



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA
OPCIÓN EN AUTOMATIZACIÓN

**“Análisis, diseño y puesta en marcha de un Sistema
Cartográfico Semi- Automático Multi-Posicionador Modular de
resolución controlada”****

T E S I S

Presentada para obtener el título de:
Maestro en Ciencias de la Electrónica Opción en Automatización

Presenta:

Lic. Ricardo Torres Reyes*

Directores:

Dr. Pedro Javier García Ramírez
Dr. Sergio Vergara Limon

Puebla, México

Diciembre 2016

*BECARIO CONACYT

** TRABAJO FINANCIADO POR EL PROYECTO VIEP

BUAP[®]

Agradecimientos

Agradezco a Dios y a San Judas Tadeo por ser una guía espiritual e iluminar mi camino.

Gracias a Conacyt por el apoyo económico necesario para poder terminar la Maestría.

A mis padres y hermanos los cuales me dieron todo el apoyo para poder realizar esta tesis.

A mis asesores de tesis Dr. Pedro Javier García Ramírez y Dr. Sergio Vergara Limon les agradezco por brindarme el apoyo necesario para poder realizar este trabajo en especial al Dr. Sergio Vergara por enseñarme todos los conocimientos necesarios para poder realizar esta tesis.

A mis sinodales por contribuir con sus conocimientos y consejos académicos para la correcta elaboración del presente trabajo.

A la Doctora Aurora Vargas Treviño que siempre estuvo al pendiente de mis avances de tesis, que desinteresadamente siempre me ayudo en la elaboración de mis avances y artículo ayudándome a corregirlo y obtener siempre excelentes resultados.

Quiero agradecer a mis compañeros de la Maestría en Ciencias de la Electrónica opción automatización ya que ellos siempre me ayudaron dando sus ideas y opiniones para poder culminar esta tesis gracias a Juan, Alfredo, Ricardo Alberto, Daniel, Luis Ernesto, Miguel Angel, Froylan, Oswaldo, Fernando Herrera y Fernando Chevez.

Quiero dedicar este trabajo a mis padres María Justina y Telesforo, a mis hermanos José Miguel y Alejandro, a mis sobrinos Ana Desireé, Tadeo Alexander y Dana Zoe ya que gracias a ellos pude cumplir todos mis objetivos en esta etapa de mi vida “GRACIAS”.

Resumen

Este documento presenta un trabajo de tesis que tuvo como finalidad el diseño y el desarrollo de un robot cartesiano de 3 gdl (Grados de Libertad). En la primera parte de este trabajo se presenta una pequeña introducción del estudio de las diferentes configuraciones de robots como sus tipos ya que el gran aporte que da la robótica a la medicina es relevante, hoy en día es posible realizar cirugías de alto riesgo con una gran seguridad y exactitud, evitando así algún error humano durante los procesos quirúrgicos, realizar cirugías en zonas en las cuales el cirujano no puede acceder o visualizar.

A partir de la necesidad de llevar a cabo estudios de esta naturaleza, surge la necesidad por desarrollar un robot cartesiano que pueda hacer un estudio espacial puntual con una gran exactitud y precisión ya que esto se puede lograr con rieles de alta precisión y motorreductores que nos ayudaran para que tengamos un mejor desempeño.

En la segunda parte del trabajo se presenta el diseño en Solidworks y la construcción de cada uno de los diferentes ejes que componen el robot cartesiano de 3 grados de libertad, los materiales utilizados para la construcción, así como el diseño de la etapa de potencia para los movimientos de desplazamiento en los ejes X, Y, Z. también se hace el estudio de la cinemática y dinámica del sistema, Se presenta la caracterización de los motores para que trabajen de manera lineal.

En este trabajo se presenta el desarrollo de cada uno de los bloques del firmware que se realizaron mediante el software QUARTUS II, para poderlos implementar en la plataforma FPGA (Field Programmable Gate Array) también se presenta la interfaz gráfica creada en LabVIEW que manda las posiciones deseadas de cada uno de los ejes. Por último, se presentan los resultados experimentales del sistema y todas las etapas que conforman el robot cartesiano.

Índice

Introducción	i
Capítulo 1 : Diseño y características del robot cartesiano	1
1.1. Características del robot cartesiano	1
1.2. Diseño en Solidworks del eje X.....	2
1.3 Diseño en Solidworks del eje Z	2
1.4. Diseño en Solidworks del eje Y	3
1.5 Diseño en Solidworks del Robot de 3 GDL.....	4
1.6. Conclusión	4
Capítulo 2 . Sistema mecánico	5
2.1. Construcción mecánica del eje X.....	5
2.1.2. Guía de movimiento lineal tipo HSR.....	6
2.1.2. Tornillo Embalado	9
2.1.3 Tuerca de husillo de apoyo	11
2.1.4. Chumaceras.....	12
2.1.5. Sistema de transmisión	12
2.1.6. Resolución teórica del eje X	13
2.2. Construcción mecánica del eje Z.....	14
2.2.1. Tuerca de husillo de apoyo (Brida).....	15
2.2.2 Chumaceras.....	15
2.2.3. Sistema de transmisión	16
2.2.4 Resolución teórica del eje Z.....	16
2.3. Construcción mecánica del eje Y.....	18
2.3.1. Piñón	19
2.3.2 Nylamid.....	20
2.3.3. Cremallera.....	20
2.3.4. Resolución teórica del eje Y	22
2.4 Conclusión	23
Capítulo 3 : Cinemática y Dinámica.	24
3.1 Modelo Cinemático.....	24
3.2 Modelo Dinámico	25

3.3 Conclusión	28
Capítulo 4 : Sistema Electrónico.....	29
4.1 Diagrama general del sistema	29
4.1.1 Motorreductor 37dx54L.....	30
4.1.2. Caracterización del primer motor de CD	30
4.1.3. Metodología de Caracterización Del segundo motor.....	34
4.2 Encoder	36
4.3. Etapa de comunicación:	37
4.4. Etapa de potencia	40
4.5 Conclusión	45
Capítulo 5 Firmware y software.....	46
5.1 Comandos de referencia del FIRMWARE	48
5.2 Circuito para obtener la posición usando un encoder	50
5.2.1 Implementación del encoder.	51
5.3 Tangente hiperbólica.....	52
5.4 Circuito generador del PWM.....	55
5.5 Control del eje Y.....	58
5.6 Diagrama final del firmware del robot cartesiano	60
5.7 Software del sistema	65
5.7.1 Diseño de la interfaz de usuario.....	66
5.7.2 Programa de adquisición y envío de datos.....	67
5.8 Conclusión	73
Capítulo 6 : Resultados Experimentales.....	74
6.1 Resultados de caracterización de los Motorreductores 37dx54L	74
6.1.1 Resultado de la señal de encoder	76
6.2 Resultado Etapa de control	76
6.2.1 Resultado Robot de 3 gdl.....	77
6.2.2 Resultado del control de mandos	77
6.3 Robot de 3 Gdl y etapas de control.....	78
6.3.1 Implementación del robot de 3 Gdl	82
6.4 Conclusión	83

Conclusiones Generales	84
Apéndice A.....	85
Apéndice B.....	87
Referencias.....	92

Índice de Figuras

Figura 1: Tipos de articulaciones.	iv
Figura 2: Robot configuración cartesiana.	iv
Figura 3: Sistema estereotáxico de la empresa científica SEN.	v
Figura 4: Robot cartesiano j2300 de la empresa DOTEST.	vi
Figura 5: Sistema estereotáxico digital Med-int-048.	vi
Figura 1.1: Diseño del eje X.	2
Figura 1.2: Diseño del eje Z.	3
Figura 1.3: Diseño del eje Y.	3
Figura 1.4: Robot de 3 gdl.	4
Figura 2.1: Estructura mecánica del robo eje X.	5
Figura 2.2: Guía de movimiento lineal tipo HSR.	6
Figura 2.3: Tipo para cargas pesadas estándar.	8
Figura 2.4: (a) Sello del extremo, (b) Sello lateral.	9
Figura 2.5: Tornillo embalado.	10
Figura 2.6: Dimensiones del tornillo embalado.	11
Figura 2.7: (a)Tuerca de apoyo, (b) Tuerca de apoyo y Tornillo.	11
Figura 2.8: (a)Chumaceras, (b) Chumacera lateral.	12
Figura 2.9:(a) Sistema de transmisión, (b) base para motor.	12
Figura 2.10: Diseño de Solidworks eje X.	13
Figura 2.11: Estructura mecánica del eje Z.	14
Figura 2.12: (a)Tuerca de apoyo, (b)Tuerca de apoyo con tornillo.	15
Figura 2.13: (a) Chumacera superior y base, (b) Chumacera inferior y base.	15
Figura 2.14: (a) Sistema de transmisión, (b)Base para motor.	16
Figura 2.15: Diseño de Solidworks eje Z.	17
Figura 2.16: Estructura mecánica del robo eje Y.	18
Figura 2.17: Soleras de aluminio para el eje Y.	18
Figura 2.18 Piñón.	19
Figura 2.19: (a)Motor a pasos, (b) Piñón.	19
Figura 2.20: Dimensiones de cremallera.	21
Figura 2.21: (a) Cremallera, (b)Nylamid.	22
Figura 2.22: (a)Coples de Nylamid, (b)Baleros.	22
Figura 2.23 Diseño de Solidworks eje Y.	23
Figura 3.1: Diagrama robot cartesiano de 3 g.d.l.	24
Figura 4.1: Diagrama a bloques de nuestro sistema.	29
Figura 4.2: Motorreductor 37dx54L.	30
Figura 4.3: Voltaje Nominal.	32
Figura 4.4: Linealidad de la fuerza del motor.	33
Figura 4.5: Voltaje Nominal.	34
Figura 4.6: Linealidad de la fuerza del motor.	36
Figura 4.7: Encoder del Motorreductor.	36
Figura 4.8: Diagrama del Pic 18F4550.	37
Figura 4.9: Tarjeta Pic para hacer la comunicación.	38
Figura 4.10: Pic con FPGA.	39
Figura 4.11: Tarjeta FPGA.	40

Figura 4.12: Diagrama de Puente H.....	41
Figura 4.13: Puente H.	42
Figura 4.14: Diagrama de Puente H.....	42
Figura 4.15: Driver de motor a pasos.....	43
Figura 4.16: Capa superior.....	44
Figura 4.17: Capa inferior.....	44
Figura 4.18: Etapa de comunicación y potencia.	45
Figura 5.1: Diagrama de conexión USB.	46
Figura 5.2: Etapa de Comunicación.....	47
Figura 5.3: Diagrama de flujo del Pic.	47
Figura 5.4: Modulo de comandos de entrada.	48
Figura 5.5: Modulo de comandos.	49
Figura 5.6: Encoder.....	50
Figura 5.7: Arreglo de flip flops tipo D.	51
Figura 5.8: Maquina de estados del encoder.....	51
Figura 5.9: Bloque de conteo de las señales del encoder.....	52
Figura 5.10: Bloque de filtro digital.....	52
Figura 5.11: Módulos del control tangente hiperbólico.....	53
Figura 5.12: Maquina de estados para la ley de control tangente hiperbólica.	54
Figura 5.13 : (a) Frecuencia de 200Hz, (b) Frecuencia de 453Hz	56
Figura 5.14: Bloque de PWM.	57
Figura 5.15: Diagrama de flujo del PWM.....	57
Figura 5.16: Diagrama de flujo de divisor de frecuencia a 100Hz.	58
Figura 5.17: Bloque de motor a pasos.....	59
Figura 5.18: Maquina de estados para el motor a pasos.....	60
Figura 5.19: Firmware completo del robot cartesiano.	61
Figura 5.20: Bloque 1.....	62
Figura 5.21: Bloque 2.....	62
Figura 5.22 Bloque 3.....	63
Figura 5.23: Bloque 4.....	63
Figura 5.24: Bloque 5.....	64
Figura 5.25: Bloque 6.....	64
Figura 5.26: Bloque 7.....	65
Figura 5.27 Diagrama a bloques de la interfaz de usuario	65
Figura 5.28: Interfaz de usuario para mandar las posiciones deseadas.....	66
Figura 5.29: Call Library Function Node.....	68
Figura 5.30: Diagrama de configuración de librería mpushapi.....	68
Figura 5.31: SubVi de lectura y escritura.....	69
Figura 5.32: Diagrama de posición del eje X.....	70
Figura 5.33: Diagrama de Ganancia proporcional.	70
Figura 5.34: Diagrama de Ganancia Derivativa.....	71
Figura 5.35: Diagrama de posición del eje Z.	71
Figura 5.36: Diagrama de Ganancia Derivativa.....	72
Figura 5.37: Diagrama de Ganancia proporcional.	72
Figura 5.38: Diagrama de posición del eje Y.....	73

Figura 6.1: Grafica de linealidad de la fuerza del motor a 453 Hz	74
Figura 6.2: Grafica de linealidad de la fuerza del motor a 200hz.	75
Figura 6.3: señales del encoder.	76
Figura 6.4: Etapa de control.	76
Figura 6.5: Robot de 3 grados de libertad.	77
Figura 6.6: Panel de control.	78
Figura 6.7: Robot y etapa de control.	78
Figura 6.8: Grafica de torque del eje X.	79
Figura 6.9: Grafica de error del eje X.	80
Figura 6.10: Grafica de torque del eje Z.	80
Figura 6.11: Grafica de error del eje Z.	81
Figura 6.12: Valor de secuencias para 10 mm.	81
Figura 6.13 Valor de secuencias para 56 mm.	82
Figura 6.14: Implementación del sistema.	82

Índice de Tablas

Tabla 1: Estructura de robots manipuladores.	iii
Tabla 1.1: Características del robot cartesiano.	1
Tabla 2.1: Características del guía de movimiento lineal de alta precisión	7
Tabla 2.2: Dispositivo de protección contra la contaminación.	8
Tabla 2.3: Altura de los hombros de montaje.	9
Tabla 2.4: Características del piñon.	19
Tabla 4.1: Especificaciones del motor.	30
Tabla 4.2: Datos del Voltaje Nominal.	31
Tabla 4.3: Valores del ciclo de trabajo.	33
Tabla 4.4: Datos del Voltaje Nominal.	34
Tabla 4.5: Valores del ciclo de trabajo.	35
Tabla 5.1: Comandos de control.	48
Tabla 5.2: Secuencias de motor a pasos.	59
Tabla 6.1: Ciclo de trabajo.	74
Tabla 6.2: Ciclo de trabajo.	75
Tabla 6.3: Comparación de sistema estereotáxico y sistema desarrollado.	83

Introducción

En el área de investigación biológica encontramos sistemas estereotáxicos en configuración cartesiana para animales tales como ratas o ratones. Este tipo de dispositivos estereotáxicos que permiten hacer estudio de campos magnéticos biológicos los cuales son originados de las corrientes eléctricas que circulan en algunas células, como en el sistema nervioso y en el corazón, o en materiales magnéticos acumulados en ciertos órganos, como en el hígado y los pulmones.

“Un robot es un manipulador multifuncional reprogramable diseñado para mover materiales, partes, herramientas o dispositivos especializados a través de movimiento programados para la ejecución de una variedad de tareas [1].

Existen diversas aplicaciones en donde se requiere de un estudio espacial puntual respecto a la orientación y magnitud de fenómenos físicos o químicos que se manifiestan en el desempeño de sistemas biológicos, magnéticos, entre otros, ante muy diversos escenarios.

En aplicaciones biológicas, un prototipo similar al presente son los sistemas estereotáxicos utilizados ampliamente en intervenciones quirúrgicas mínimamente invasivas que utilizan coordenadas tridimensionales para localizar pequeñas estructuras dentro del cuerpo y para realizar acciones tales como ablación, biopsia, inyección, estimulación, implantación de dispositivos, radiocirugía, entre otras.


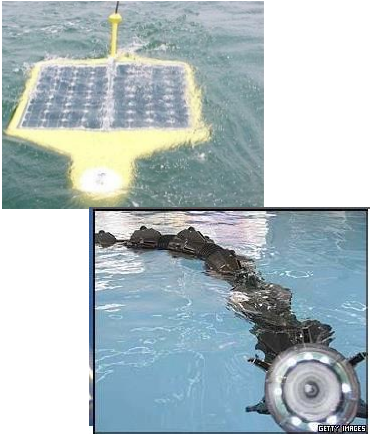
Los seres vivos son capaces de generar campos magnéticos. Actualmente, estos campos, a pesar de ser muy débiles, pueden ser detectados por instrumentos sofisticados. Estudios recientes sobre este fenómeno revelan que la detección y el análisis de los campos generados en órganos como el cerebro, corazón, pulmones, hígado y otros, pueden facilitar el diagnóstico y los tratamientos de diversas enfermedades, entre otras aplicaciones como la de cirugías de alto riesgo y estudios de campos magnéticos.

En general, las estructuras de los circuitos integrados (CI's) así como sus empaquetados tienen poca influencia eléctricamente hablando, y no radian por sí mismos energía. Las fuentes de Radio Frecuencia (RF) generadas por los CI's, tiene que interactuar con una estructura más grande conectada a la placa de un circuito impreso (PCB) para irradiar la energía. Sin embargo, el ruido acoplado derivado de los CI's en estructuras resonantes cerca de un PCB es un problema común en los sistemas digitales de alta velocidad.

Un robot cartográfico permite realizar un barrido sobre los CI, permitiendo conocer la interferencia y el acoplamiento electromagnético que puede producirse entre los distintos bloques que conforman al CI.

Tipos de robots

De una forma muy general los robots pueden ser clasificados como se muestra en la tabla 1.

<p>Móviles</p>	<p>Terrestres: Los terrestres generalmente se desplazan mediante ruedas o patas, aplicaciones como rastreo y traslado de objetos, limpieza del área del hogar, entre otros a continuación se muestran Ejemplos de Robots móviles terrestres.</p> 	<p>Marinos: Robots submarinos equipados con sensores para navegación dentro del agua como sonar, radar, visión telescópica, y sistemas electrónicos que permiten sumergirse y/o elevarse en la primera imagen se muestra un robot Autonomous Underwater Vehicle (AUV's) y posteriormente un robot marino de movimiento ondular.</p> 
<p>Humanoides</p>	<p>Humanoides: También conocidos como androides, los cuales son máquinas antropomórficas capaces de imitar movimientos del ser humano, el principal potencial del androide es que puede ser empleado en auxiliar personas en zonas de desastres, puede asistir a personas discapacitadas. En la siguiente imagen se muestran Ejemplos de Robots humanoides</p>	

	
<p>Industriales</p>	<p>Robots industriales: Son el tipo de robots más populares, debido a la importancia que ocupan en el sector industrial, ya que la automatización de procesos industriales es realizada a través de robots y esto trae como consecuencia competitividad, productividad, eficiencia y rentabilidad de las empresas. Los robots industriales también son conocidos como brazos robots o brazos mecánicos ya que asemejan a un brazo humano. En la siguiente imagen se muestran algunos Ejemplos de Robots industriales.</p> 

Tabla 1: Estructura de robots manipuladores.

Un robot industrial convencional está formado por un conjunto de eslabones o elementos interrelacionados mediante articulaciones que permiten un movimiento relativo entre eslabones consecutivos.

Existen diferentes tipos de articulaciones. Las más utilizadas en robótica son: la rotacional, prismática, cilíndrica, planar, esférica como se muestra en la figura 1.

La articulación rotacional suministra un grado de libertad consistente en una rotación alrededor del eje de la articulación.

Prismática, el grado de libertad consiste en una traslación a lo largo el eje de la articulación.

Cilíndrica existen dos grados de libertad: una rotación y una traslación.

La articulación planar está caracterizada por el movimiento de desplazamiento en un plano, existiendo por tanto dos grados de libertad.

Esférica, combina tres giros, en tres direcciones perpendiculares en el espacio.



Figura.1: Tipos de articulaciones.

Los grados de libertad son el número de parámetros independientes que fijan la situación del eslabón final. El número de grados por lo general coincide con el número total de eslabones

Configuración cartesiana.

En la figura 2 se muestra la configuración cartesiana que esta formada por tres articulaciones prismáticas, esta configuración es muy usual en estructuras industriales.

La especificación de la posición de un punto se efectúa mediante coordenadas cartesianas (x,y,z). Los valores que toman estas variables corresponden directamente a las coordenadas que toma el extremo del brazo.

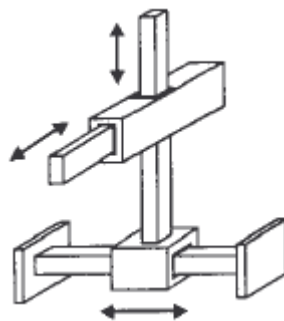


Figura 2: Robot configuración cartesiana.

Robot Cartesiano

Los robots cartesianos constan de una serie de componentes generales que se repiten en todas las concepciones que existen de este tipo de robot. Muchas labores de manipulación se pueden automatizar de forma sencilla con módulos lineales, accionados por servomotores. Tanto el posicionamiento como el perfil de movimiento de los módulos lineales se pueden controlar con exactitud para adaptarlo a las diferentes necesidades.

La combinación de dos o tres módulos lineales en dirección "X", "Y", y/o "Z" permite un

movimiento libre en el plano vertical y horizontal o en el espacio. Esto hace posible, múltiples soluciones de robótica.

Este tipo de robots cartesianos abordan un gran abanico de tareas de automatización tales como la manipulación y montaje de piezas y la realización de forma fiable, rápida y económica de diversos trabajos. Esto ofrece un potencial de racionalización enorme, gracias a los sistemas robóticos modulares. Por ejemplo en la figura 3 se muestra un sistema estereotáxico en configuración cartesiana.



Figura 3: Sistema estereotáxico de la empresa científica SEN.

Aplicaciones

Gracias al tipo de configuración de los robots cartesianos existen un gran número de aplicaciones en las que se pueden emplear, tanto en aplicaciones donde el espacio de trabajo sea muy grande como es el caso de un robot cartesiano CNC, hasta robots dedicados a la dosificación.

El sistema es de fácil programación utilizando la consola o el software basado en Windows 98/2000. El robot I&J2300 se suministra con una tarjeta de memoria de propósito general o de dosificación. Nuestros robots cartesianos interpolan automáticamente líneas y curvas en todos los ejes.

El modelo mostrado en la figura 4, I&J2300-4 incluye un cuarto eje rotacional. El potente software de programación incluye ayudas que permiten crear programas fácil y rápidamente.



Figura 4: Robot cartesiano j2300 de la empresa DOTEST.

En Los avances más recientes en la cirugía guiada se concentran en el desarrollo de sistemas robóticos quirúrgicos compatibles con resonancia magnética. Los sistemas quirúrgicos telerobóticos pueden ser utilizados en diversas Aplicaciones clínicas como laparoscopia, endoscopia, cirugías de cerebro encontramos sistemas estereotáxicos para animales tales como ratas o ratones. Este tipo de dispositivos estereotáxicos permiten hacer estudio de campos magnéticos biológicos y Medir tales campos, localizarnos en la región que los produce y determinar la intensidad de la corriente o la concentración de los materiales magnéticos acumulados.

