensamble base móvil.



Fuente: NI LabVIEW.

9.3.3 Ensamblaje del manipulador paralelo delta 720. Como se mencionó anteriormente, la primera pieza que se inserta será la fija; por lo tanto, la base fija será la primera pieza que se va a insertar, además se ensamblarán todos los accesorios fijos de ésta con relaciones de posición explicadas anteriormente y con la relación de posición avanzada de ancho que se explicará a continuación, la base fija con sus accesorios se muestra en la figura 156.

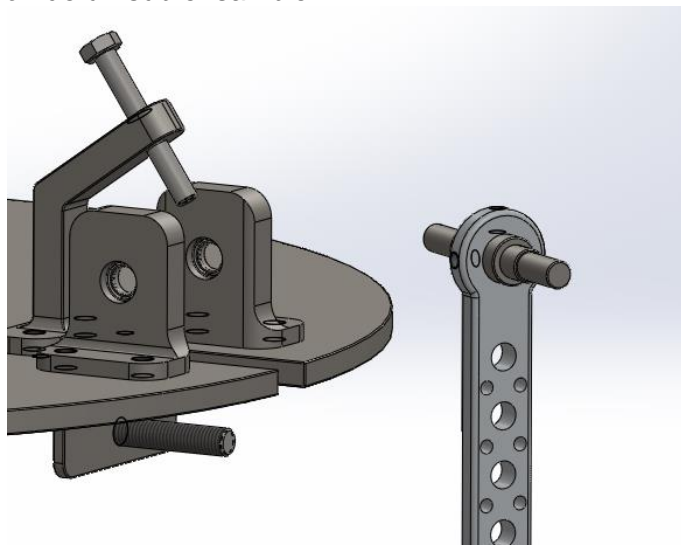
Figura 156. Base fija con sus accesorios.



Fuente: SolidWorks.

Ahora se insertará el sub ensamble del brazo de la misma manera que al insertar piezas (figura 157).

Figura 157. Inserción de un sub ensamble.



Fuente: SolidWorks.


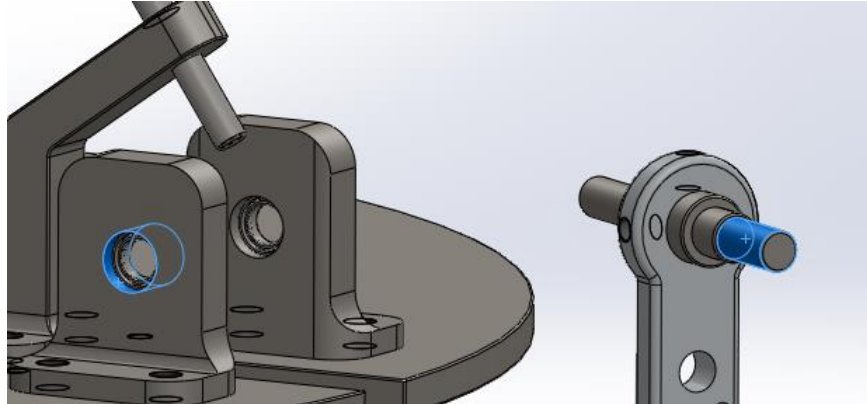
Se realiza una relación de posición concéntrica entre el brazo y uno de los agujeros de los conectores de la base fija (figura 158). Después, se realiza la relación de posición avanzada “ancho”  como se muestra a continuación:

Figura 158. Relación concéntrica.



Fuente: SolidWorks.