Se obtiene alineamiento con precisión de electrodos, micropipetas y cánulas al usar este instrumento como se muestra en la figura 5.

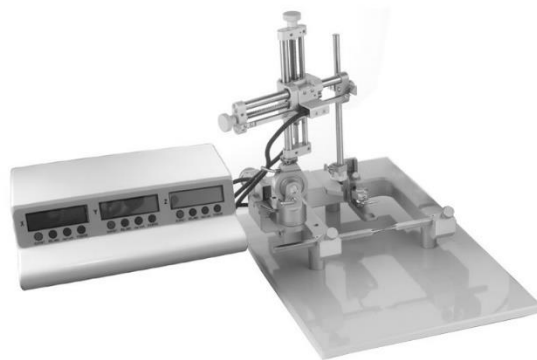


Figura 5: Sistema estereotáxico digital Med-int-048.

Objetivo general:

“Analizar, Diseñar, Modelar e implementar un robot (manipulador) modular de 3 grados de libertad en configuración cartesiana de propósito general, con una resolución de paso en el orden de las decenas de micras.”

Objetivos particulares

1. Estudiar y desarrollar el modelo cinemático de un robot cartesiano de 3 grados de libertad.
2. Estudiar y desarrollar el modelo dinámico de un robot cartesiano de 3 grados de libertad.
3. Diseñar la estructura mecánica del robot mediante la herramienta Solidworks
4. Implementar el robot cartesiano de 3 grados de libertad.
5. Desarrollar la electrónica para controlar el robot.
6. Desarrollar el software para controlar el robot.
7. Desarrollar la interfaz gráfica y de control
8. Realizar pruebas experimentales.
9. Escritura de la tesis.
10. Publicación de los resultados.

A continuación, se presenta un pequeño resumen de cada capítulo que se va abordar en esta tesis.

En el capítulo uno se presenta el diseño en Solidworks 2012 y las dimensiones del robot cartesiano de 3 grados de libertad.

En el capítulo dos se presenta la construcción del robot cartesiano, las partes mecánicas y los materiales que se utilizaron para el ensamble.

En el capítulo tres se presenta el modelo cinemático y dinámico del robot cartesiano de 3 grados de libertad.

En el capítulo cuatro se presenta el diseño y la construcción de la etapa de potencia y comunicación.

En el capítulo cinco se presenta el firmware y software que se desarrollaron y utilizaron para controlar el robot cartesiano de 3 grados de libertad.

En el capítulo seis Se presentan los resultados experimentales y todo el sistema cartesiano completo.

Capítulo 1 : Diseño y características del robot cartesiano

El robot de tres grados de libertad en configuración cartesiana se desarrolla por la necesidad de tener un dispositivo capaz de hacer un estudio espacial puntual con gran precisión. Se plantea de propósito general ya que no sólo se pretende usar en una sola aplicación, si no que puede ser modular. Una de las otras aplicaciones que se le desea dar a este robot, es para realizar el sensado de variables fisiológicas en mamíferos pequeños, por lo cual se necesita que este dispositivo sea capaz de hacer movimientos en las coordenadas “X,” Y” y “Z” con gran precisión y exactitud.

1.1. Características del robot cartesiano

Se hizo un estudio de los sistemas estereotaxicos, sus dimensiones, el tipo de configuración y los materiales utilizados. Con base a este estudio se pudo determinar el tipo de configuración y los materiales que se utilizaran para el diseño de cada uno de los ejes del robot cartesiano el diseño del sistema se realizó en Solidworks 2012 ya que es un software de gran importancia en el área de diseño. En la tabla 1.1 se muestra el tipo de configuración utilizada, tipo de motores, material utilizado para la construcción de cada uno de los ejes y el peso.

Estructura mecánica:	Tipo Cartesiano
Grados de libertad (GDL):	3 GDL
Rango de movimiento:	Eje Z (vertical) , eje X y Y(horizontal)
Retroalimentación:	Encoder de cuadratura con una resolución de 64 pulsos por revolución del eje del motor.
Actuadores:	-Motor de C.D. 12VCD con una caja de engranes de metal 131:1.
Capacidad de los motores:	80 RPM y 300 mA funcionando libremente, 250 oz-in (18 kg-cm) y hasta 5A .
Transmisión:	Cople L-045
Precisión en el movimiento lineal para el eje Z :	-Riel para guía lineal de 15mm -Bloque lineal para Guía de 15mm. -Tornillo embalado C/Tuerca de 12 mm.
Precisión en el movimiento lineal para el eje X :	-Riel para guía lineal de 20mm -Bloque lineal para Guía de 20mm. -Tornillo embalado C/Tuerca de 12 mm.
Precisión en el movimiento lineal para el eje Y :	-Cremallera y Piñon -Motor a pasos
Peso del eje X	3.555kg
Peso del eje Z	2.005kg
Peso del eje Y	705 gr
Peso total del sistema	6.265kg

Tabla 1.1: Características del robot cartesiano.

1.2. Diseño en Solidworks del eje X

El diseño del eje X tiene un recorrido de 300 milímetros(mm) cuenta con dos chumaceras que son alineadas por el tornillo embalado utilizado para convertir el movimiento rotacional del motor a movimiento lineal y así desplazar el bloque lineal de alta precisión, el bloque de alta precisión y el riel es de 20 mm de ancho, esta medida es la que se eligió por que el eje X es el que carga al eje Z y al eje Y por lo que se necesitaba una base más ancha y sólida para que nuestro sistema sea más estable como se muestra en la figura 1.1.

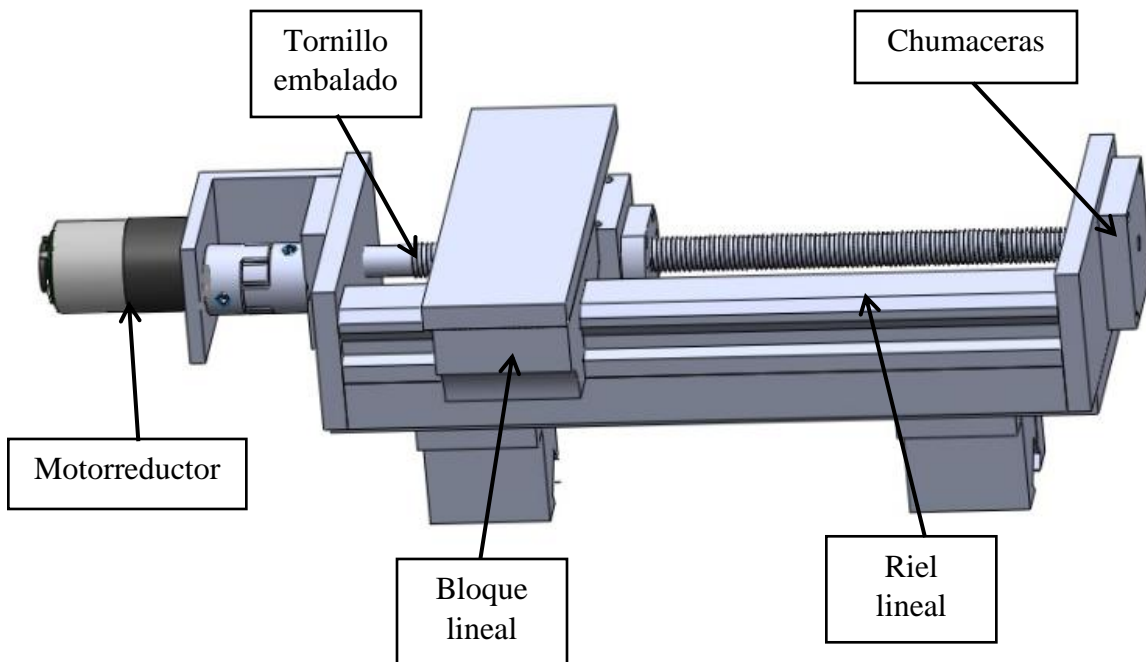


Figura 1.1: Diseño del eje X.

1.3 Diseño en Solidworks del eje Z

El diseño del eje Z tiene un recorrido de 250 milímetros(mm) para este eje se utilizó el mismo principio que en el eje X ya que se utilizó un riel de alta precisión y un bloque lineal de 15 mm ya que solamente cargara el eje Y.

También se diseñó con dos chumaceras que son alineadas por el tornillo embalado de 12 mm utilizado para convertir el movimiento rotacional del motor a movimiento lineal y así desplazar el bloque lineal de alta precisión, en el diseño se muestra un cople que nos ayudara alinear la flecha del motorreductor con el tornillo embalado como se muestra en la figura 1.2.

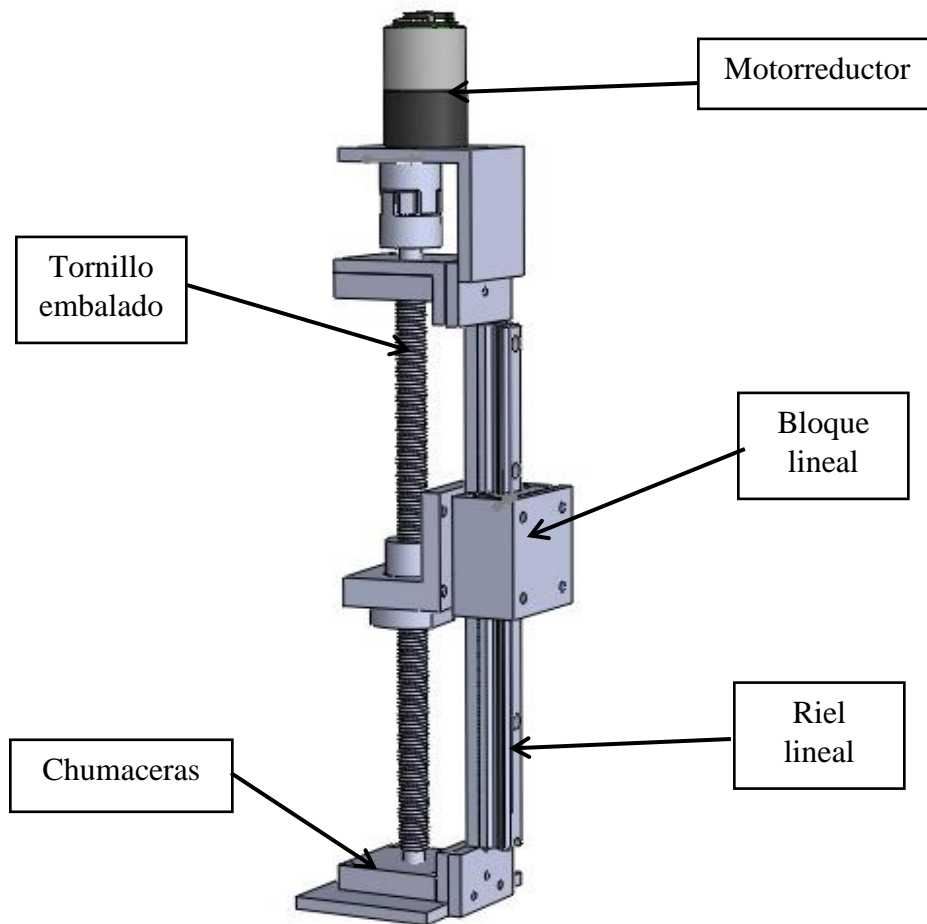


Figura 1.2: Diseño del eje Z.

1.4. Diseño en Solidworks del eje Y

El diseño del eje Y tiene un recorrido de 100 milímetros (mm) para este eje se utilizó una cremallera y un piñón que nos ayudará a convertir el movimiento rotacional a un movimiento lineal como se muestra en la figura 1.3.

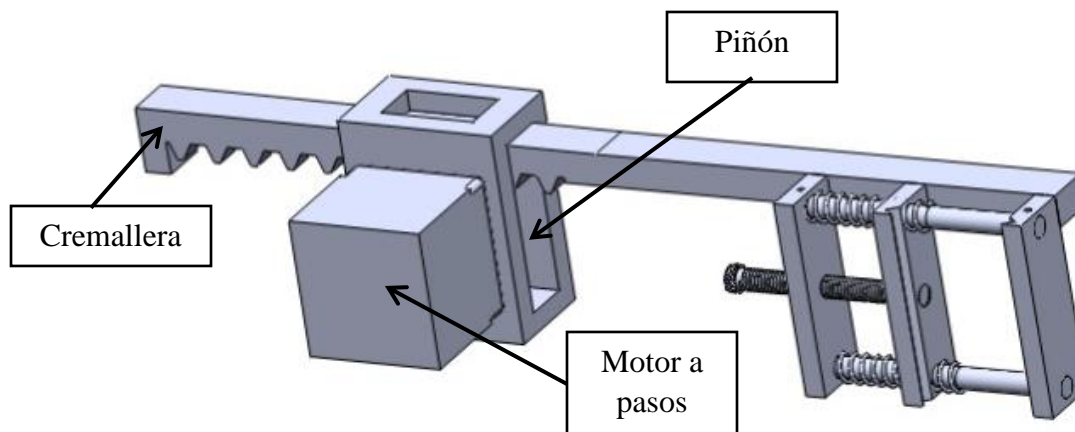


Figura 1.3: Diseño del eje Y.

1.5 Diseño en Solidworks del Robot de 3 GDL

Al realizar el diseño de los 3 ejes, en Solidworks se crea un proyecto de ensamblado donde se une el eje X, eje Z y eje Y como se muestra en la figura 1.4.

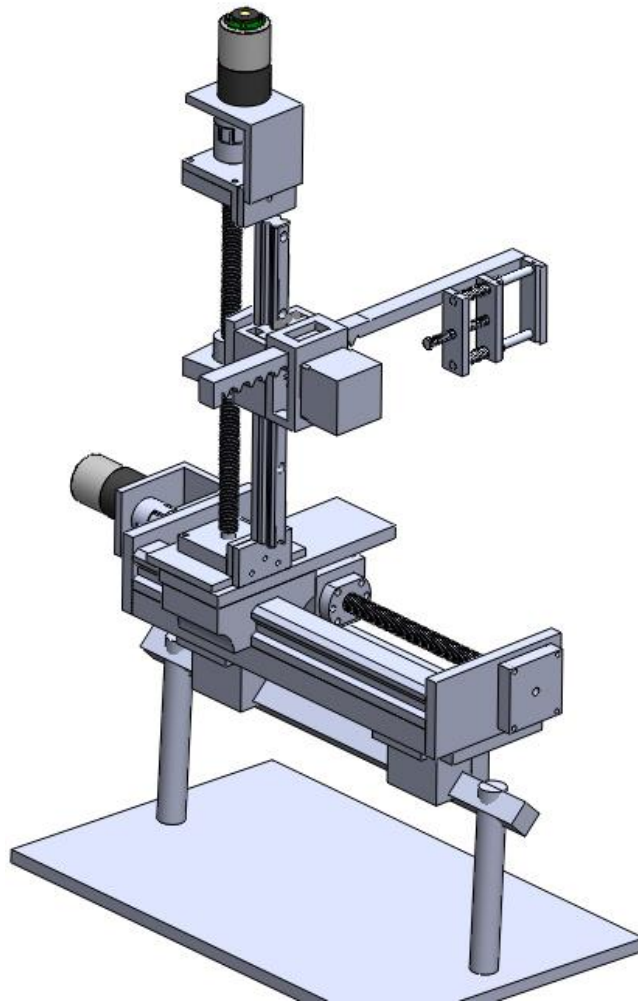


Figura 1.4: Robot de 3 gdl.

1.6. Conclusión

En este capítulo se presentó el diseño por etapas y el general final del sistema mecánico del robot cartesiano de tres grados de libertad ya que se realizaron varios diseños del robot pero este diseño fue el que mejores prestaciones nos ofrece porque es más ligero y robusto esto con el fin de que el robot sea portable y modular, el robot se diseñó en el software SolidWorks 2012. En este software se comprobó el correcto ensamblado del robot y el correcto movimiento de cada una de las piezas que se iban a maquinar para la construcción del robot.

Capítulo 2 . Sistema mecánico

En este capítulo se presenta la construcción del eje “X”, “Y” y “Z” del robot cartesiano y las partes mecánicas de cada uno de los ejes.

2.1. Construcción mecánica del eje X

Al haber finalizado el diseño en Solidworks continuamos con la construcción de nuestro robot. El eje X cuenta con un desplazamiento de 300 milímetros (mm) como se muestra en la figura 2.1 la configuración del robot es de tipo cartesiano, por lo que, se debe desplazar linealmente en el eje X.

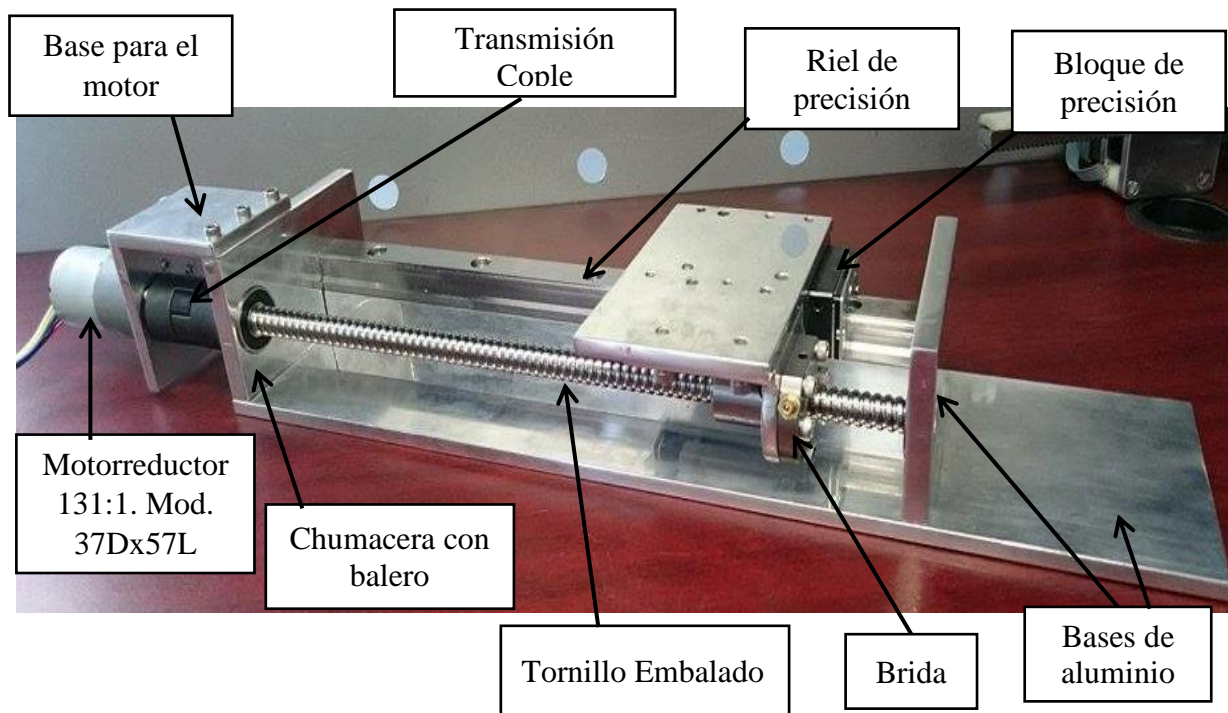


Figura 2.1: Estructura mecánica del robo eje X

Al realizar el diseño de nuestro robot en Solidworks y la construcción, a continuación, detallamos los materiales que se utilizan en el robot de 3 gdl para obtener la precisión que se requiere en este proyecto.

2.1.2. Guía de movimiento lineal tipo HSR

En la figura 2.2 se muestra la guía y el bloque lineal de precisión que se utiliza en la construcción de los ejes X y Z ya que para el eje X se utiliza un riel y un bloque de 20 mm de ancho y para el eje Z se utiliza uno de 15 mm.

Tipo estándar

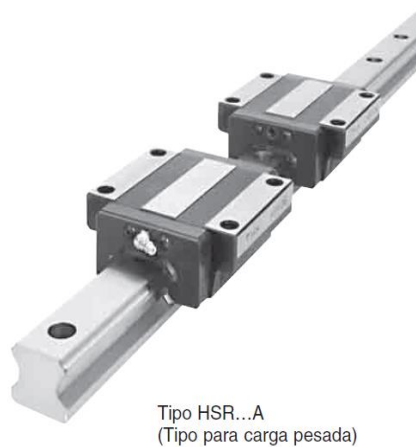


Figura 2.2: Guía de movimiento lineal tipo HSR.

En la guía lineal los balines o bolas ruedan a lo largo de las cuatro hileras de los anillos de rodaduras rectificadas formadas entre el riel de movimiento lineal HSR y el bloque de movimiento lineal HSR15A1SS. Las placas del extremo instaladas en ambos extremos del bloque de movimiento lineal hacen que las bolas circulen a lo largo de las pistas de rodamientos. Las placas de contención retienen las bolas para que no se caigan cuando se quita el bloque de movimiento lineal del riel de movimiento lineal. El bloque de movimiento lineal de bajo perfil está diseñado para ser altamente rígido de manera tal que el movimiento lineal sea muy preciso y constante.

En la tabla 2.1 se presentan las principales características de las guías de movimiento lineal como son la rigidez la capacidad de autoajuste y la durabilidad.

<p>IGUAL VALOR DE CARGA EN LOS 4 SENTIDOS</p>	<p>Cada hilera de bolas está dispuesta en un ángulo de contacto de 45° para que la guía de movimiento lineal tenga iguales valores de carga en las direcciones radiales, radial inversa y lateral. Esto permite que las guías de movimiento lineal tipo HSR operen efectivamente en cualquier orientación de montaje en un amplio rango de aplicaciones.</p>
--	--

<p style="text-align: center;">ALTA RIGIDEZ</p>	<p>Si la disposición de las cuatro-hileras de bolas está bien-equilibrada, a la guía de movimiento lineal se le puede dar una precarga suficiente. Esto permite que se aumente la rigidez de la guía de movimiento lineal sin ningún daño colateral.</p> <p>Los pernos de montaje y el bloque de movimiento lineal están diseñados para ser fuertes de modo que las guías de movimiento lineal tipo HSR se puedan usar en máquinas herramientas de trabajo pesado.</p>
<p style="text-align: center;">CAPACIDAD DE AUTO-AJUSTE</p>	<p>La disposición cara-a-cara de las ranuras de arco circular brindan una capacidad de auto-ajuste. Esto le permite a la guía de movimiento lineal compensar errores en las superficies de montaje aún cuando la guía de movimiento lineal esté precargada. El movimiento lineal resultante es muy preciso y suave.</p>
<p style="text-align: center;">EXCELENTE DURABILIDAD</p>	<p>Dada una precarga o cargas desparejas, las bolas no producirán ninguna diferencia en el desplazamiento, por lo que las bolas rodarán y circularán suavemente. Esto le brinda a la guía de movimiento lineal una excelente resistencia al desgaste, de esta manera se mantiene la precisión durante un largo período.</p>

TABLA 2.1: Características del guía de movimiento lineal de alta precisión

El bloque de movimiento lineal tiene orificios para tornillos auto roscantes de modo que es apropiado para la construcción superpuesta para un fácil montaje. Del tipo de cuatro pernos como se muestra en la figura 2.3.

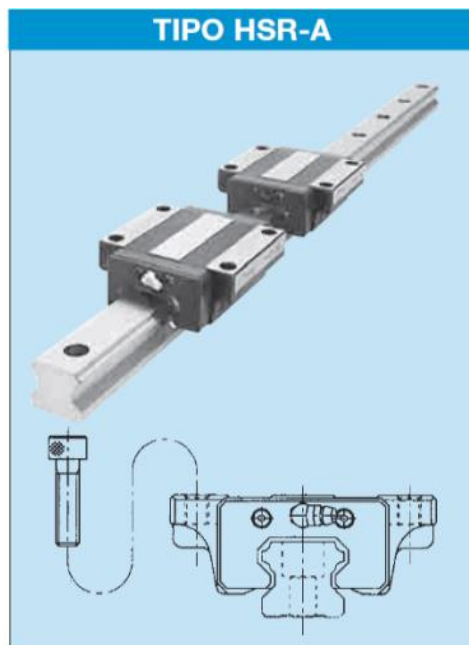


Figura 2.3: Tipo para cargas pesadas estándar

Para especificar los dispositivos de protección contra la contaminación para las aplicaciones deseadas utiliza el símbolo listado en la tabla 2.2.

Dispositivos de protección contra la contaminación	Símbolo
Con sellos del extremo en los dos extremos	UU
Con sellos del extremo y laterales	SS

Tabla 2.2: Dispositivo de protección contra la contaminación.

Las guías de movimiento lineal tipo HSR están equipadas con sellos de los extremos y sellos laterales como una característica estándar estos sellos se muestran en la figura 2.4 inciso a) y b).

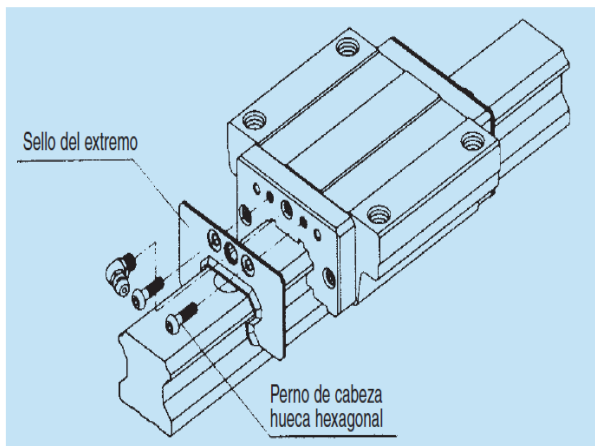
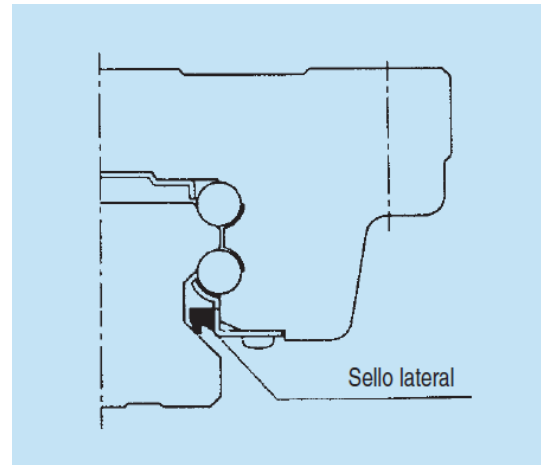


Figura 2.4: (a) Sello del extremo



(b) Sello lateral.

Para que el montaje sea fácil y altamente preciso, las superficies de montaje deben tener los hombros apoyados contra lo que se presionan el riel de movimiento lineal y el bloque de movimiento lineal, para saber la altura de los hombros de montaje. Para evitar interferencia de las esquinas del riel o bloque de movimiento lineal con los filetes de los hombros, los filetes del hombro deben tener un chaflán o un radio menor al especificado en la tabla 2.3.

2.1.2. Tornillo Embalado

Unidad: mm

Número de modelo	Radio del filete r (máximo)	Altura del hombro apropiado para el riel de movimiento lineal de H ₁	Altura del hombro apropiado para el bloque de movimiento lineal de H ₂	E
HSR 15	0.5	3	4	3.5

Tabla 2.3: Altura de los hombros de montaje.

Un eje roscado proporciona un camino de rodadura helicoidal a unos rodamientos de bolas que actúan como un tornillo de precisión. Como el movimiento se realiza por rotación, no por deslizamiento, el rozamiento es menor, la fricción del conjunto es baja. Y como el esfuerzo se reparte entre varias bolas, es capaz de aplicar o resistir altas cargas de empuje. Se pueden fabricar con unas tolerancias estrechas y por tanto son adecuados para su empleo donde se necesita una alta precisión. El conjunto de bolas actúa como la tuerca mientras el eje roscado es el tornillo. En contraste con los husillos convencionales, los husillos a bolas tienden a ser bastante voluminoso, debido a la necesidad de disponer un espacio en el mecanismo para recircular las bolas.

Alta precisión ejes de los tornillos tiene habitualmente una precisión de 830 nanómetros por centímetro (1/1000 de una pulgada por pie) o mejor. Los ejes de los husillos de instrumento de

calidad suelen tener una precisión de 250 nanómetros por centímetro. Se fabrican en máquinas de fresado de precisión con equipo de medición óptica de distancia y herramientas especiales. Se utilizan máquinas similares para producir lentes ópticas y espejos. La baja fricción de los husillos de bolas se traduce en una alta eficiencia mecánica en comparación con otras alternativas. Un husillo de bolas usuales puede alcanzar una eficiencia del 90%, en comparación con el 50% de un husillo Acme de igual tamaño. La falta de fricción de deslizamiento entre la tuerca y el tornillo permite una larga vida útil del conjunto del husillo (especialmente en los sistemas *sin holgura*), la reducción de los tiempos entre mantenimiento y sustitución de piezas y a la disminución de las necesidades de lubricación. Esto, combinado con la mejora del rendimiento global y la reducción del consumo energético pueden permitir compensar los mayores costes de adquisición de los husillos a bolas. En la figura 2.5 se puede observar el tornillo embalado y husillo utilizado en la construcción de los ejes X y Z.



Figura 2.5: Tornillo embalado.

Las dimensiones del tornillo embalado se observan en la figura 2.6.

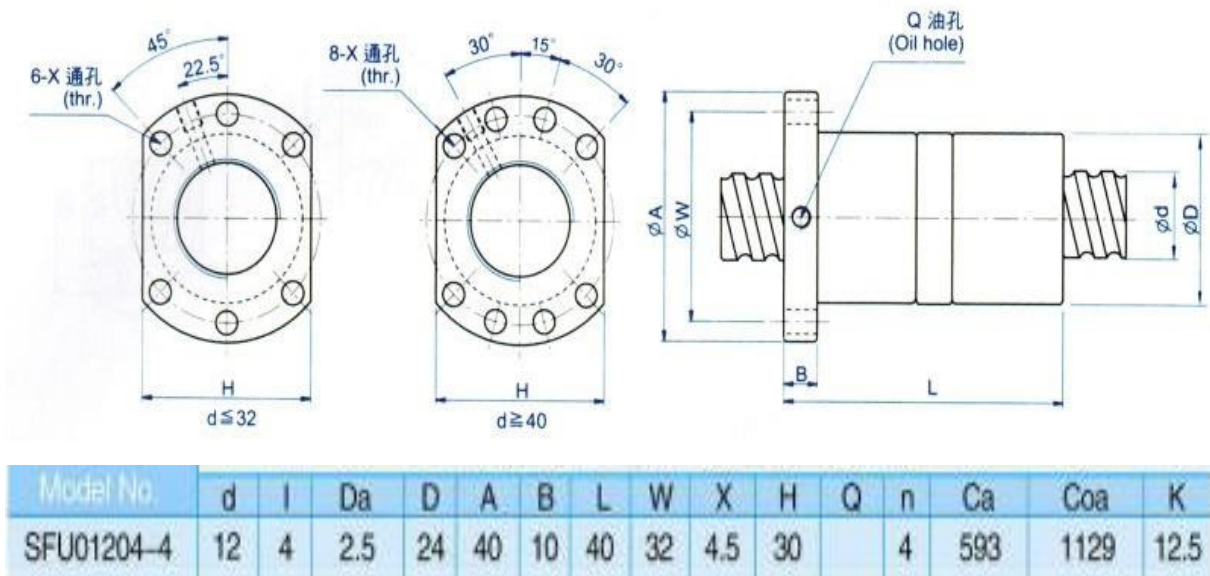


Figura 2.6: Dimensiones del tornillo embalado.

2.1.3 Tuerca de husillo de apoyo

Una tuerca de apoyo es un elemento que une dos componentes mecánicos, permitiendo ser desmontado sin operaciones destructivas al sistema, la brida diseñada para acoplar el tornillo embalado y el riel de precisión está construida con material de aluminio, esto para evitar que el eje cargue masa extra y el desempeño del eje sea el correcto ver Figura 2.7, inciso a) y b).

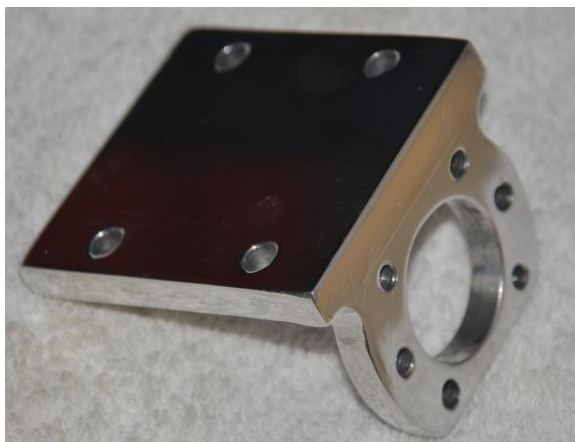


Figura 2.7: (a) Tuerca de apoyo



(b) Tuerca de apoyo y Tornillo.

2.1.4. Chumaceras

Las chumaceras tienen la función de girar, el movimiento de una parte respecto de otra con la mínima fricción y máxima exactitud, las chumaceras diseñadas para este sistema son de material de aluminio ver Figuras 2.8 inciso a) y b).



Figura 2.8: (a) Chumaceras



(b) Chumacera lateral.

La chucera consta de dos placas de aluminio que en su interior tiene un balero de la marca SKF para poder darle movilidad al tornillo embalado, con la menor fricción en el sistema.

2.1.5. Sistema de transmisión

El movimiento de cada articulación es dado por un motor de CD asociado a ella, el motor está en acoplada directamente con ayuda de un Cople L-045. Ver figura 2.9 inciso a) y b).

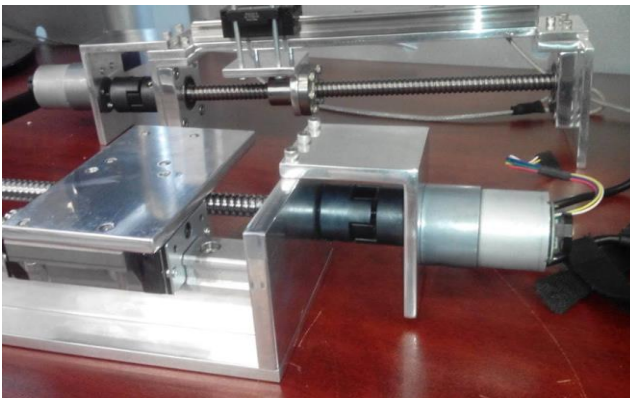


Figura 2.9:(a) Sistema de transmisión



(b) base para motor.

2.1.6. Resolución teórica del eje X

Una de las incógnitas más grandes que tenemos en la fabricación del sistema es saber si podremos obtener la precisión deseada en nuestro grado de libertad del sistema, necesitamos comprobar si teóricamente podemos obtener la precisión deseada

El motor que tenemos en nuestro sistema es de 131:1 como se observa en la figura 2.10, tiene una resolución en el encoder de 64 conteos por giro del motor, que estos a su vez de la salida de la caja de engranes nos ofrecen 8400 pulsos por cada vuelta. De acuerdo a esta fórmula obtendremos la resolución del eje X.

Para nuestro eje X

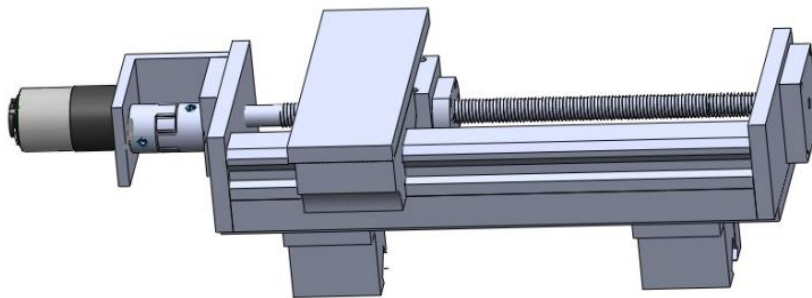


Figura 2.10: Diseño de Solidworks eje X.

La resolución teórica con la que cuenta el eje X está determinada por la siguiente ecuación.

$$\Delta_x = \frac{L_x}{M \cdot R \cdot C} = \frac{300mm}{50 \cdot 131 \cdot 64} = 0.71\mu m \quad (2.1)$$

donde:

Δ_x = Resolución teórica en el eje X

L_x = Longitud total efectiva del eje X

M = Numero de vueltas necesarias para desplazar L_x

R = Reducción de la caja de engranes del motor

C = Resolución de conteos por vuelta del motor.

La resolución con la que cuenta el eje X es de aproximadamente $0.71\mu m$, esto es lo que puede alcanzar el eje X teóricamente, por cada pulso leído del encoder del motorreductor.

2.2. Construcción mecánica del eje Z

En la figura 2.11, se puede apreciar la estructura mecánica del robot y las partes que la componen para su diseño, la configuración del robot es de tipo cartesiano, por lo que, se debe desplazar linealmente en el eje z.

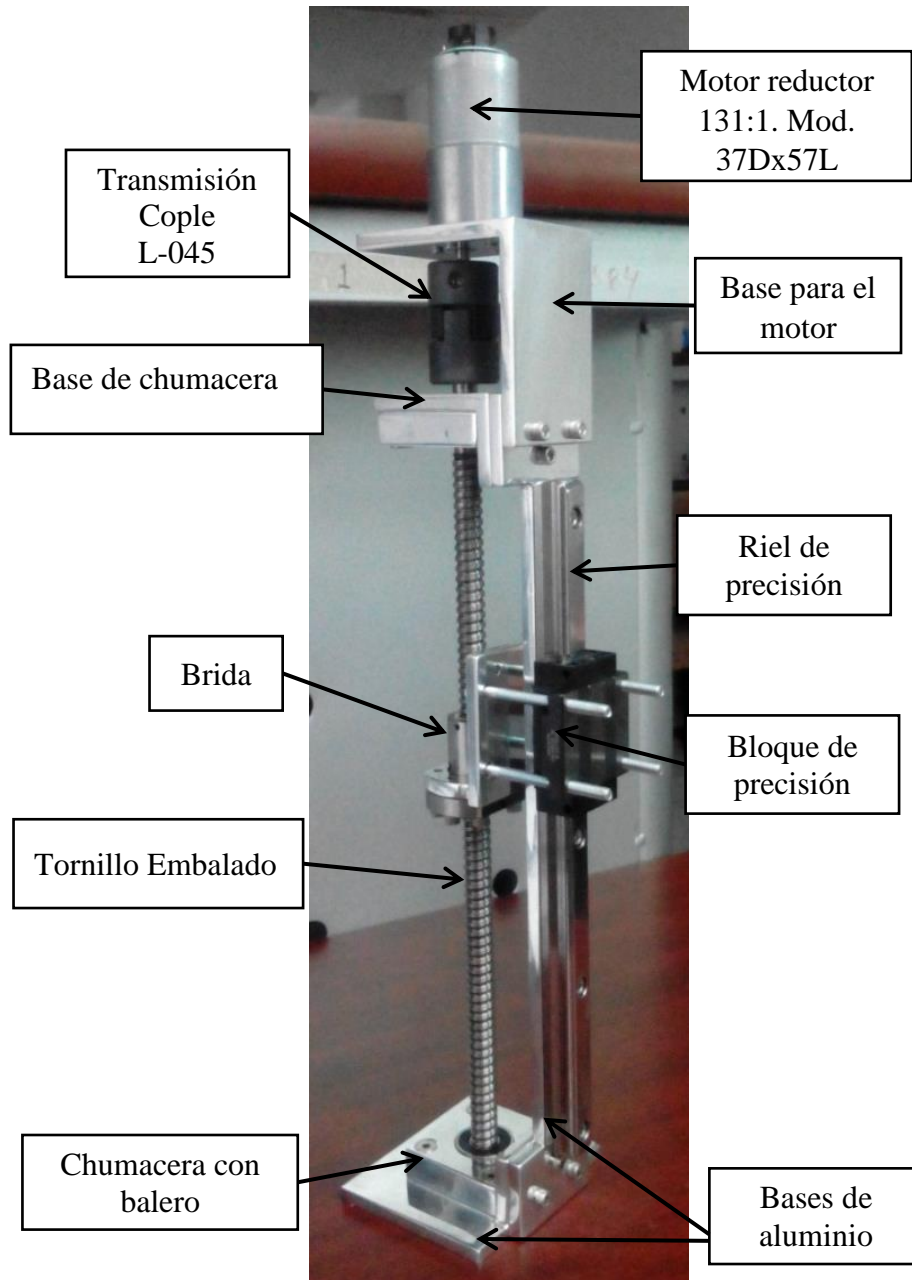


Figura 2.11: Estructura mecánica del eje Z.

2.2.1. Tuerca de husillo de apoyo (Brida).

Una tuerca de apoyo es un elemento que une dos componentes mecánicos, permitiendo ser desmontado sin operaciones destructivas al sistema, la brida diseñada para acoplar el tornillo embalado y el riel de precisión está construida con material de aluminio, esto para evitar que el eje cargue masa extra y el desempeño del eje sea el correcto ver figura 2.12 inciso a) y b).

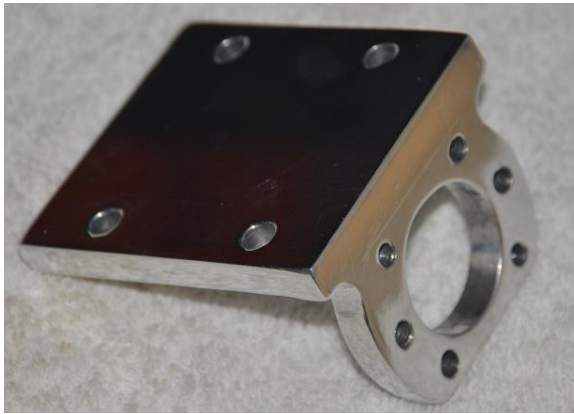


Figura 2.12: (a)Tuerca de apoyo



(b)Tuerca de apoyo con tornillo

2.2.2 Chumaceras

Las chumaceras tienen la función de girar el movimiento de una parte respecto de otra con la mínima fricción y máxima exactitud, las chumaceras diseñadas para este sistema son de material de aluminio ver figuras 2.13 inciso a) y b).

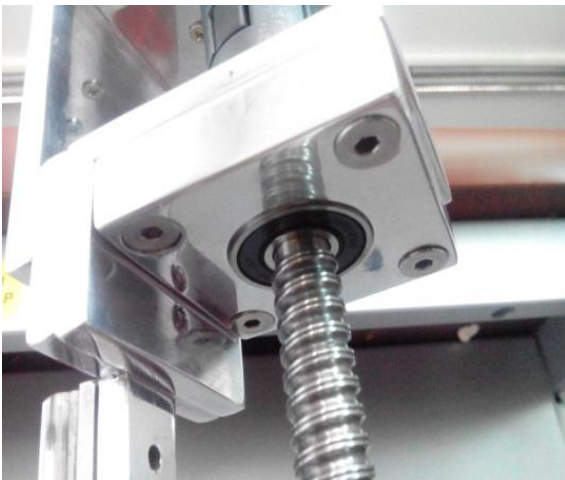
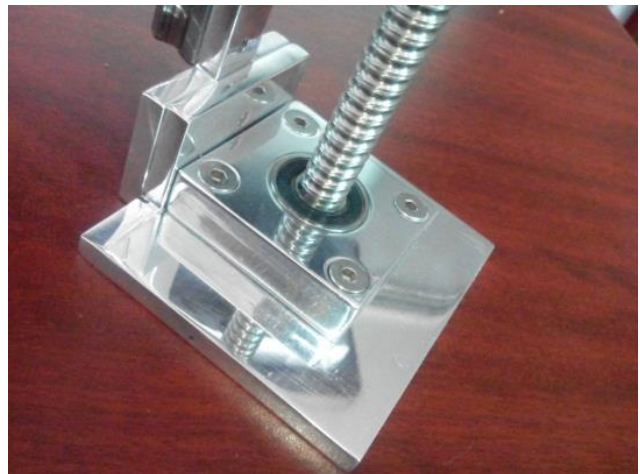


Figura 2.13: (a) Chumacera superior y base



(b) Chumacera inferior y base.

La chumacera consta de dos placas de aluminio que en su interior tiene un balero de la marca SKF para poder darle movilidad al tornillo embalado, con la menor fricción en el sistema.

2.2.3. Sistema de transmisión

El movimiento de cada articulación es dado por un motor de CD asociado a ella, el motor está acoplado directamente como se observa en la figura 2.14 inciso a) y b) con ayuda de un Cople L-045.