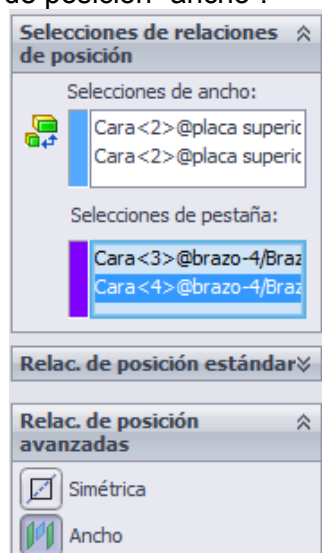
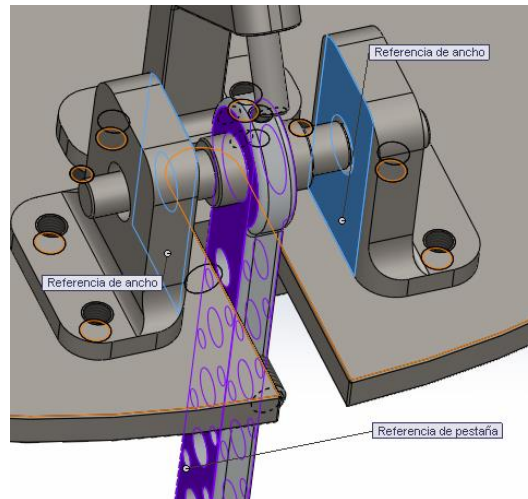
Se selecciona el icono de “relación de posición” , después se despliega el menú de relaciones de posición avanzadas y se selecciona “ancho” , se abrirá un menú tal como se muestra en la figura 159 en la cual hay que ingresar “selección de ancho” y “selección de pestaña”; en “selección de ancho se escogen las caras internas o externas del conector de la base fija (azul) y en “selección de pestaña” se escogen las caras que conforman el espesor del brazo (morado), tal como se muestra en la figura 160.

Figura 159. Menú de la relación de posición “ancho”.




Fuente: SolidWorks.



Figura 160. Selección de las caras



Fuente: SolidWorks.

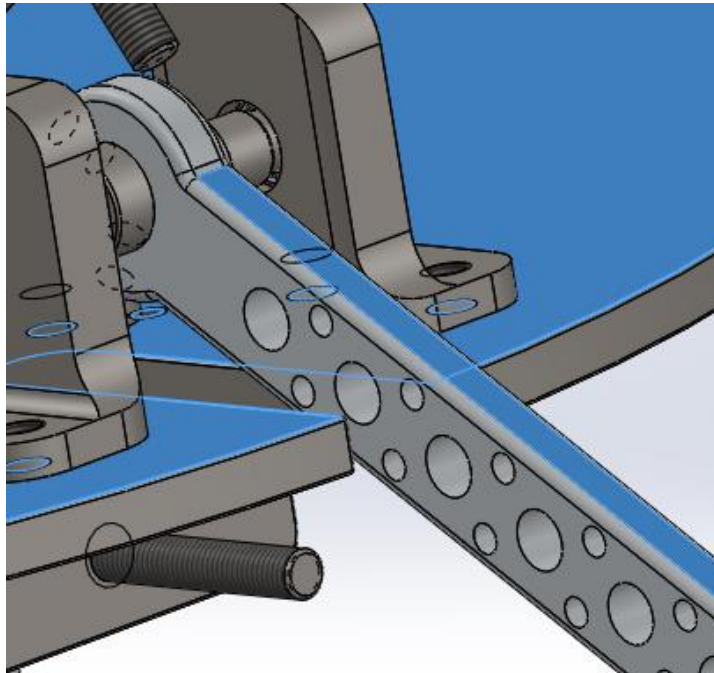
La relación de posición “ancho” puede presentar algunos problemas durante el proceso de simulación empleando el programa LabVIEW. Se recomienda reemplazar esta relación por una coincidente que fije mejor las piezas si se presentan problemas en la simulación.

Como se puede observar en la figura 156, existen dos topes que limitan el movimiento del brazo tanto arriba como abajo. Para imitar el efecto de los topes, se empleará una relación de posición avanzada denominada “Angulo” ; el permitirá que haya solo movimiento entre el o los ángulos seleccionados.

Se selecciona el icono de “relación de posición” , después se despliega el menú de relaciones de posición avanzadas y se selecciona “Angulo” ; esta operación requiere seleccionar las dos caras que conformarán el ángulo.