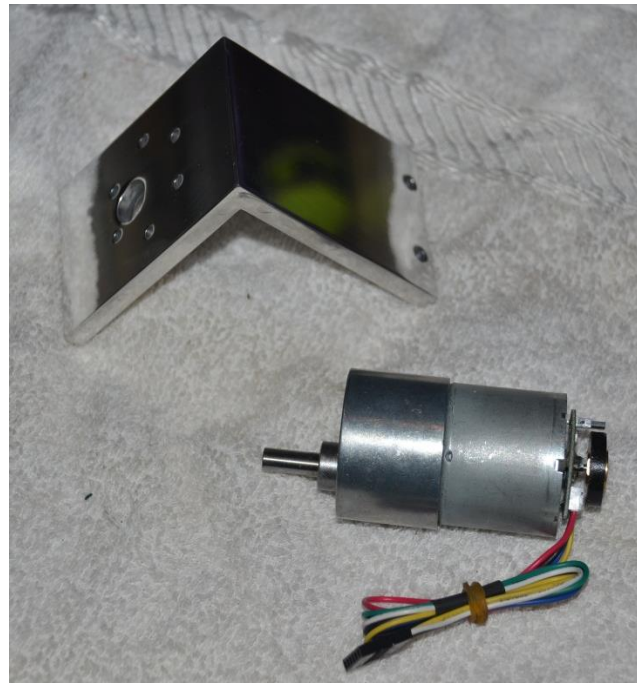
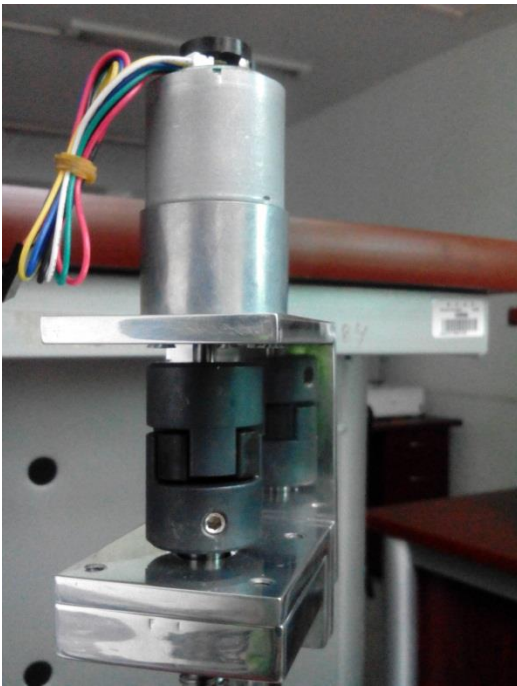


Figura 2.14: (a) Sistema de transmisión

(b) Base para motor.

2.2.4 Resolución teórica del eje Z

Para nuestro eje Z el motor que tenemos en nuestro sistema es de 131:1 como se observa en la figura 2.15, tiene una resolución en el encoder de 64 conteos por giro del motor, que estos a su vez de la salida de la caja de engranes nos ofrecen 8400 pulsos por cada vuelta. De acuerdo a esta fórmula obtendremos la resolución del eje Z.

La resolución teórica con la que cuenta el eje Z está determinada por la siguiente ecuación.

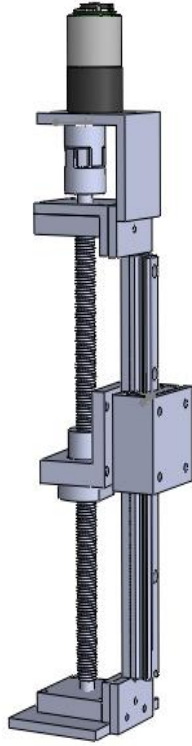


Figura 2.15: Diseño de Solidworks eje Z.

$$\Delta_z = \frac{L_z}{M * R * C} = \frac{250mm}{48 * 131 * 64} = 0.62\mu m \quad (2.2)$$

donde:

Δ_z = Resolución teórica en el eje Z

L_z = Longitud total efectiva del eje Z

M = Numero de vueltas necesarias para desplazar LZ

R = Reducción de la caja de engranes del motor

C = Resolución de conteos por vuelta del motor.

La resolución con la que cuenta el eje Z es de aproximadamente $0.62\mu m$, esto es lo que puede alcanzar el eje Z teóricamente, por cada pulso leído del encoder del motorreductor.

2.3. Construcción mecánica del eje Y

Para el último eje se utilizó una cremallera y un piñón ya que el mecanismo de piñón y cremallera permite transformar el movimiento circular en rectilíneo como también puede transformar el movimiento rectilíneo en movimiento circular. El eje Y, cuenta con un desplazamiento de 100 milímetros (mm) ver figura 2.16 donde se puede apreciar la estructura mecánica del eje y las partes que la componen.

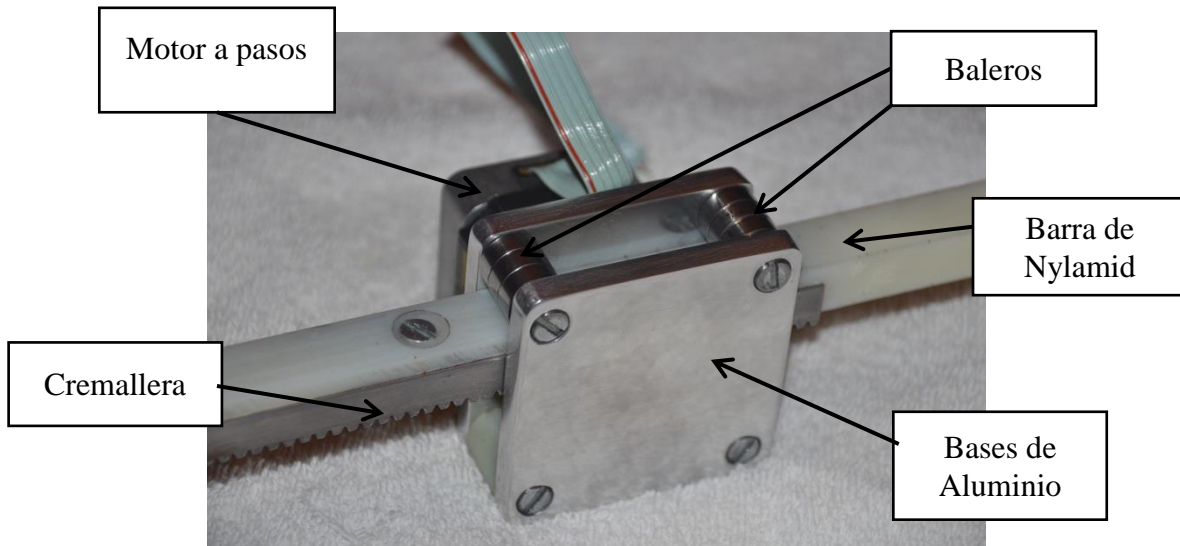


Figura 2.16: Estructura mecánica del robo eje Y.

A continuación, se muestran cada una de las partes físicas del eje Y.

En la figura 2.17 se muestra las soleras de aluminio que nos van ayudar a sujetar el motor, la cremallera y el piñón una de estas soleras nos servirá para poder ensamblar el eje Y en el eje Z.



Figura 2.17: Soleras de aluminio para el eje Y.

2.3.1. Piñón

Se utilizó un piñón como se muestra en la figura 2.18.

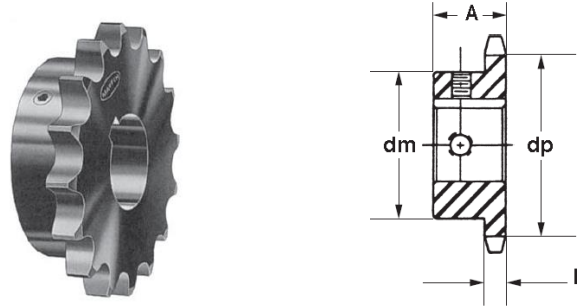


Figura 2.18 Piñón

En la tabla 2.4 se muestran las características y dimensiones del piñón.

Z Nº dientes	Dp Diámetro prim.(mm)	A Ancho total(mm)	B Ancho diente(mm)
21	25	30	15

Tabla 2.4: Características del piñón.

En la figura 2.19 inciso a) y b) se muestra el motor a pasos con el piñón el cual nos servirá para desplazar la cremallera de forma lineal.



Figura 2.19: (a) Motor a pasos



(b) Piñón.

2.3.2 Nylamid

Para el eje Y se utilizó un plástico llamado NYLAMID ya que ofrece múltiples alternativas de solución a estos requerimientos. Estos productos son plásticos de ingeniería de varias familias de polímeros, como nylon, polietileno y acetal, entre otros, fabricados por vaciado, moldeo por compresión y extrusión, de acuerdo a los adelantos más recientes de la tecnología de los plásticos, los beneficios son los siguientes:

Buena relación Costo-Beneficio. El rendimiento de las piezas fabricadas con productos de Nylamid, en combinación con el precio, es sin duda el principal motivo para su aplicación, ya que en algunas ocasiones existan materiales más baratos, su limitada durabilidad generan gastos extras derivados de la mayor frecuencia de recambio de las refacciones, los paros para mantenimiento, montaje y desmontaje, etc.

Facilidad de maquinado. Por su suavidad la mayoría de estos productos se maquinan mucho más rápido que los metales, dando como resultado, ahorros muy significativos.

Ligereza. Por pesar menos que los metales, los plásticos exigen menor esfuerzo de los motores, contribuyendo así a consumir menos energía.

Decremento en el consumo de lubricantes. Gracias a su bajo coeficiente de fricción el Nylamid ayuda a reducir el consumo de lubricantes y en algunos casos hasta lo elimina.

Reducción en el nivel de ruido. La capacidad de absorción de impactos tan característica de los plásticos ayuda a disminuir la emisión de ruido provocado por las partes que trabajan en movimiento y en contacto directo entre sí.

2.3.3. Cremallera.

Se utilizó una Cremallera Modulo 1.0; debido a que

La fabricación de equipos de precisión en tracciones de maquinaria CNC, su dentado fino la hace ideal para transformar el movimiento rotacional de los Motores a pasos o Servos en movimiento lineal, logrando una excelente relación entre velocidad y torque en mecanismos de control de posicionamiento, como Routers CNC, Plasma CNC, Laser CNC y otros....

En la figura 2.20 se muestran las dimensiones y Características de fabricación de la cremallera

- Fabricadas en Acero C-k 45
- Dentado recto
- Ángulo de presión 20 Grados

- Para Montaje Continuo, logrando cualquier largo.

Dimensiones

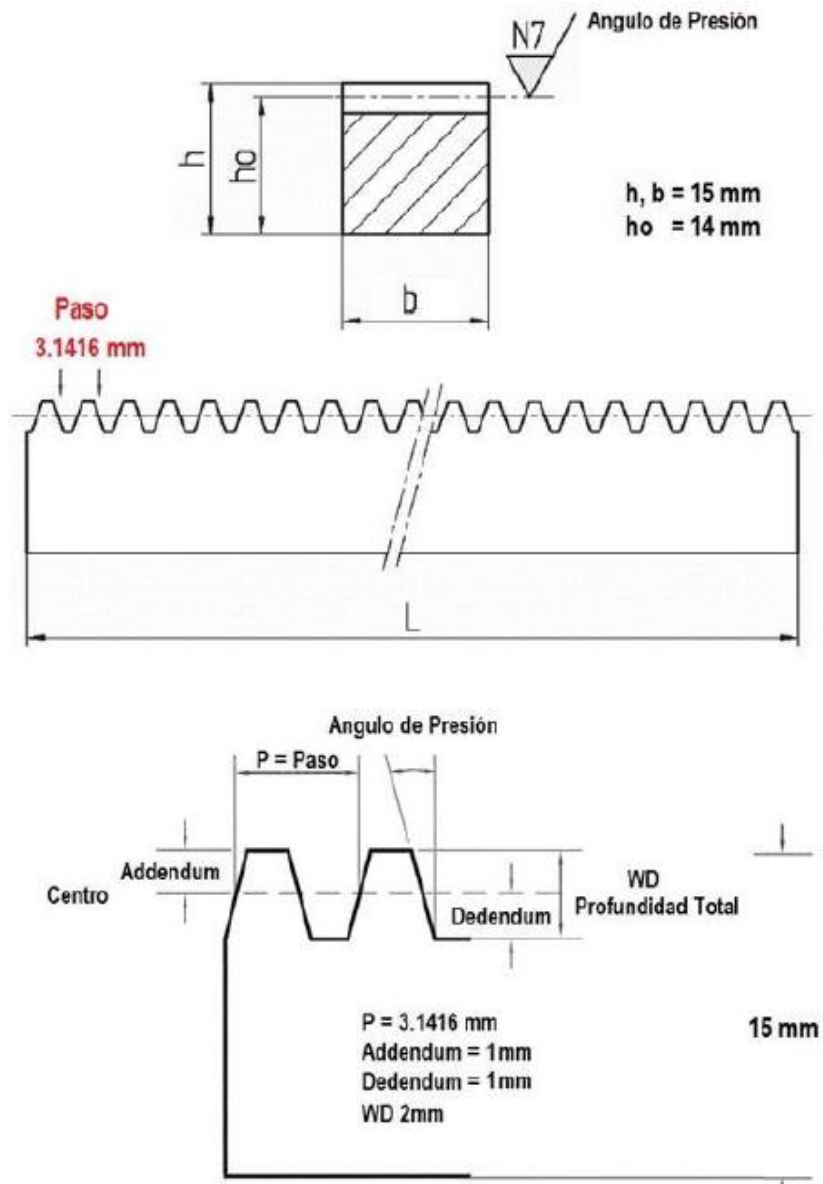


Figura 2.20: Dimensiones de cremallera.

En la figura 2.21 se muestra la cremallera que tiene una longitud de 150 milímetros y va a tener un recorrido de 100 milímetros, también se muestra la barra de Nylamid el cual se va a utilizar para posicionar la herramienta



Figura 2.21: (a) Cremallera

(b)Nylamid.

Por ultimo en la figura 2.22 se muestran los baleros que tienen un diámetro exterior de 13 milímetros y diámetro interior de 6 milímetros estos baleros ayudaran a que la cremallera se desplace de manera uniforme, también se cuenta con dos coples hechos de Nylamid que nos van ayudar a sujetar las dos soleras



Figura 2.22: (a)Coples de Nylamid

(b)Baleros.

2.3.4. Resolución teórica del eje Y

Para poder obtener la resolución del eje Y primero se tuvo que sacar la resolución del motor a pasos que se observa en la figura 2.23 ya que con 200 pulsos del motor tenemos una vuelta completa entonces hacemos la relación de:

$$200 \text{ pulsos equivale una vuelta de } 360^\circ \quad (2.3)$$

Por lo tanto

$$\frac{360^\circ}{200} = 1.8^\circ \text{ esto es igual a tener 1 pulso } \rightarrow 1.8^\circ \quad (2.4)$$

Al tener esto en cuenta la resolución de nuestro eje Y con la cremallera y el piñón es de:

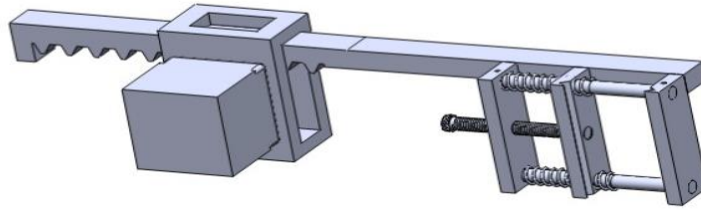


Figura 2.23 Diseño de Solidworks eje Y

$$D = \frac{z}{n} = \frac{21}{3.5} = 6cm \quad (2.5)$$

donde:

D= Distancia en (cm)

Z= Numero de dientes del piñón

n= Numero de dientes en un cm de la cremallera

1 rev → 360° una vuelta completa del motor equivale a 6cm en la cremallera

$$360^\circ \rightarrow 0.06m \quad X_m = \frac{(0.06) \cdot (1.8^\circ)}{360} = 300\mu m \quad (2.6)$$

$$1.8^\circ \rightarrow X_m$$

2.4 Conclusión

En este capítulo se realizó la construcción del robot cartesiano ya que al ocupar rieles de alta precisión y bloques lineales de precisión ofrecen un buen desplazamiento evitando la fricción, gracias a la poca fricción que existe en los ejes se puede alcanzar la precisión que se necesita obtener, también se utilizaron tornillos embalados, estos tornillos proporcionan ganancia de par para el movimiento de los ejes, los tornillos al igual que los rieles son utilizados en la industria en sistemas de alta precisión para lograr precisión y exactitud necesaria a los sistemas mecánicos.

Se implementó una cremallera y piñón para poder convertir el desplazamiento rotacional del motor a pasos a movimiento lineal, también se utilizó un material llamado Nylamid el cual sobresale del robot para poder realizar las mediciones correspondientes y que no haya ninguna interferencia con el campo magnético.

Capítulo 3 : Cinemática y Dinámica.

En este capítulo se desarrollará la matemática para obtener el modelo cinemático y dinámico del robot de 3 Gdl.

3.1 Modelo Cinemático

La cinemática se encarga de estudiar el movimiento del robot con respecto al sistema de referencia, permitiendo la identificación de la posición y orientación del elemento final del robot sin considerar las fuerzas o momentos que originan el movimiento. La cinemática directa se encarga de determinar la posición del elemento final con respecto al sistema de referencia [9].

En otras palabras, el modelo cinemático directo, describe la relación entre la posición articular q y la posición y orientación x como se observa en la figura 3.1. El dispositivo terminal del robot, es decir, el modelo cinemático directo de un robot es una relación de la forma.

$$x = f(q) \quad (3.1)$$

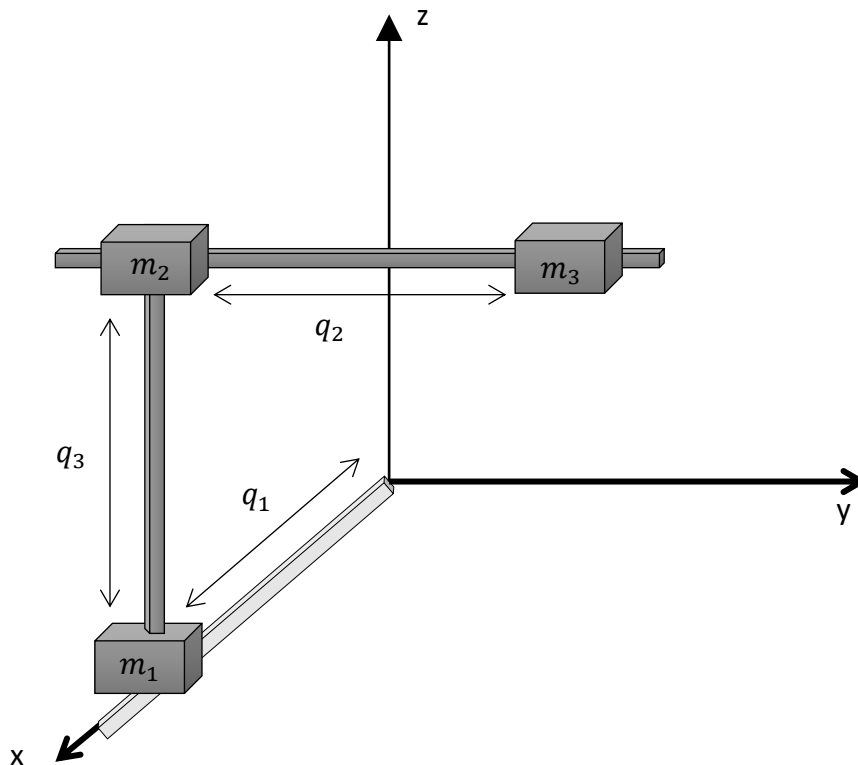


Figura 3.1: Diagrama robot cartesiano de 3 G.d.l.

El modelo cinemático directo del robot cartesiano de acuerdo a la figura 3.1 queda representado de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ q_2 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

3.2 Modelo Dinámico

Uno de los procedimientos más empleados para la obtención de modelos dinámicos de los robots, en forma cerrada, es el basado en las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange. El empleo de las ecuaciones de Euler-Lagrange para el modelado, requiere de dos conceptos importantes: La energía cinética y la energía potencial.[9]

La energía total \mathcal{E} de un robot manipulador de n.g.l. es la suma de sus energías cinética K y potencial U :

$$\varepsilon(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) + U(q) \quad (3.3)$$

El lagrangiano $L(q, \dot{q})$ de un robot de n.g.l. es la diferencia entre su energía cinética K y su energía potencial U :

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - U(q) \quad (3.4)$$

Las ecuaciones de movimiento de Euler- Lagrange para un manipulador de n.g.l, vienen dadas por:

$$\tau = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] - \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q} \right] \quad (3.5)$$

donde τ representa las fuerzas y pares ejercidos externamente por accionadores en cada articulación, así como fuerzas no conservativas. Como fuerza no conservativa se incluyen las de fricción, las de resistencia al cambio de movimiento de un objeto dentro de un fluido, y en general las que dependen del tiempo o de la velocidad.

Las posiciones articulares correspondientes a cada articulación del robot, que se miden por sensores colocados en los accionadores localizados generalmente justo en las articulaciones, se agrupan para propósitos de análisis en el vector de posiciones articulares q . En consecuencia, para un robot con n articulaciones, es decir, de n G.D.L., el vector de posiciones articulares q tendrá n elementos:

Cinemática directa se muestra en la ecuación 3.6.

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

El modelo cinemático directo del robot cartesiano de acuerdo a la figura 18 queda representado de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ q_2 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

La energía cinética total del robot viene dada por:

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} m v^2 \quad (3.8)$$

donde la velocidad es la derivada de la posición.

$$v = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$v_1 = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$v_2 = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{q}_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$v_3 = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Elevando al cuadrado nos queda de la siguiente manera.

$$V^2 = \|V\|^2 = V^T V = \begin{bmatrix} V_1 & V_2 & V_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$v_1^2 = \|v_1\|^2 = [\dot{q}_1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \dot{q}_1^2 \quad (3.14)$$

$$v_2^2 = \|v_2\|^2 = [0 \quad \dot{q}_2 \quad 0] \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{q}_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \dot{q}_2^2 \quad (3.15)$$

$$v_3^2 = \|v_3\|^2 = [0 \quad 0 \quad \dot{q}_3] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \dot{q}_3^2 \quad (3.16)$$

Ahora que tenemos las ecuaciones de las velocidades obtenemos las ecuaciones de la energía cinética para cada grado de libertad

$$K_1(q, \dot{q}) = \frac{m_1 \dot{q}_1^2}{2}, \quad (3.17)$$

$$K_2(q, \dot{q}) = \frac{m_2 (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2)}{2}, \quad (3.18)$$

$$K_3(q, \dot{q}) = \frac{m_3 (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + \dot{q}_3^2)}{2}, \quad (3.19)$$

Sumando todas estas energías tenemos que la energía cinética total está dada como:

$$K_1(q, \dot{q}) = \frac{m_1 \dot{q}_1^2}{2} + \frac{m_2 (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2)}{2} + \frac{m_3 (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + \dot{q}_3^2)}{2} \quad (3.20)$$

Aplicando algebra queda de la siguiente manera:

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} m_1 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{q}_2^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{q}_2^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{q}_3^2 \quad (3.21)$$

Factorizamos la ecuación:

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} [m_1 + m_2 + m_3] \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} [m_2 + m_3] \dot{q}_2^2 + \frac{1}{2} [m_3] \dot{q}_3^2 \quad (3.22)$$

Energía potencial

$$U(q) = m_3 g q_3 \quad (3.23)$$

De las ecuaciones encontradas obtenemos el lagrangiano:

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - U(q) \quad (3.24)$$

$$L(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} [m_1 + m_2 + m_3] \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} [m_2 + m_3] \dot{q}_2^2 + \frac{1}{2} [m_3] \dot{q}_3^2 - m_3 g q_3 \quad (3.25)$$

Ahora encontramos las ecuaciones de movimiento con la siguiente ecuación

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] - \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q} \right] \quad (3.26)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 + m_3 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 + m_3 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_3 \end{bmatrix} g \quad (3.27)$$

$$\tau_1 = (m_1 + m_2 + m_3)\ddot{q}_1 \quad (3.28)$$

$$\tau_2 = (m_2 + m_3)\ddot{q}_2 \quad (3.29)$$

$$\tau_3 = (m_3)\ddot{q}_3 + (m_3)g \quad (3.30)$$

Donde τ_1, τ_2 y τ_3 son las fuerzas aplicadas

3.3 Conclusión

En este capítulo se estudió La cinemática directa que se encarga de determinar la posición del elemento final con respecto al sistema de referencia también se estudia la metodología Euler-Lagrange, para poder obtener el modelo dinámico del sistema, El modelo dinámico es una herramienta muy poderosa en el desarrollo del control del sistema, en base a esto se puede predecir con exactitud el funcionamiento de nuestro robot y determinar las fuerzas aplicadas.

Capítulo 4 : Sistema Electrónico.

En este capítulo se mostrarán los diagramas eléctricos y sus componentes que conforman la etapa de comunicación y de potencia, también se presenta la caracterización de cada uno de los motores para que trabajen de manera lineal.

4.1 Diagrama general del sistema

Para el robot de tres grados de libertad se utilizará para la adquisición de datos una comunicación USB. La interfaz USB se encargada de la comunicación de la tarjeta al puerto de la computadora, esto permitirá realizar comunicación sin perder datos esta tarjeta cuenta con 32 bits entrada-salida, para poder realizar la adquisición de datos y la trasferencia de datos. Esta comunicación es alámbrica y con cableado blindado para descartar campos magnéticos parásitos. Posteriormente en la figura 4.1 se muestra el diagrama a bloques de nuestro sistema.

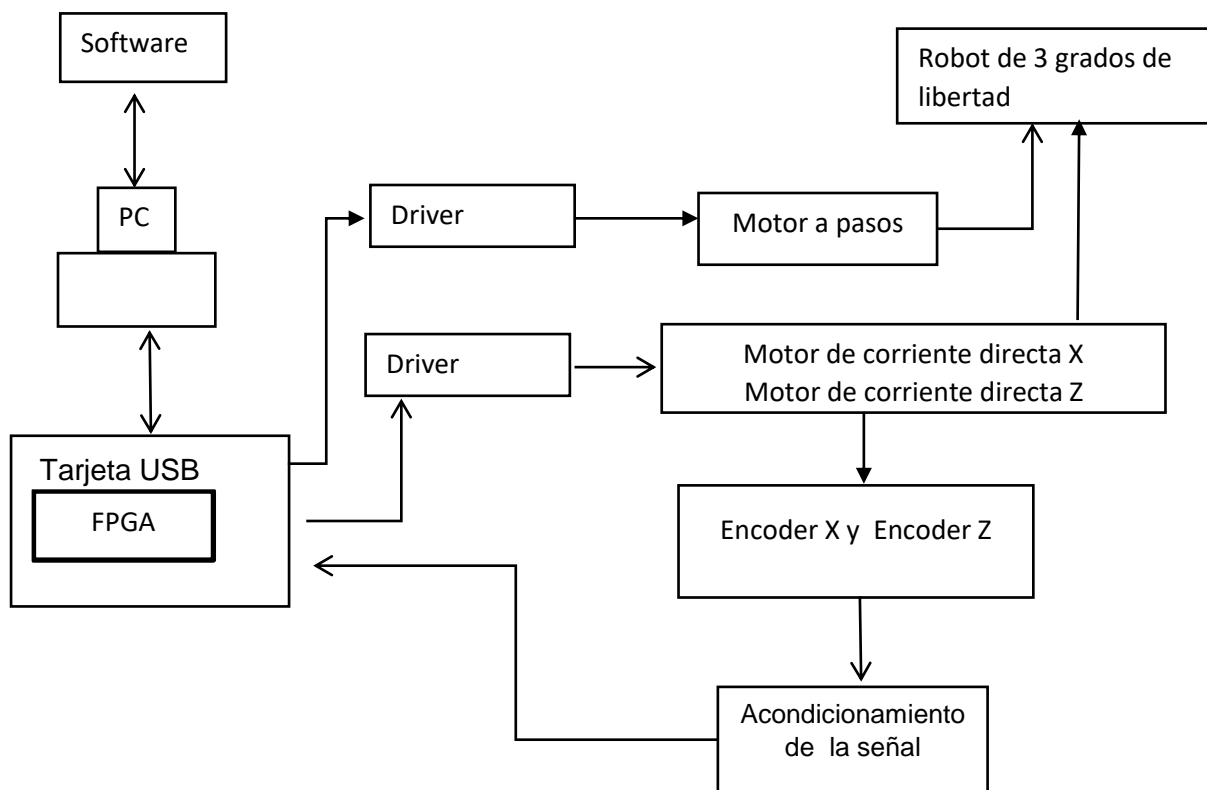


Figura 4.1: Diagrama a bloques de nuestro sistema.

4.1.1 Motorreductor 37dx54L.

Los motores que se utilizaran en los ejes X y Z son Motorreductor 37dx54L. que Cuenta con una caja de engranes metálicos con una reducción de 131 a 1 y un encoder de 64 pulsos por vuelta del eje del motor, lo cual nos puede generar 8400 pulsos por cada vuelta del eje de la caja de engranes, ver figura 4.2.



Figura 4.2: Motorreductor 37dx54L.

El motor reductor es un poderoso motor de 12 volts brushed con una caja de cambios de metal 131:1 y un codificador de cuadratura integrada que ofrece una resolución de 64 pulsos por revolución del eje del motor, lo que corresponde a 8400 recuentos por revolución del eje de salida de la caja de cambios. En la tabla 4.1 se observan las especificaciones del motor.

Voltaje nominal	12 V
Revoluciones	80 RPM
Voltaje de consumo (sin carga)	300 mA
Torque del motor	250 oz. -in (18 kg-cm)
Corriente máxima	5 A.

Tabla 4.1: Especificaciones del motor.

4.1.2. Caracterización del primer motor de CD

Metodología Para caracterizar el motor, se necesita saber el voltaje nominal al que trabaja nuestro motor esto se obtiene variando el voltaje desde 3v a 12v, midiendo la corriente y los kilogramos que el motor llega a levantar, posteriormente ya teniendo esos datos sacamos la potencia , el torque y la eficiencia con las siguientes formulas:

La potencia está dada por la multiplicación entre el voltaje y la corriente.

$$P = IV \tag{4.1}$$

donde:
P = Potencia

I = Corriente
 V= Voltaje

El torque está dado por el producto del radio y la fuerza.

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (4.2)$$

donde:

τ = Torque sus unidades estas dadas por (N-m)

F= Fuerza que actua sobre algun punto del cuerpo rigido (Kg)

r= Radio del eje del motor (m)

La eficiencia se mide tomando en cuenta el torque y la potencia

$$E = \tau/P \quad (4.3)$$

τ = Torque

P = Potencia

Teniendo en cuenta los parámetros a calcular se obtiene la tabla 4.2 que muestra la potencia el torque y la eficiencia.

voltaje	Corriente	kilogramos(kg)	Potencia	Torque	Eficiencia
3	0.2	0.43	0.6	0.16071723	0.26786205
4	0.64	1.52	2.56	0.56811672	0.22192059
5	1.03	2.2	5.15	0.8222742	0.15966489
6	1.39	2.83	8.34	1.05774363	0.12682777
7	1.7	3.7	11.9	1.3829157	0.1162114
8	2.05	4.28	16.4	1.59969708	0.0975425
9	2.45	4.65	22.05	1.73798865	0.07882035
10	2.63	5	26.3	1.868805	0.07105722
11	2.97	5.6	32.67	2.0930616	0.06406678
12	2.99	6	35.88	2.242566	0.06250184
13	2.85	6	37.05	2.242566	0.0605281

Tabla 4.2: Datos del Voltaje Nominal.

Después de haber realizado las mediciones correspondientes realizamos una gráfica de eficiencia contra voltaje como se muestra en la figura 4.3 en el cual se puede observar que nuestro motor tiene un voltaje nominal de 12v ya que tiene una eficiencia de 0.06250184 y un torque de 2.242566.

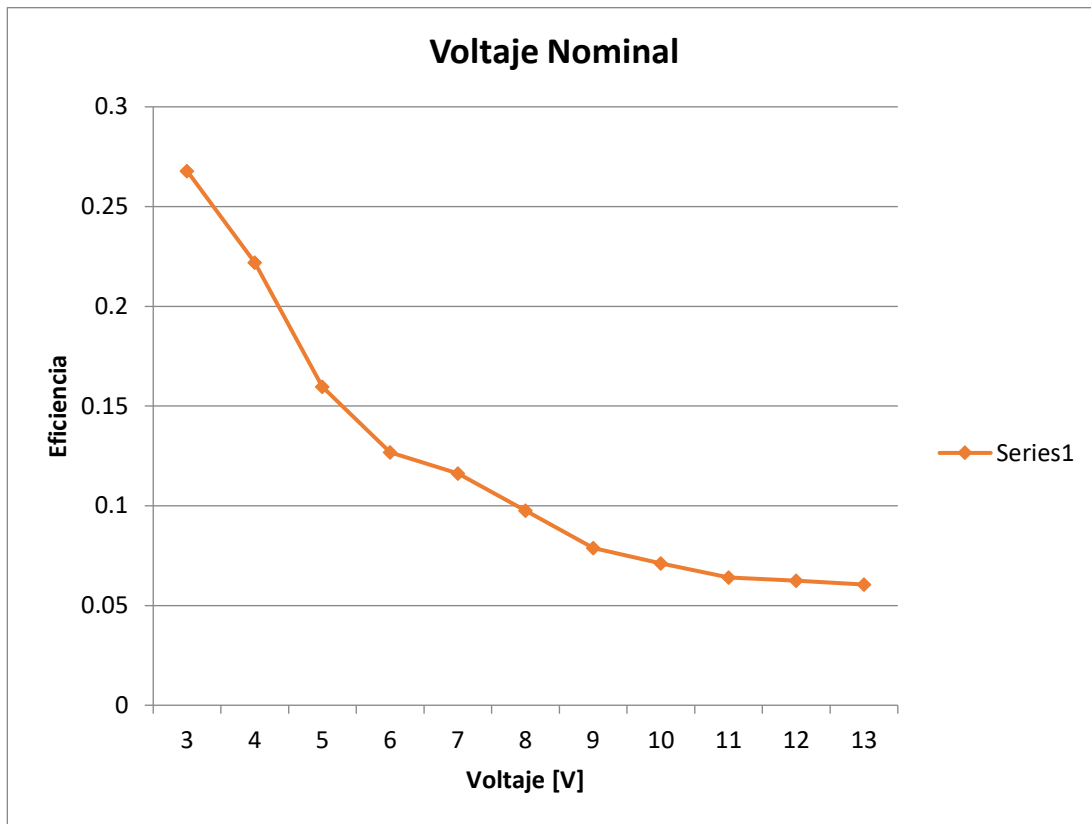


Figura 4.3: Voltaje Nominal.

La caracterización consiste en someter a nuestro motor a frecuencia del rango de 50 Hz a 20 KHz, con una variación entre ellas de 100 hasta llegar a 1000 Hz, al llegar a esa frecuencia la variación cambia a 1000 Hz hasta llegar hasta 20KHz, todas estas frecuencias están trabajando a la mitad de su ciclo de trabajo o sea al 50%. Además a cada una de estas frecuencias se le hizo una modulación de ancho de pulso de 10% hasta al 100%, del pulso positivo en incrementos de 10, obteniendo así una gran cantidad de datos, donde encontraremos la frecuencia ideal para obtener el mejor desempeño de nuestro motor.

Para poder obtener la fuerza con la que trabaja el motor, se hizo un acoplamiento del motor a una báscula romana, aplicando las frecuencias y generando una fuerza de acuerdo al tipo de frecuencia aplicada.

Después de haber sometido el motor con distintas frecuencias y obtener las distintas fuerzas, observamos cuál es la mejor frecuencia de trabajo del motor, recordemos que estas frecuencias trabajan a la mitad de su ciclo de trabajo, por lo tanto debemos de utilizar la que mayor fuerza proporciona al motor, las candidatas, después de obtener estas frecuencia se eligió utilizar la de 453 Hz, ya que es la menos audible y es con la que trabaja mejor, ya que para las otras frecuencias al variar el ciclo de trabajo no trabajaban como se esperaba.

Una vez elegida la frecuencia a trabajar, se varía el ancho de pulso o ciclo de trabajo del 10% hasta el 90% como se muestra en la tabla 4.3, esta variación nos entregara distintas fuerzas, las cuales nos serán de mucha utilidad para crear nuestro control.

Voltaje nominal: 12v		
Frecuencia: 453Hz	kilogramos(kg)	Torque
10%	0	0
20%	0.575	0.21491258
30%	1.475	0.55129748
40%	2.175	0.81293018
50%	3.05	1.13997105
60%	3.56	1.33058916
70%	4.115	1.53802652
80%	5.035	1.88188664
90%	5.65	2.11174965

Tabla 4.3: Valores del ciclo de trabajo.

Una vez que se encontraron las fuerzas con esta frecuencia la graficamos para ver si la respuesta del motor es lineal como se muestra en la figura 4.4, lo que el control pida sera lo que se le entregue.

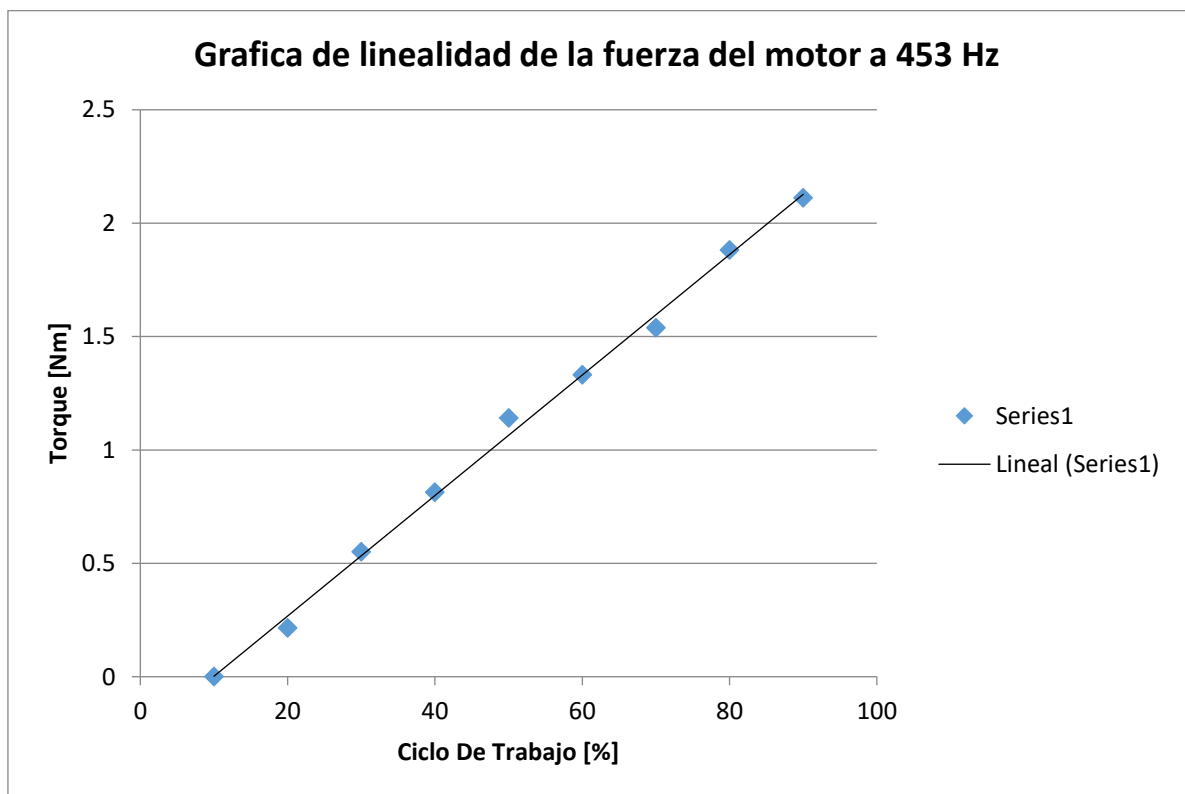


Figura 4.4: Linealidad de la fuerza del motor.

4.1.3. Metodología de Caracterización Del segundo motor

En la tabla 4.4 se presentan los datos del voltaje nominal que se involucra para poder caracterización el segundo motor

voltaje	Corriente	kilogramos(kg)	Potencia	Torque	Eficiencia
3	0.41	0.51	1.23	0.19061811	0.15497407
4	0.7	1.15	2.8	0.42982515	0.15350898
5	1.02	2	5.1	0.747522	0.14657294
6	1.32	2.61	7.92	0.97551621	0.12317124
7	1.64	3.41	11.48	1.27452501	0.11102134
8	1.96	4.11	15.68	1.53615771	0.09796924
9	2.21	4.75	19.89	1.77536475	0.08925916
10	2.45	5.44	24.5	2.03325984	0.0829902
11	2.75	5.95	30.25	2.22387795	0.07351663
12	2.9	6.5	34.8	2.4294465	0.06981168
13	3.1	7.08	40.3	2.64622788	0.06566322

Tabla 4.4: Datos del Voltaje Nominal.

Después de haber realizado las mediciones correspondientes realizamos una gráfica de eficiencia contra voltaje que se muestra en la figura 4.5 en la cual se observa que nuestro motor tiene un voltaje nominal de 12v ya que tiene una eficiencia de 0.06981168 y un torque de 2.4294465.

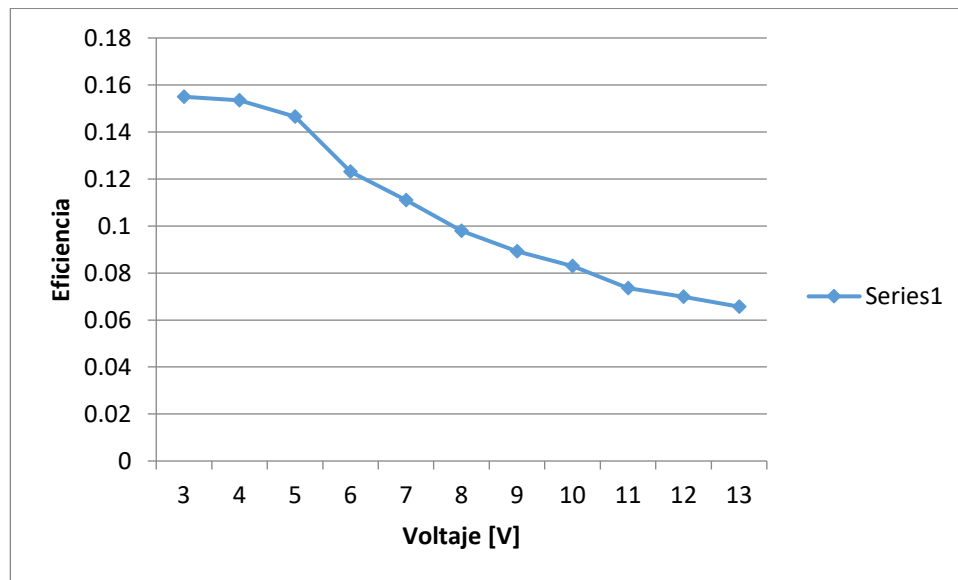


Figura 4.5: Voltaje Nominal.

La caracterización consiste en someter a nuestro motor a frecuencia del rango de 50 Hz a 20 KHz, con una variación entre ellas de 100 hasta llegar a 1000 Hz, al llegar a esa frecuencia la variación cambia a 1000 Hz hasta llegar hasta 20KHz, todas estas frecuencias están trabajando a la mitad de su ciclo de trabajo o sea al 50%. Además, a cada una de estas frecuencias se le hizo una modulación de ancho de pulso de 10% hasta al 100%, del pulso positivo en

incrementos de 10, obteniendo así una gran cantidad de datos, donde encontraremos la frecuencia ideal para obtener el mejor desempeño de nuestro motor.

Para poder obtener la fuerza con la que trabaja el motor, se hizo un acoplamiento del motor a una báscula romano, aplicando las frecuencias y generando una fuerza de acuerdo al tipo de frecuencia aplicada. Podemos observar el montaje realizado para caracterizar nuestro motor, después de haber realizado las pruebas para las distintas frecuencias, obtuvimos los siguientes valores utilizando el voltaje nominal 12v.

Después de haberse probado el motor con distintas frecuencias y obtener las distintas fuerzas, observamos cuál es la mejor frecuencia de trabajo del motor, recordemos que estas frecuencias trabajan a la mitad de su ciclo de trabajo, por lo tanto debemos de utilizar la que mayor fuerza proporciona al motor, las candidatas , después de obtener estas frecuencia se eligió utilizar la de 200 Hz, ya que es la menos audible y es con la que trabaja mejor, ya que para las otras frecuencias al variar el ciclo de trabajo no trabajaban como se esperaba.

Una vez elegida la frecuencia a trabajar, se varía el ancho de pulso o ciclo de trabajo del 10% hasta el 90% como se muestra en la tabla 4.5, esta variación nos entregara distintas fuerzas, las cuales nos serán de mucha utilidad para crear nuestro control.

Voltaje nominal: 12v		
Frecuencia: 200Hz	kilogramos(kg)	Torque
10	0.035	0.01308164
20	0.84	0.31395924
30	1.35	0.50457735
40	2.16	0.80732376
50	3.5	1.3081635
60	4.14	1.54737054
70	4.9	1.8314289
80	5.1	1.9061811
90	5.58	2.08558638

Tabla 4.5: Valores del ciclo de trabajo.

Una vez que se encontraron las fuerzas con esta frecuencia la graficamos para ver si la respuesta del motor es lineal, lo que el control pida sera lo que se le entregue ver figura 4.6.