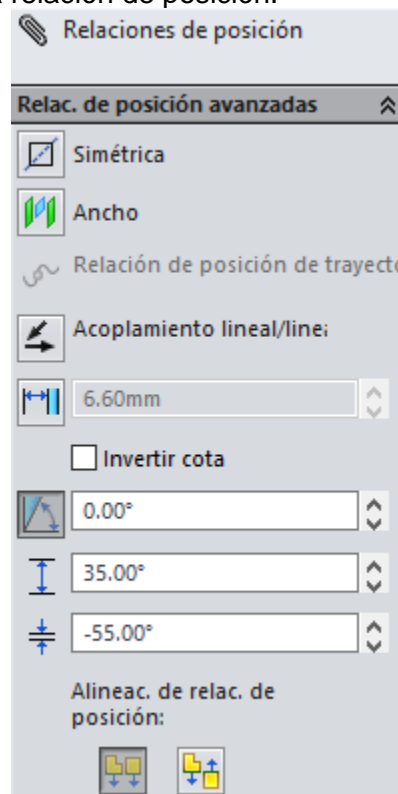
Tal como se muestra en la figura 161, se seleccionan las caras de la base fija y el brazo; en las opciones de distancia, se selecciona como posición inicial cero grados; distancia máxima de 35 grados y la mínima será de -55 grados (Figura 162). El procedimiento se repite con los otros dos brazos del manipulador.

Figura 161. Selección de las caras.



Fuente: SolidWorks.

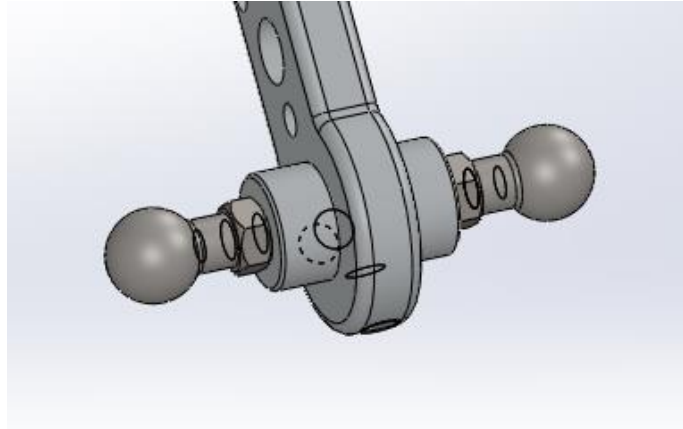
Figura 162. Parámetros de la relación de posición.



Fuente: SolidWorks.

Ahora que el brazo se encuentra definido, se procede a insertar el conector del brazo/antebrazo y creando las relaciones de posición necesarias (figura 163)

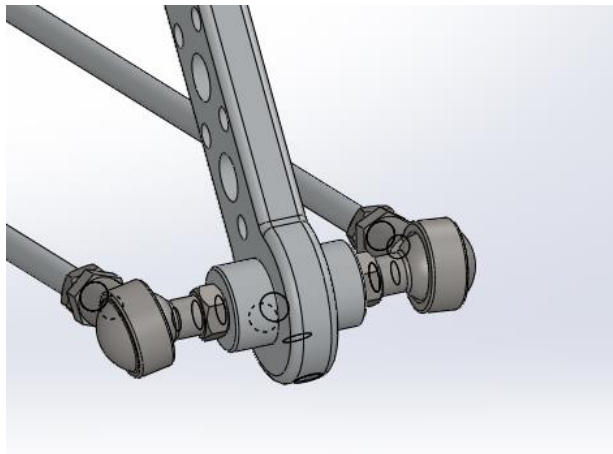
Figura 163. Inserción del conector brazo/antebrazo.



Fuente: SolidWorks.

El siguiente paso es insertar dos sub ensamble de antebrazo y crear relaciones de posición concéntricas entre la parte cóncava de la rótula hembra y la esférica de la rótula macho tal como se observa en la figura 164.