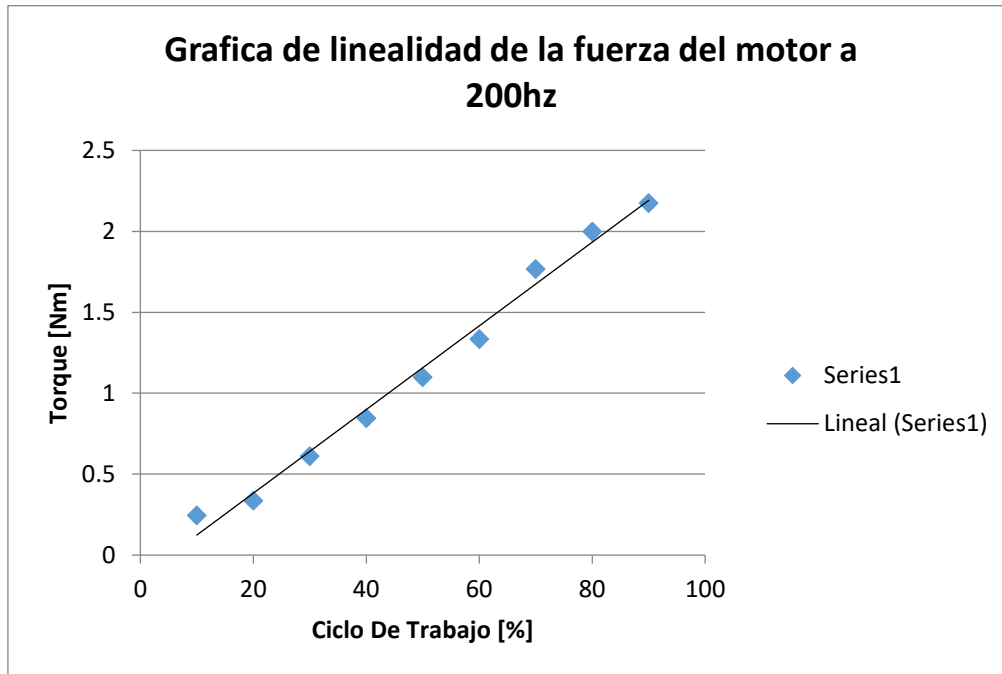


Figura 4.6: Linealidad de la fuerza del motor.

4.2 Encoder

El encoder Hall requiere un voltaje (V_{cc}) de entre 3.3V y 20V y una corriente de máximo 10mA. Las salidas A y B son ondas cuadradas desde 0V hasta V_{cc} con un desfase de 90°C. La frecuencia de las transiciones te dice la velocidad del motor y el orden te da la dirección.

Teóricamente se puede obtener de los encoders de este tipo de motor señales de la siguiente forma, como se puede observar en la figura 4.7.

Contando los flancos de bajada y subida de ambas salidas se puede obtener 64 conteos por cada revolución del motor. Si se requiriera menos precisión en el sistema se podría solamente contar uno de los dos flancos y obtener una salida de 16 conteos por revolución.

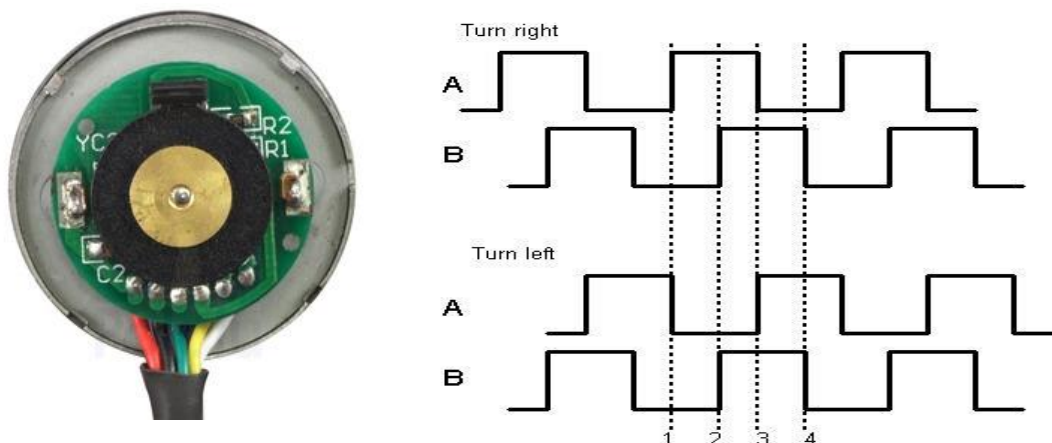


Figura 4.7: Encoder del Motorreductor.

4.3. Etapa de comunicación:

En la etapa de comunicación se diseñó una tarjeta la cual nos servirá para podernos comunicar mediante USB con la computadora y el FPGA, la computadora enviará las posiciones mediante LabVIEW a la tarjeta desarrollada y la tarjeta enviará las posiciones al FPGA para poderlas procesar.

La tarjeta de comunicación contiene un PIC 18f4550 el cual está programado para poder transferir una palabra de 32 bits que servirá para poder enviar los datos requeridos, también contiene un oscilador de 4Mhz que será la frecuencia a la que se transfieren los datos. En la figura 4.8 se puede apreciar el diagrama de conexiones el botón de RESET y el conector tipo hembra B.

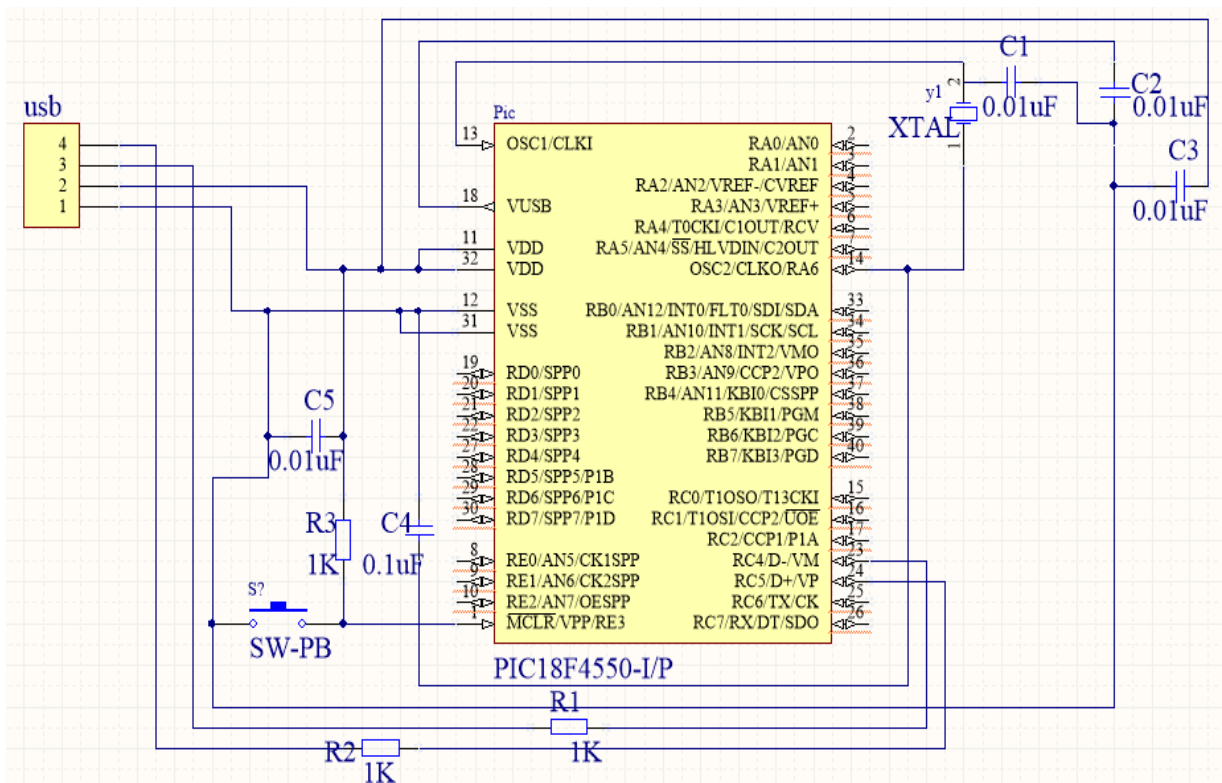


Figura 4.8: Diagrama del Pic 18F4550.

Realizando las conexiones de los componentes electrónicos y agregando divisores de voltaje que se realizaron con dos resistencias para poder bajar nuestro voltaje de 5V a 3.3V ya que nuestro FPGA trabaja a 3.3v y nuestro PIC a 5V estos divisores de voltaje se rutiaron para no dañar el FPGA ver figura 4.9.

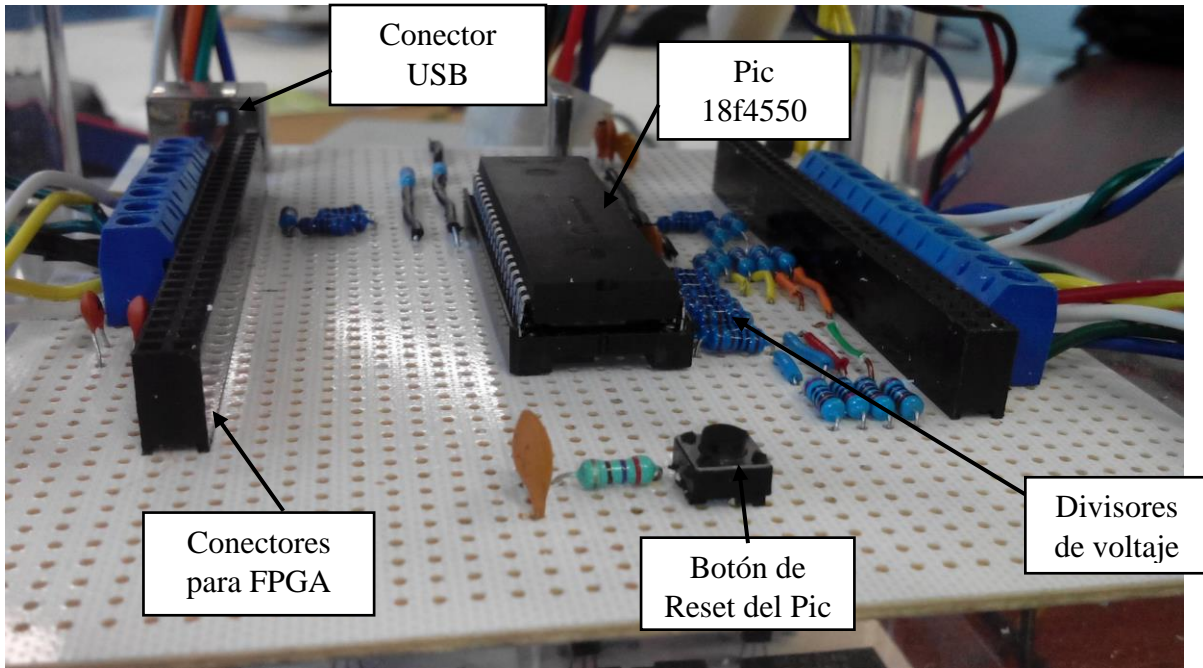


Figura 4.9: Tarjeta Pic para hacer la comunicación.

Posteriormente se realizó el ruteado del PIC al FPGA como se muestra en el siguiente diagrama figura 4.10 donde se utilizan solo dos bancos del FPGA que son el banco dos y banco cuatro.

En la figura 4.11 se muestran las conexiones de los componentes electrónicos y nuestro FPGA Cyclone III con matrícula EP3C10F256C6 de Altera el microcontrolador quedo por debajo deL FPGA para reducir espacio en la electrónica.

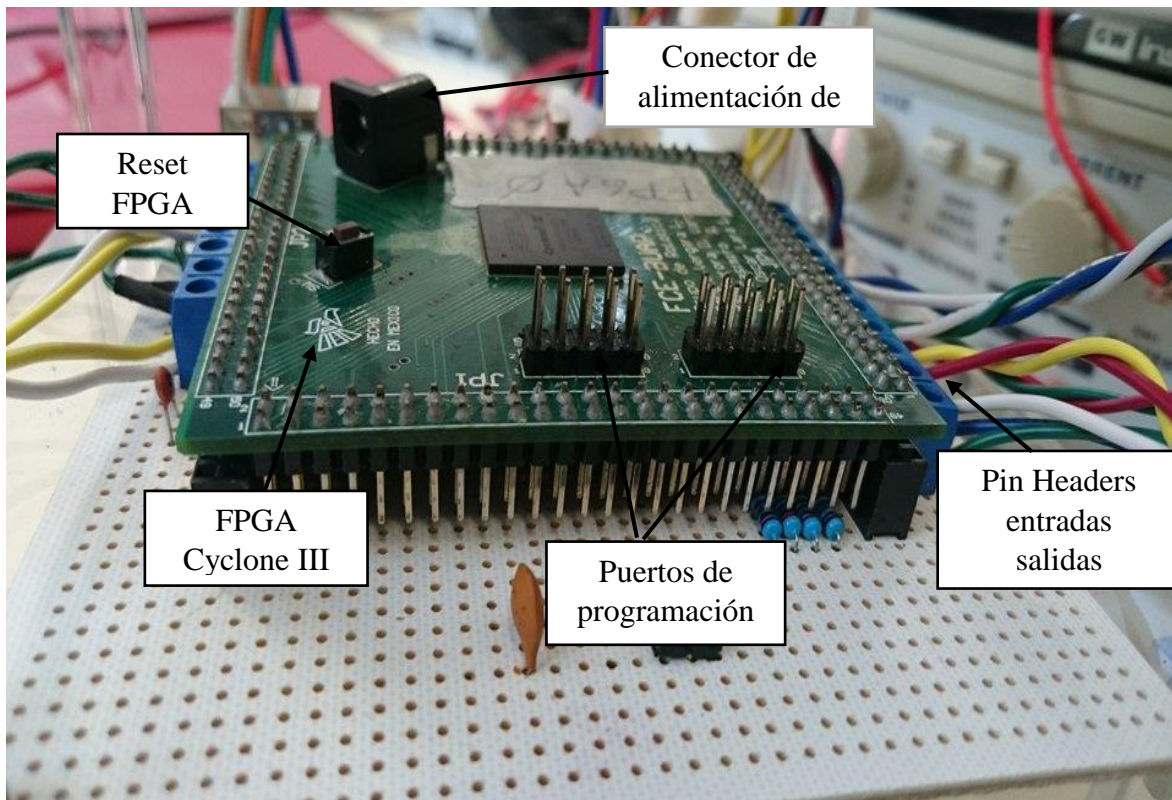


Figura 4.11: Tarjeta FPGA.

4.4. Etapa de potencia

En la etapa de potencia se diseñaron dos puentes H los cuales controlaran el Eje X y el Eje Z estos puentes H nos ayudaran a realizar el control del giro de nuestros motores, para nuestro Eje Y se diseñó una tarjeta con cuatro configuraciones Darlington los cuales nos van a servir para activar cada una de las bobinas del motor a pasos.

Estas tarjetas se activarán con señales enviadas desde el FPGA para poder enviar el voltaje necesario a los motores, esto con el fin de tener un buen acondicionamiento de señales enviadas del FPGA hacia el sistema electrónico de potencia.

La tarjeta de puente h contiene cuatro transistores tipo NPN dos de estos transistores son de potencia con matricula TIP 35C y cuatro transistores tipo PNP dos de estos transistores de potencia con matricula TIP 36C también en la figura 4.12 se puede apreciar el diagrama que contiene dos optoacopladores y dos compuertas TTL y una red snubber para protección de la tarjeta electrónica.

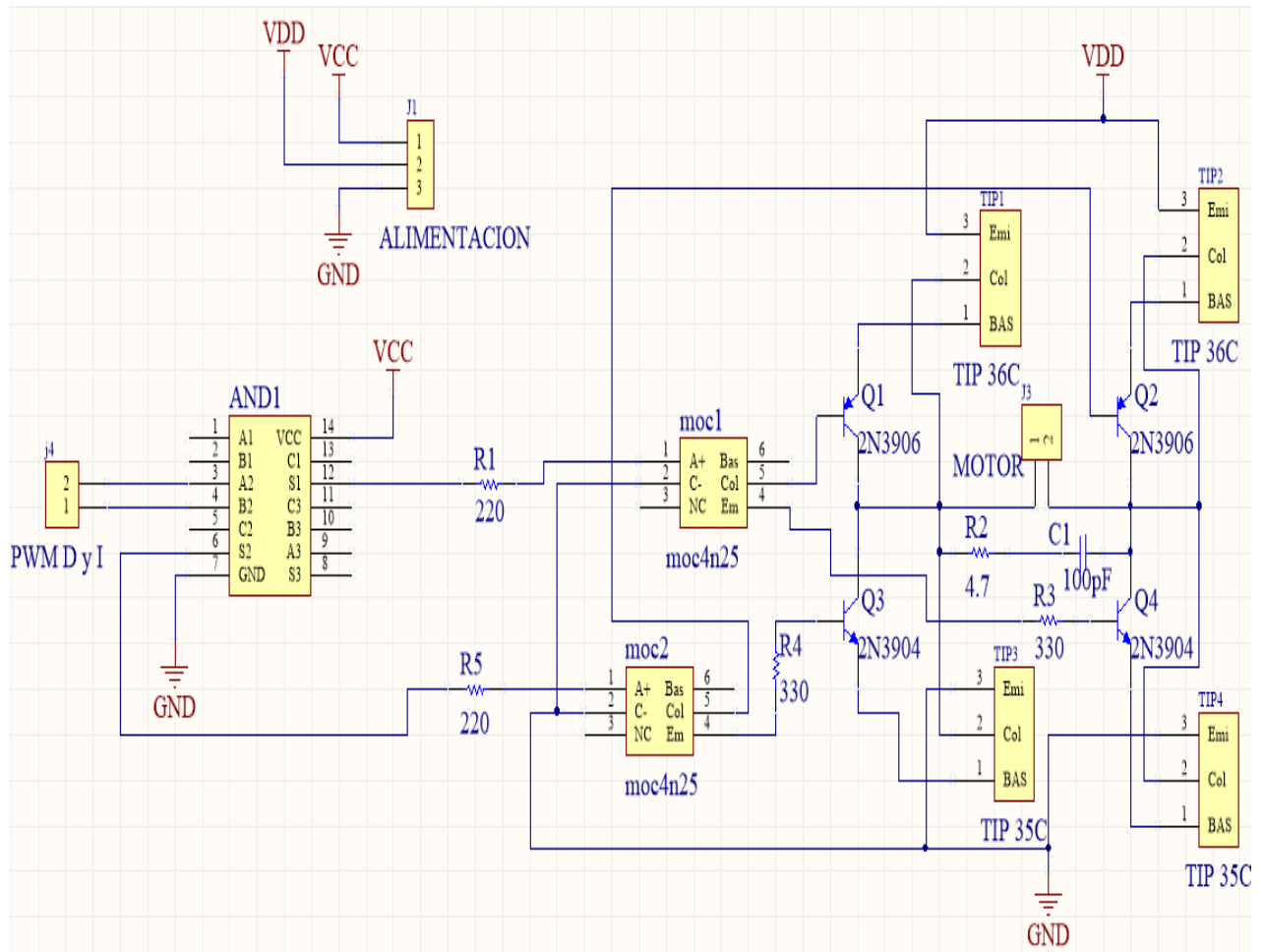


Figura 4.12: Diagrama de Puente H.

En la figura 4.13 se muestran las conexiones realizadas de los componentes electrónicos tanto sus entradas de los PWM como la salida de voltaje de nuestro motor este mismo diseño se utiliza para poder realizar los dos puentes h que se requieren para poder controlar los ejes X y Z.

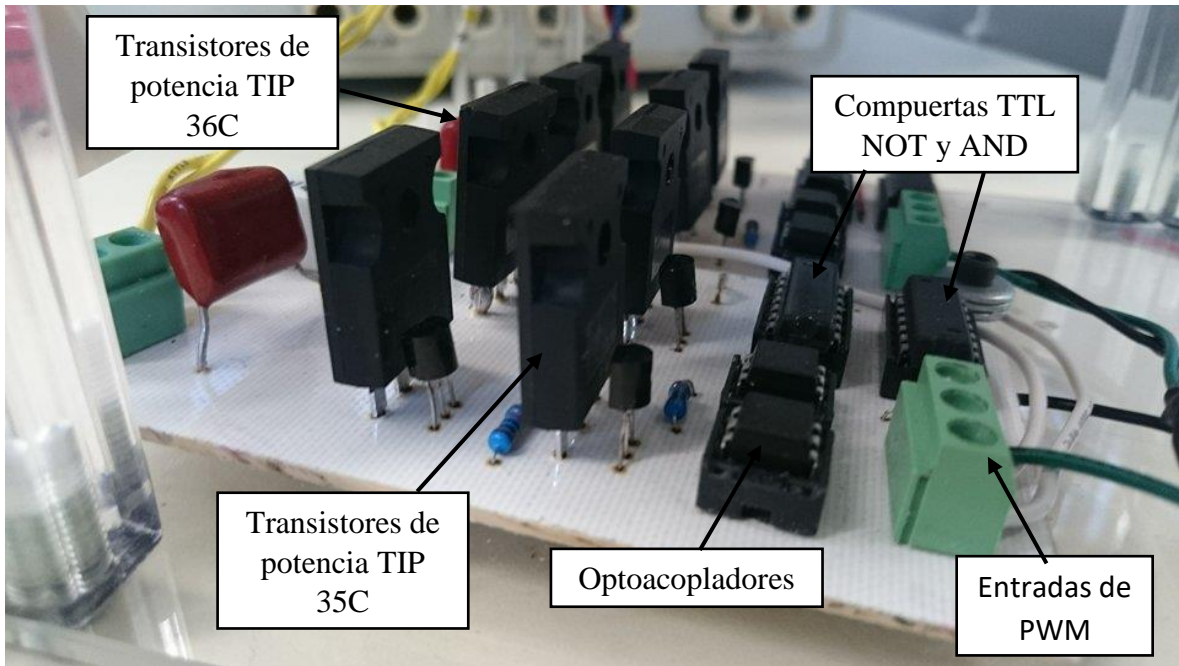


Figura 4.13: Puente H.

Para poder controlar nuestro motor a pasos se utilizaron 8 transistores NPN cuatro de estos son de potencia TIP 35C cada par de estos transistores están conectados en configuración Darlington como se muestra en la figura 4.14. También en el diagrama se muestra una compuerta AND TTL para que la salida de 3,3V del FPGA se eleve a 5V.

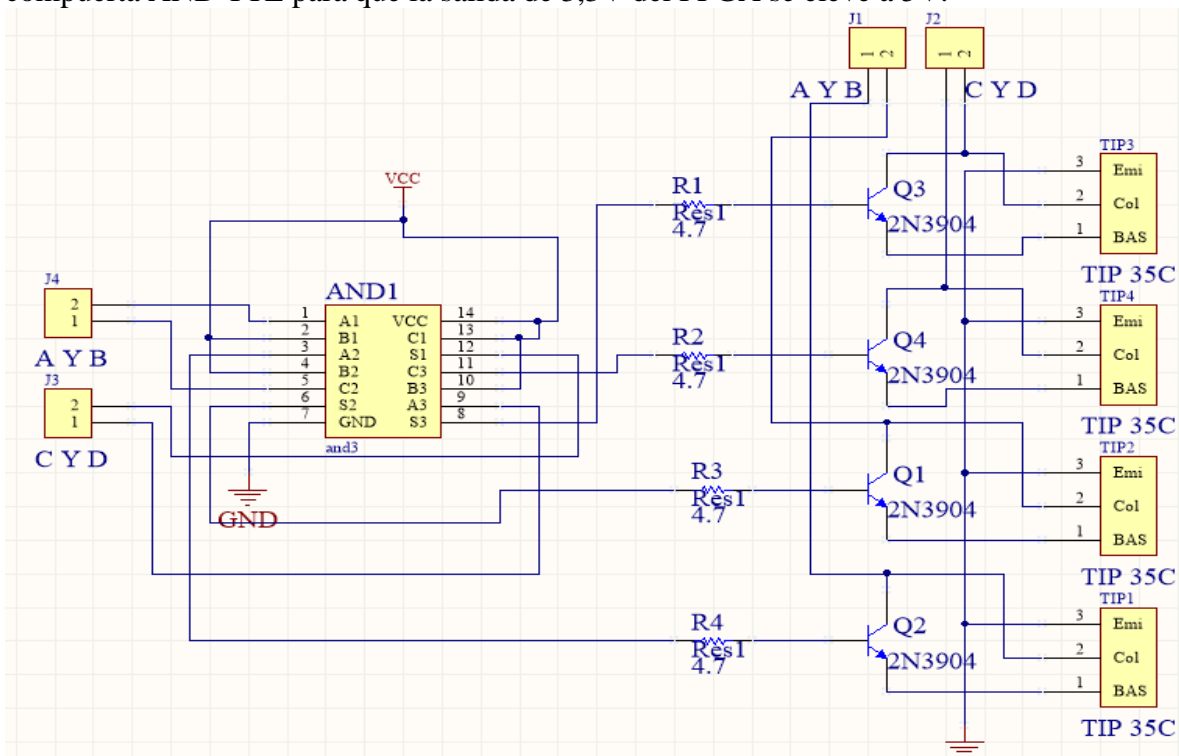


Figura 4.14: Diagrama de Puente H.

En la figura 4.15 se muestran las conexiones realizadas de los componentes electrónicos tanto sus entradas como salidas, del FPGA saldrán cuatro señales donde cada una de estas activarán cada una de las bobinas del motor a pasos para poderlo controlar el Eje Y y mandarlo a la posición deseada.

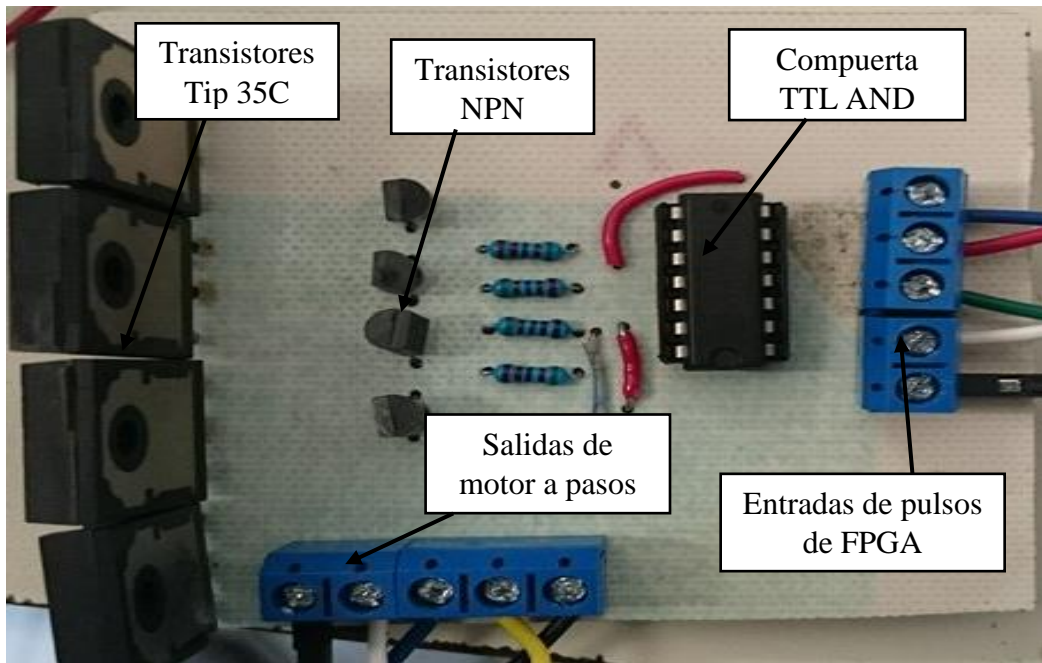


Figura 4.15: Driver de motor a pasos.

El FPGA a usar por el presente trabajo de tesis es el Cyclone III de la compañía Altera, la cual fue fundada en 1983. El ambiente de programación en el cuál se desarrollará el firmware es Quartus II, el cual surgió en el año 2003 y particularmente se hizo uso de la versión 13. La tarjeta hija se muestra en la Figura 4.16, es un diseño de cuatro capas y tiene componentes en la parte superior e inferior. La parte superior, Figura 4.16, consta de:

- (1) Un FPGA Cyclone III con matrícula EP3C10F256C6 de Altera.
- (2) Un puerto de programación compatible con el programador usb-blaster.
- (3) Un puerto JTAG.
- (4) Un conector para alimentación externa.
- (5) Un botón de reinicio.
- (6) 4 Conectores header macho de 50 pines.

La parte inferior de la Figura 4.17 está integrada por:

- (1) Memoria EEPROM (EPC2).
- (2) Convertidor DC-DC de 3.3V a 1.2V.
- (3) Oscilador de cristal.
- (4) Resistencias y capacitores.

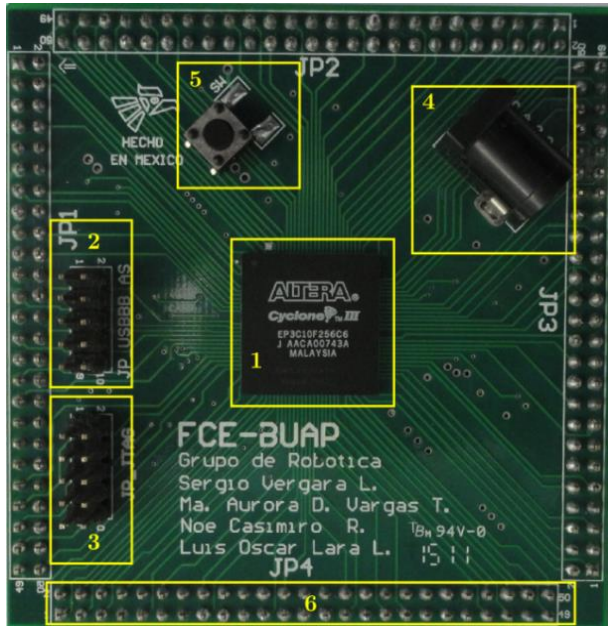


Figura 4.16: Capa superior.

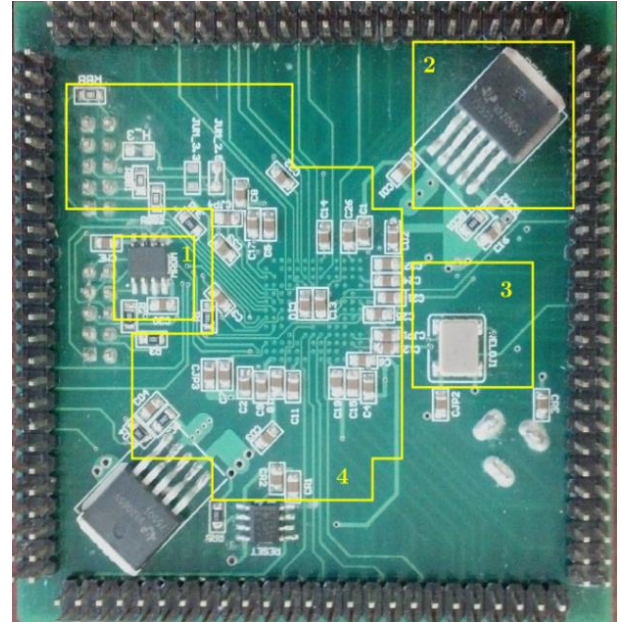


Figura 4.17: Capa inferior.

Posteriormente se unieron las etapas de comunicación y de potencia para poder tenerlo en un solo bloque de conexiones como se muestra en la figura 4.18 en la parte inferior se tiene la etapa de potencia, en la parte de en medio se tiene la etapa de comunicación junto con el FPGA el cual tiene programado el control de nuestro robot y por último en la parte superior se tienen todas las conexiones de salida.

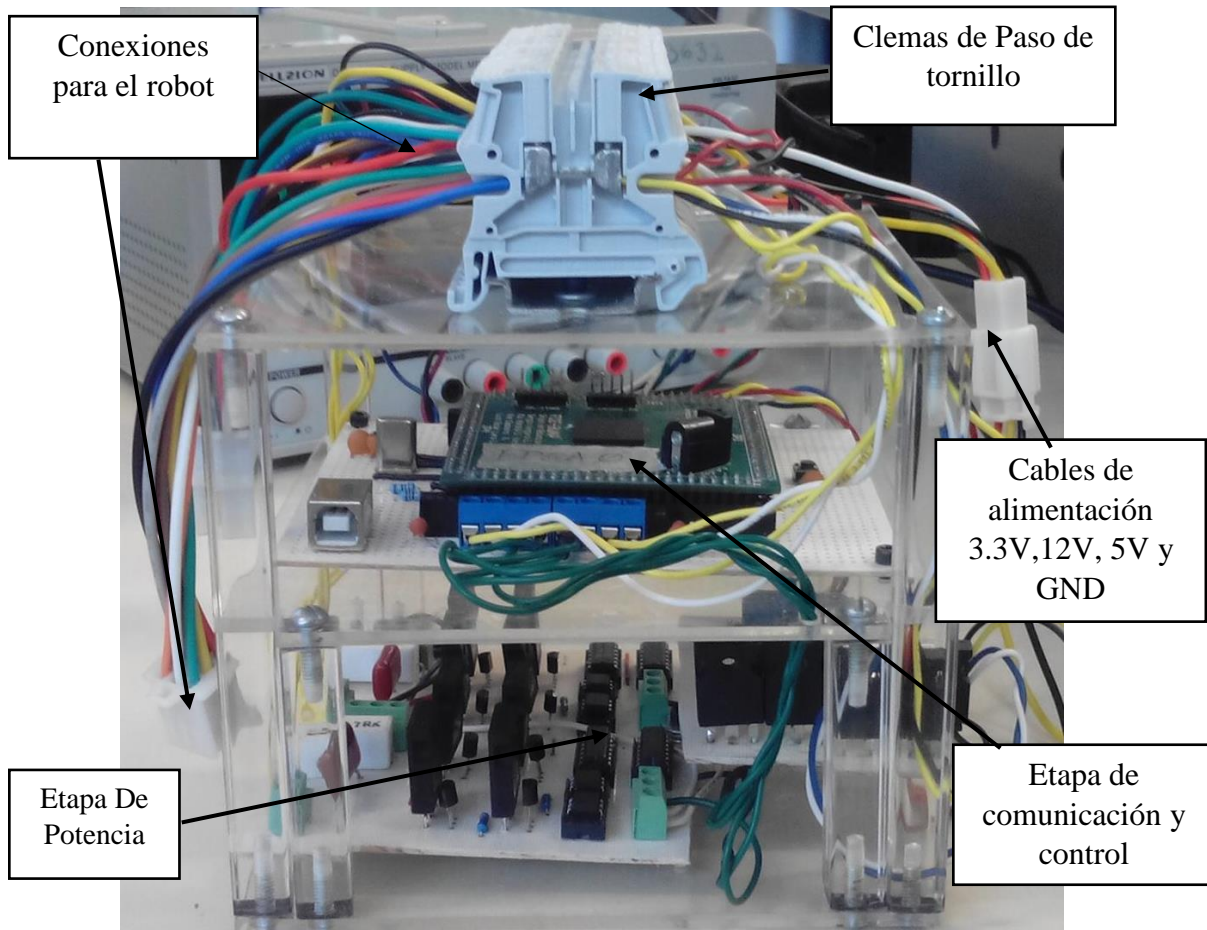


Figura 4.18: Etapa de comunicación y potencia.

4.5 Conclusión

En este capítulo se describió como se caracterizaron los motores para que trabajen de manera lineal esto es de gran utilidad ya que si no se encuentra una frecuencia optima los motores no trabajarían con la eficiencia máxima que se necesita para desplazar los ejes del sistema, se explicó que los encoders de los motores nos proporcionan una alta precisión que nos garantiza una correcta obtención de la posición, también se mencionó cada una de las partes que forman la instrumentación de nuestro robot cartesiano, donde se describe, la etapa de comunicación y la etapa de potencia las cuales nos servirán para controlar el sistema.

Capítulo 5 Firmware y software

Para realizar la comunicación de LabVIEW y FPGA primero se realizó un código en Pic C para poder controlar entradas y salidas dependiendo de las necesidades del usuario. Además, este pequeño código tendrá el objetivo de poder entenderse con la computadora, realizando así la función de avisarle en el momento que ha sido conectado y detectado por la PC. En ese momento el firmware estará en espera de cualquier dato que se esté enviando por la PC a través de LabVIEW. A continuación, se muestra el diagrama a bloques del programa de inicialización del USB en el Pic ver figura 5.1.

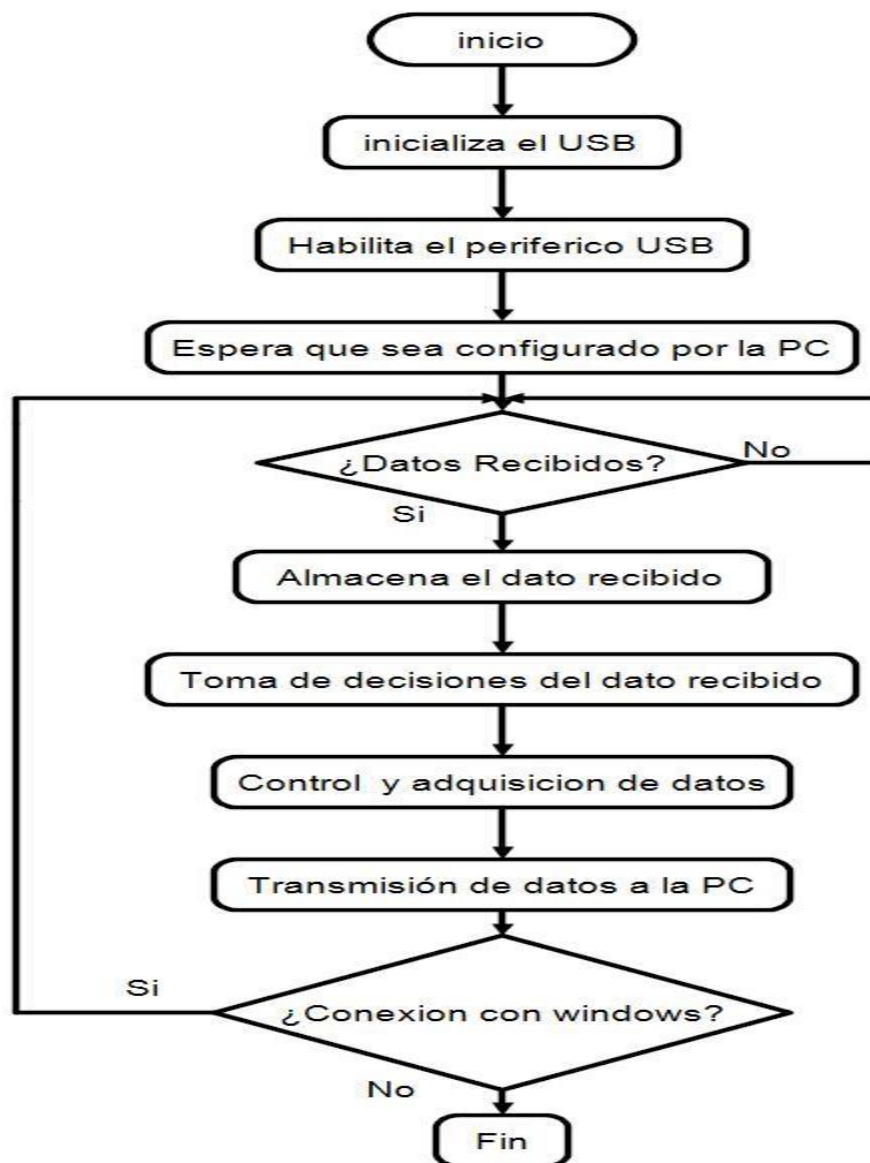


Figura 5.1: Diagrama de conexión USB.

Teniendo la conexión de la Pc al Pic se tuvo que realizar un programa en Pic C compiler para poder enviar y recibir 32 bits por medio de USB (ver apéndice B), como se muestra en la figura 5.2.

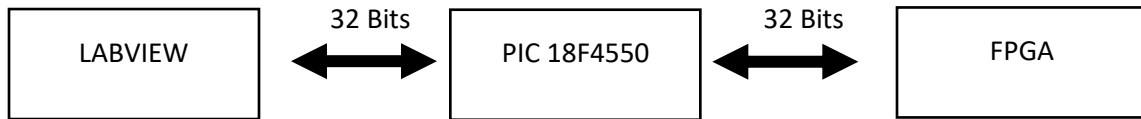


Figura 5.2: Etapa de Comunicación.

LabVIEW envía datos de 32bits divididos en cuatro paquetes de 8 bits posteriormente el Pic los recibe vía USB donde los almacena y los envía en paquetes de 4 bits enumerados con otros 4 bits en total tenemos 8 paquetes de 4 bits para no perder la posición como se muestra en la figura 5.3.

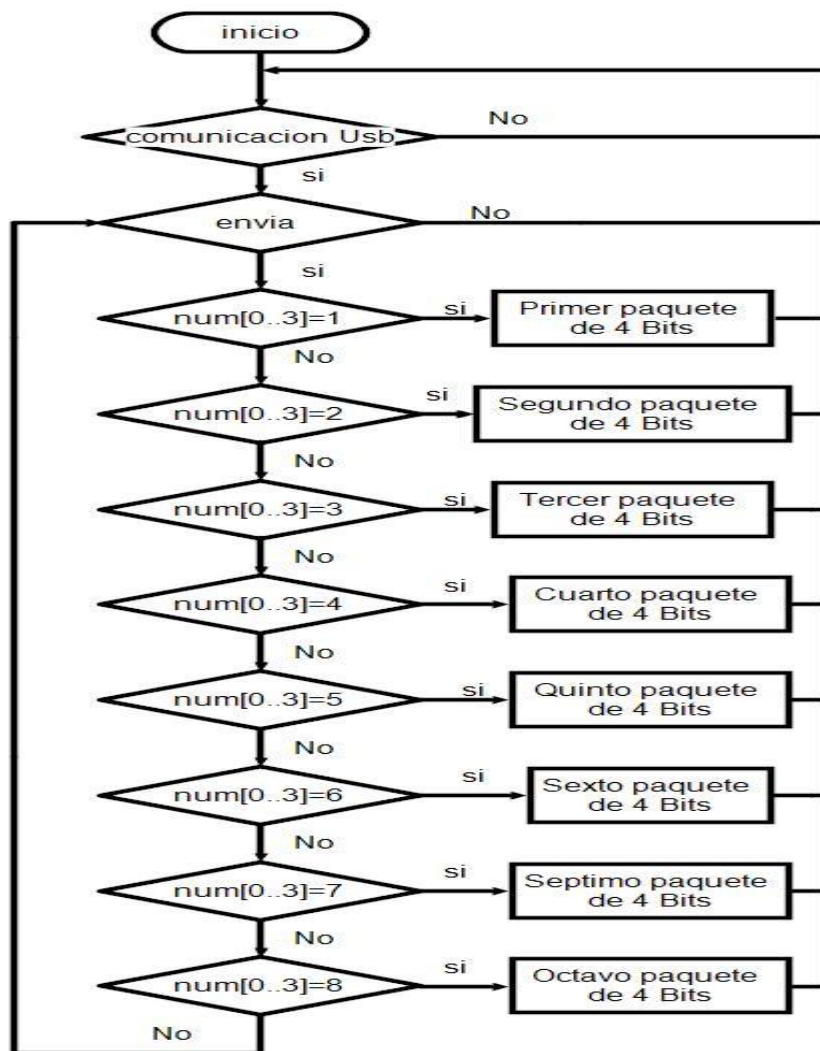


Figura 5.3: Diagrama de flujo del Pic.

5.1 Comandos de referencia del FIRMWARE

En la Figura 5.4 podemos observar el bloque de comandos de las posiciones que se envían desde labview, este bloque contiene 5 entradas y 7 salidas la primera entrada es la del NUM[3..0] esta entrada es la que numera los datos que se envían desde labview esto es para que no se pierda ningún dato y saber a qué posición corresponde, la segunda entrada que es la de Entrada[3..0] esta variable es la que recibe los datos en paquetes de 4 bits , la entrada de Control[2..0] es la que nos indica en qué posición van los datos recibidos y por último la señal del clk es muy importante porque este reloj es enviado desde el pic para poder sincronizar el Pic con el fpga. Teniendo todos estos datos de entrada se pudo reconstruir el dato enviado desde labview e identificar cada una de las posiciones y ganancias de nuestro sistema.

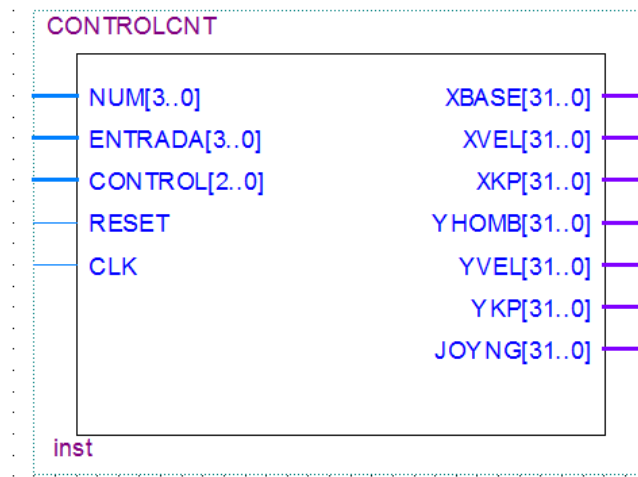


Figura 5.4: Módulo de comandos de entrada.

Los comandos de control utilizados en el firmware del sistema para el robot de 3 gdl se muestran en la tabla 5.1; en donde los comandos se conforman de 3bits expresados en decimal.