Figura 164. Inserción del antebrazo

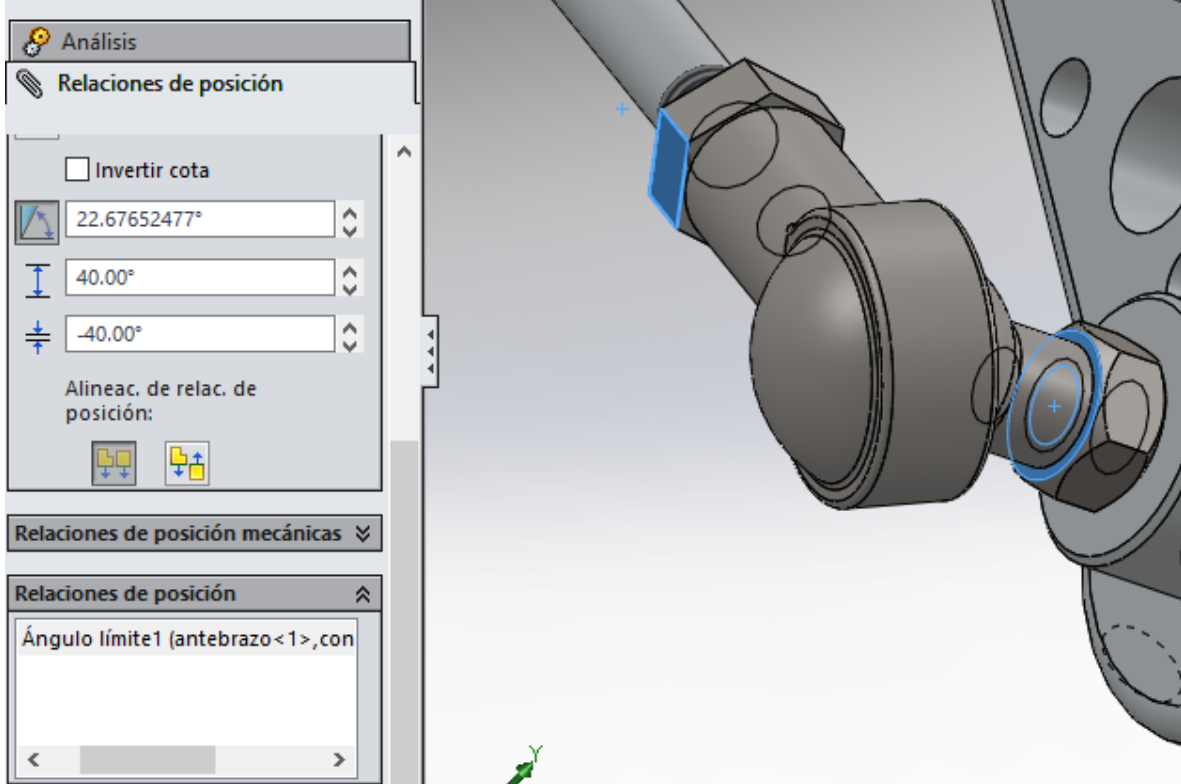


Fuente: SolidWorks.

Las rotulas también poseen limitación en su movimiento entre dos ángulos. Al igual que para los brazos es necesario utilizar la relación de posición avanzada de “ángulo” en cada rotula para impedir que giren con respecto a la rótula macho.

En la figura 165 se muestran las caras seleccionadas y los parámetros para la relación de posición en las rotulas.

Figura 165. Selección de caras y parámetros para definir las rotulas.

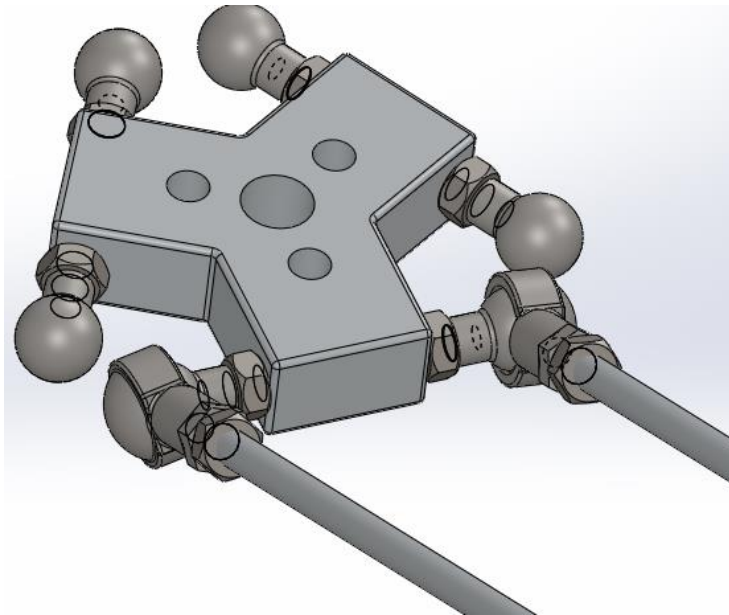


Fuente: SolidWorks.

Como se puede observar en la figura anterior, la posición inicial puede ser cualquiera, pero el rango de movimiento debe ser el mismo a ambos lados.

El penúltimo paso consiste en insertar el sub ensamble de la base móvil y crear relaciones de posición concéntricas entre las rotulas de los extremos del antebrazo y las rotulas de uno de los lados de la base móvil (figura 166).

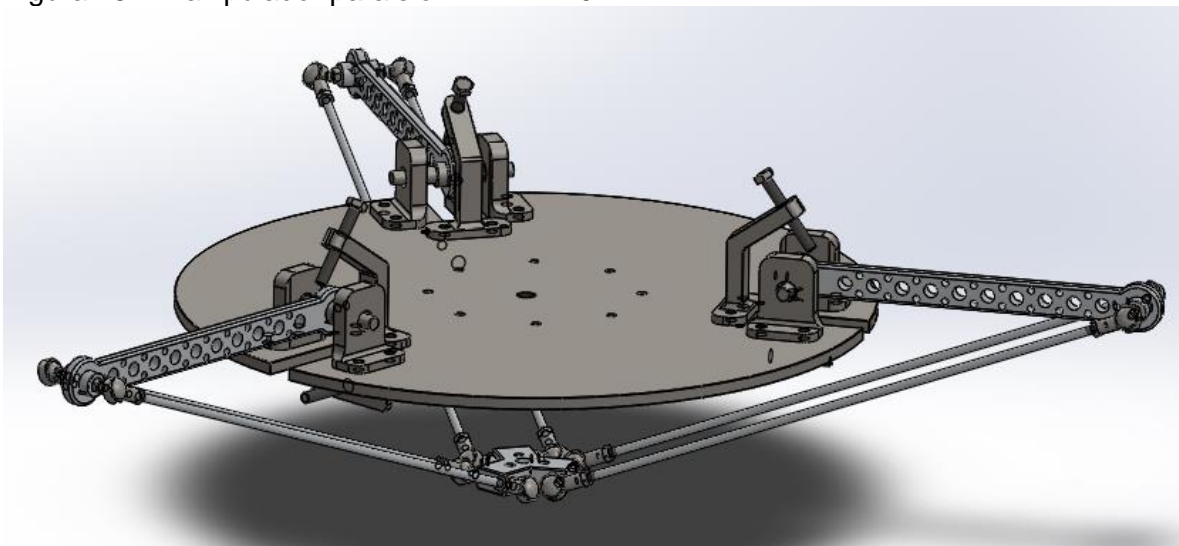
Figura 166. Inserción de la base móvil.



Fuente: SolidWorks.

Finalmente, se repiten los pasos anteriores para los otros dos brazos; obteniéndose el manipulador paralelo delta 720 de la figura 167 con todas sus piezas ensambladas.

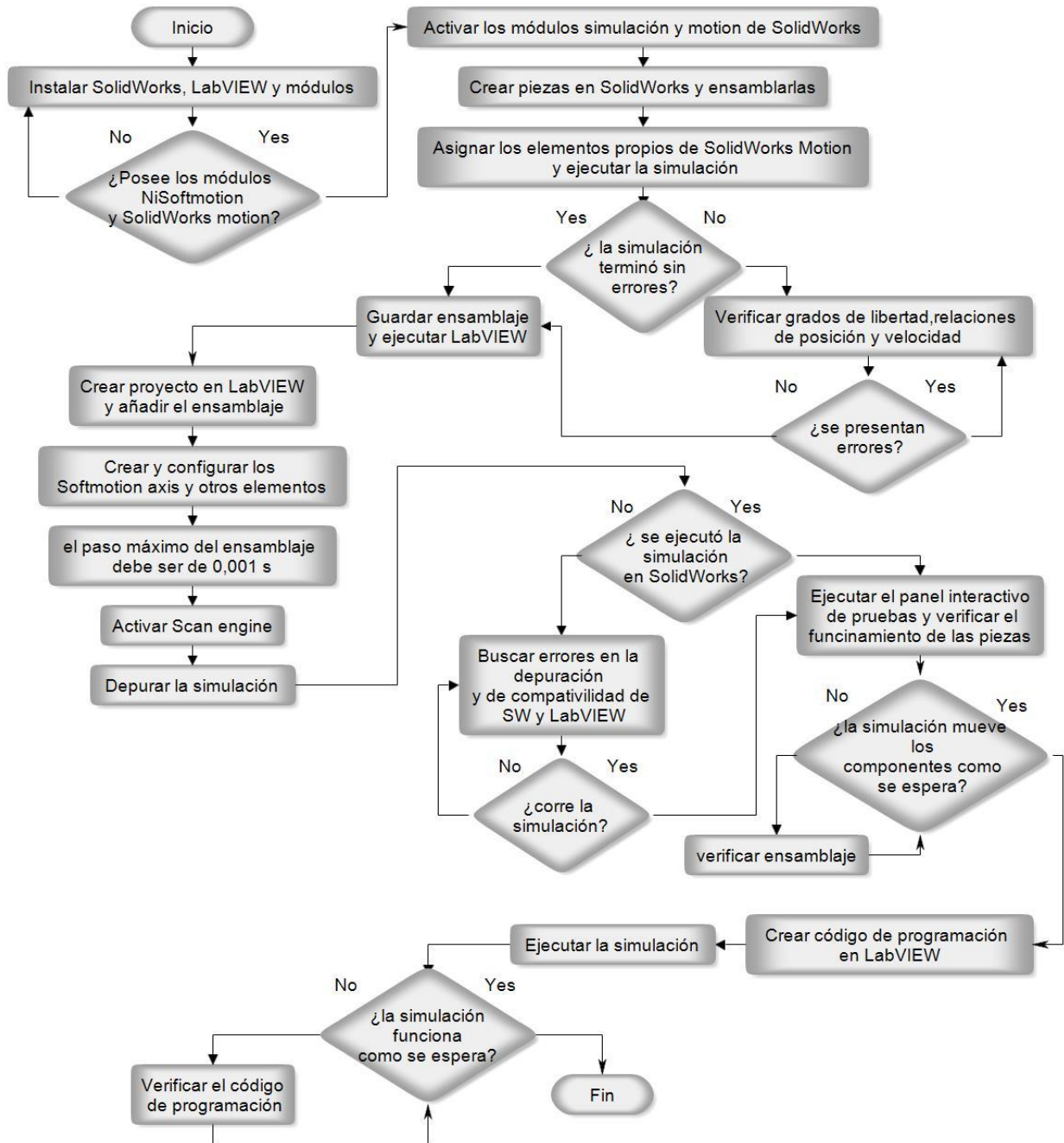
Figura 167. Manipulador paralelo DELTA 720.



Fuente: SolidWorks.

ANEXO D: METODOLOGÍA PARA CONSTRUIR EL PROTOTIPO VIRTUAL EMPLEANDO SOLIDWORKS Y LABVIEW

Figura 168. Diagrama de flujo para crear un prototipo virtual con SW y LB



Fuente: Rfflow