TABLA DE COMANDOS	
Comandos de control	Acción
0	Ganancia proporcional del eje Z
1	Motor a Pasos eje Y
2	Posición eje X
3	Ganancia derivative eje X
4	Ganancia proporcional del eje X
5	Posicion del eje Z
6	Ganancia derivative eje Z

Tabla 5.1: Comandos de control.

En la Figura 5.5 podemos observar el diagrama de flujo del firmware; correspondiente al Control de mandos, que se utilizó para el robot cartesiano:

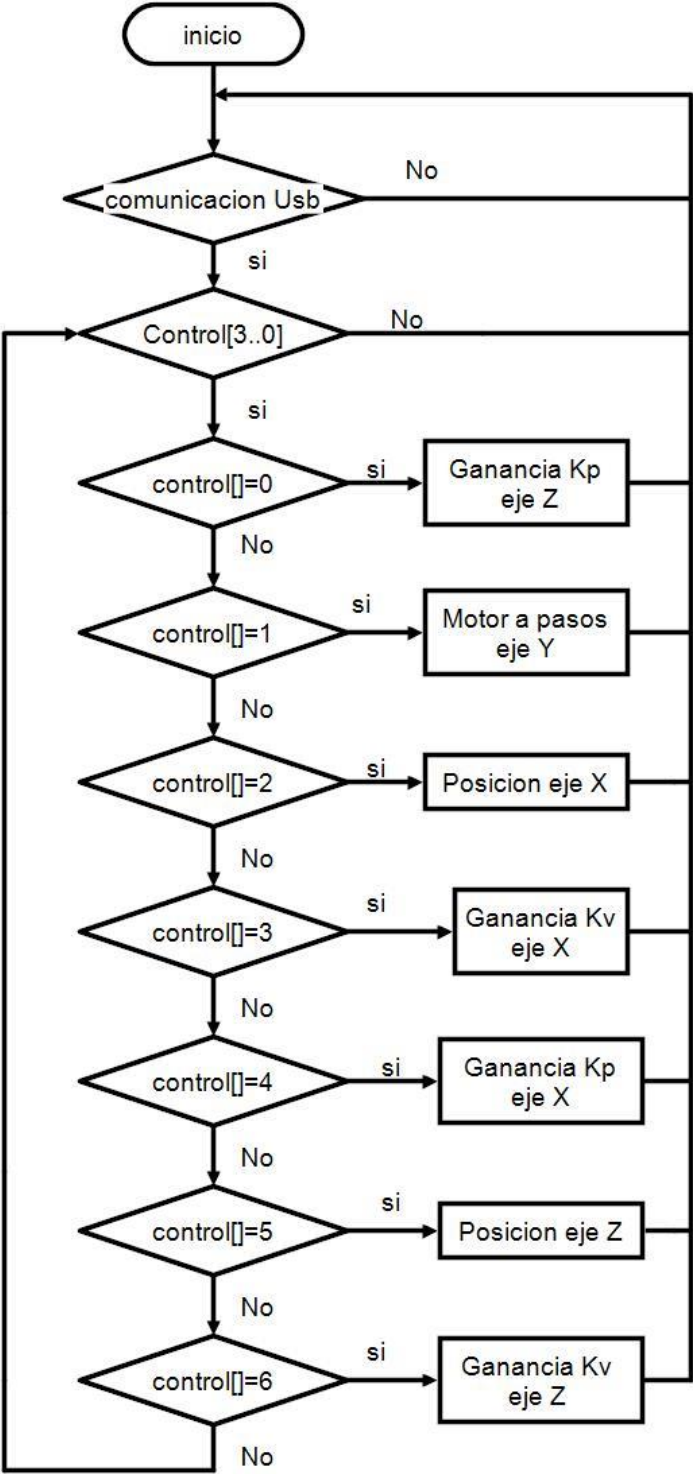


Figura 5.5: Modulo de comandos.

5.2 Circuito para obtener la posición usando un encoder

La manera de lograr esto es leyendo las señales A y B que nos entrega el encoder de manera digital, como lo es este caso e ir viendo si incrementa o decrementa su valor tomando como referencia el primer valor muestreado, y con respecto a este valor cualquier cambio que haga el encoder nos genera un cambio en las combinaciones lógicas de nuestras señales y dependiendo como sea este cambio, sabremos si el giro del motor es en sentido horario o antihorario, las señales generadas por el encoder se muestran en la figura 5.6.

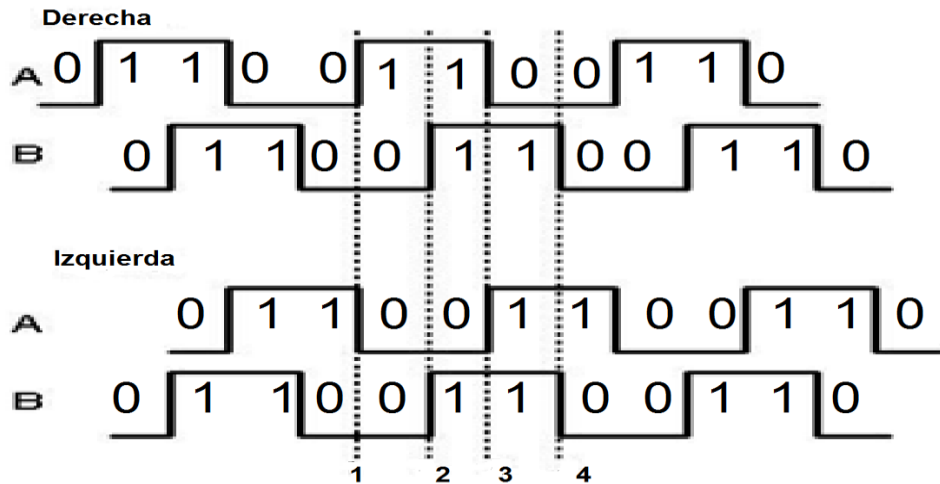


Figura 5.6: Encoder.

Uno de los problemas es el de muestrear correctamente las señales que son generadas por el encoder, para ello es necesario generar una señal de reloj que esté basado en las mismas señales. La creación de este reloj en base a las señales nos asegura que no se tendrá ninguna pérdida de muestra que sea generada por nuestros encoders, a continuación, se explicará de manera más detallada como se genera este reloj [6].

Las señales originales de nuestros encoders están desfasadas 90° una de la otra, para poder generar ese reloj que necesitamos para no perder ningún tipo de información en el momento que se está ejecutando el firmware, por medio de un arreglo de tres flip flops tipo "D" generamos un retraso de la señal original, el retraso que necesitamos generar es de un octavo de la señal original y con este arreglo lo generamos, ya sea la señal A o la señal B, el arreglo de los flip flops se puede observar en la figura 5.7. Una vez realizado el retraso de la señal como se tenía previsto, realizamos la operación XOR entre nuestra señal original (señal A o B) y nuestra señal retrasada el resultado de esta operación nos genera señales cuadradas donde las señales sean diferentes, una vez obtenidos nuestros dos ciclos de reloj A y B generamos una OR entre las dos para obtener el ciclo completo de reloj.

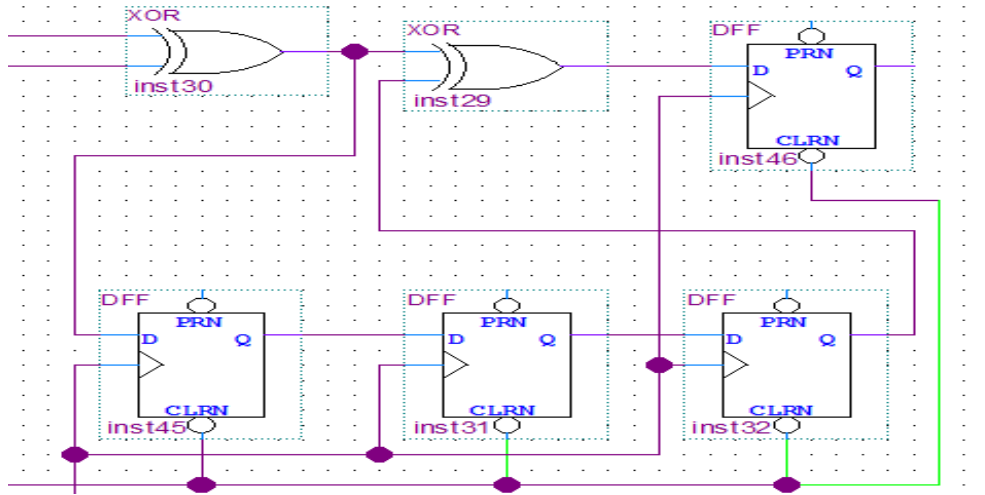


Figura 5.7: Arreglo de flip flops tipo D.

5.2.1 Implementación del encoder.

Una vez que ya se ha visto la metodología para hacer un correcto muestreo de las señales del encoder y se ha entendido todo el proceso por el cual deben de pasar las señales A y B, se llevara a nivel programación, se diseña el diagrama de flujo en base a lo visto con anterioridad, por medio de máquinas de estado como se puede observar en la figura 5.8[5].

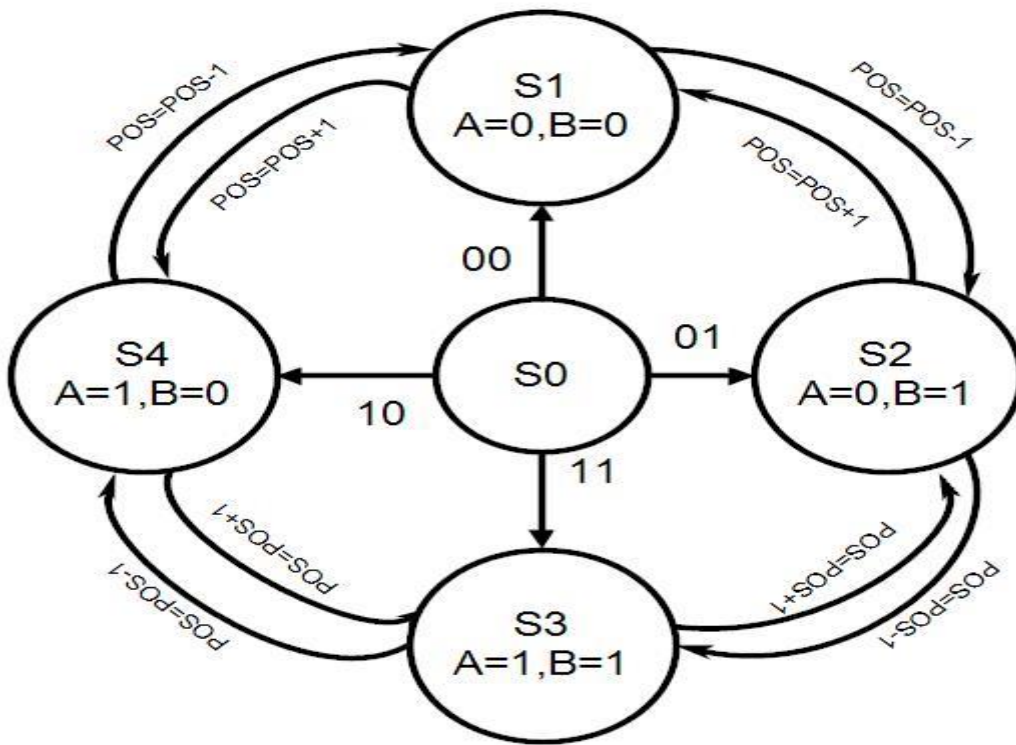


Figura 5.8: Máquina de estados del encoder.

Como resultado del diagrama de flujo de la lectura del encoder generamos nuestro código en Quartus y obtenemos el siguiente bloque de firmware, con este bloque ya se puede hacer el conteo de las señales del encoder con toda precisión sin perder cuentas, garantizando el máximo desempeño de nuestro sistema ver Figura 5.9.

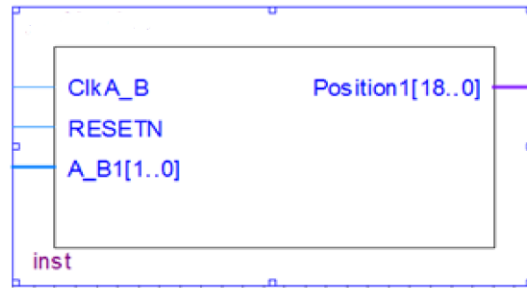


Figura 5.9: Bloque de conteo de las señales del encoder.

Sabemos que las señales eléctricas generalmente tienen características como el ruido, errores de exactitud, tiempo de retardo, sobretiros, entre otros factores que perjudican las mediciones a muestrear, todo ese tipo de fenómenos que pasan con las señales de los sensores. Para poder hacer frente a este tipo de problemas se optó por diseñar un filtro digital como se puede observar en la figura 5.10, el cual tiene la función de retrasar la señal determinados ciclos de reloj para asegurar una señal digital ya sea uno o cero lógicos dependiendo el caso [4].

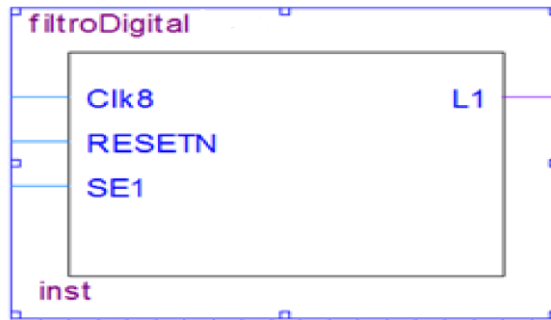


Figura 5.10: Bloque de filtro digital.

5.3 Tangente hiperbólica

Para controlar los ejes X y Z se utiliza un controlador tangente hiperbólica, debido a que es una función saturada continua, por lo cual se asegura que la electrónica trabaje dentro de los voltajes permitidos. En la figura 5.11 se muestra el bloque del controlador tangente hiperbólica tanh; en el cual la entrada kp[31..0] la cual es multiplexada para las ganancias proporcional y derivativa. La salida tiene un bus de datos de 32 bits.

El módulo ninegag es donde se calcula la ley de control tangente hiperbólica, y donde recibimos la posición actual del encoder y la posición deseada que se envía desde LabVIEW; la salida dtanh [31..0] manda el error a la entrada err[31..0] del bloque tanh.

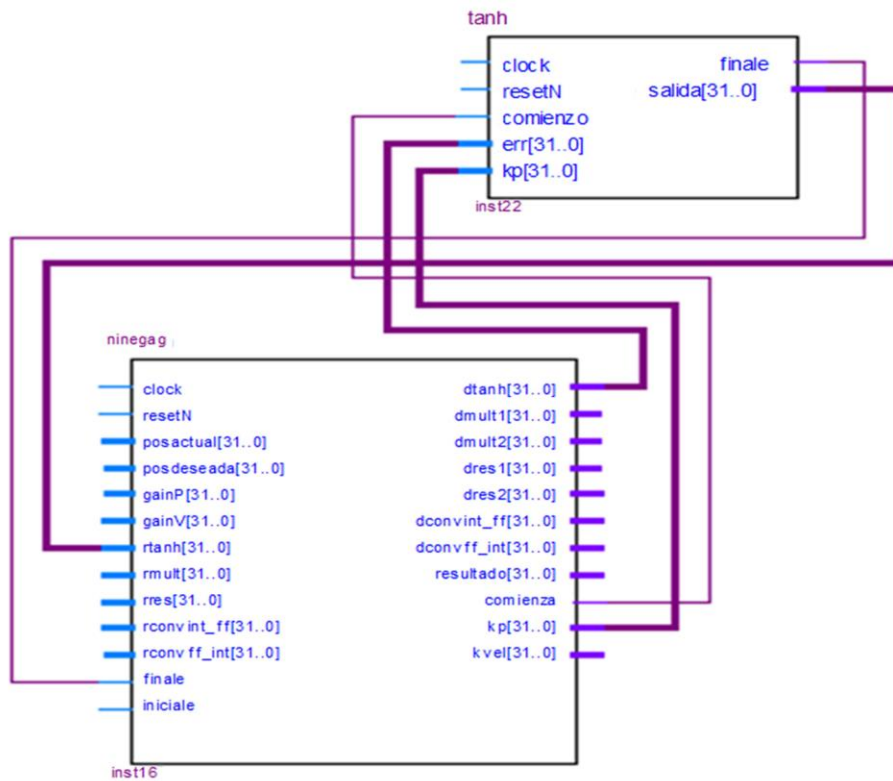


Figura 5.11: Módulos del control tangente hiperbólico.

En la Figura 5.12 se muestra el diagrama de estados del firmware para el módulo de control tangente hiperbólica, que se utilizó para controlar el robot de 3 gdl, el cual se procede a explicar más adelante.

$$\tau = K_p * \tanh(\tilde{q}) - K_v * \tanh(\dot{q}) \quad (5.1)$$

donde:

τ = Torque

K_p = Ganancia proporcional

K_v = Ganancia derivativa

\tilde{q} = Error

\dot{q} =Velocidad

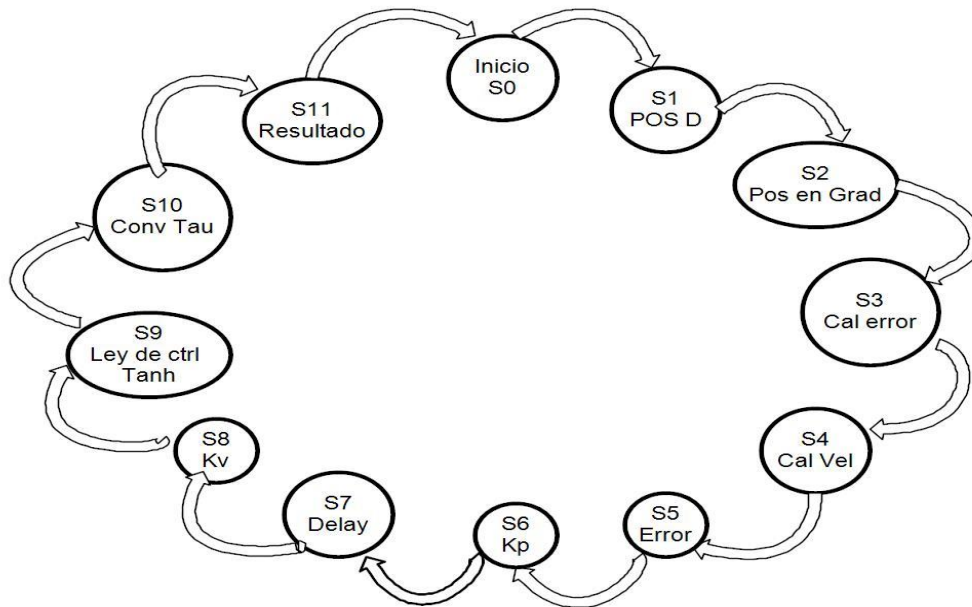


Figura 5.12: Máquina de estados para la ley de control tangente hiperbólica.

donde:

- Estado 0: Se inicializa el control.
- Estado 1: Se recibe la posición deseada de LabView.
- Estado 2: Calculo de Posición actual en grados.
- Estado 3: Calculo de error Posición deseada menos Posición actual.
- Estado 4: Calculo de velocidad Posición actual menos Posición anterior.
- Estado 5: En este estado el error ya está disponible y la derivada del factor de división.
- Estado 6: Ganancia proporcional K_p (alfa1).
- Estado 7: Se pierde un estado para calcular la nueva tangente hiperbólica.
- Estado 8: Ganancia derivativa K_v (alfa 2).
- Estado 9: Se hacer la resta para obtener el torque $k_p * \tanh(\tilde{q}) - k_v * \tanh(\dot{q})$.
- Estado 10: Se hace la conversión del torque de flotante a entero.
- Estado 11: Se publica el resultado y está listo para el siguiente experimento de la nueva posición deseada

5.4 Circuito generador del PWM

La modulación por ancho de pulsos es una técnica utilizada para regular la velocidad de giro de los motores eléctricos de inducción o asíncronos. Mantiene el par del motor constante y no tiene un desaprovechamiento de la energía eléctrica. Se utiliza tanto en corriente continua como en alterna, como su nombre lo indica, al controlar: un momento alto (encendido o alimentado) y un momento bajo (apagado o desconectado).

Para utilizar el modulador de ancho de pulso se necesita trabajar con ciertas frecuencias, ya que cada motor trabaja con diferentes frecuencias, aunque sea el mismo tipo de motor con la misma características mecánicas no funcionara con el mismo tipo de frecuencia, por eso se realizó la caracterización del motor, explicada en un capítulo anterior, en dicha caracterización se encontraron dos frecuencias diferentes de trabajo para nuestros actuadores, las frecuencias encontradas fueron las de 453 Hz y 200 Hz.

Para poder generar la frecuencias de 453 Hz y 200 Hz en el FPGA se deben realizar dos divisores de frecuencia, se trabaja con 8 bits esto quiere decir que nuestras frecuencias debe de ser 255 veces más rápida, esto nos genera un valor de 115.51 KHz para la primera frecuencia y 51KHz para la segunda obtenemos el periodo de estas frecuencias y nos dan un valor de 8.65µs para la primera frecuencia y 19.60 µs para el segundo, como ya se conoce el periodo con el que se va a trabajar, ahora utilizamos el valor del reloj del FPGA que es de 100MHz, obtenemos el periodo de esta frecuencia que es de 10 ns y la dividimos por el periodo con el que se va a trabajar y este nos da el valor de 865 para el primer motor y 1960 para el segundo motor estos son los valores que toman los contadores para generar la frecuencia de 453 Hz y 200 Hz como se puede observar en las ecuaciones.

$$T = \frac{1}{Frecuencia} = \textit{Periodo de la señal} \quad (5.2)$$

$$\textit{cuenta maxima} = \frac{T}{10ns} \quad (5.3)$$

Primer motor

Para el primer motor se obtiene el valor de la cuenta máxima para poder realizar el divisor de frecuencia, para la frecuencia de 453 Hz obtenemos 865.

$$T = \frac{1}{115.51 \text{ Hz}} = 8.65\mu\text{s} \quad (5.4)$$

$$\textit{cuenta maxima} = \frac{8.65\mu\text{s}}{10ns} = 865 \textit{ cuenta maxima} \quad (5.5)$$

Segundo motor

Para el segundo motor se obtiene el valor de la cuenta máxima para poder realizar el divisor de frecuencia, para la frecuencia de 200 Hz obtenemos 1960.

$$T = \frac{1}{51\text{kHz}} = 19.60 \mu\text{s} \quad (5.6)$$

$$\text{cuenta maxima} = \frac{19.60 \mu\text{s}}{10\text{ns}} = 1960 \text{ cuenta maxima} \quad (5.7)$$

A continuación, se muestra en la figura 5.13 los diagramas de flujo del divisor de frecuencia en el inciso a) se muestra el diagrama de flujo de la frecuencia de 200 Hz y en el b) se presenta el de la frecuencia de 453Hz.

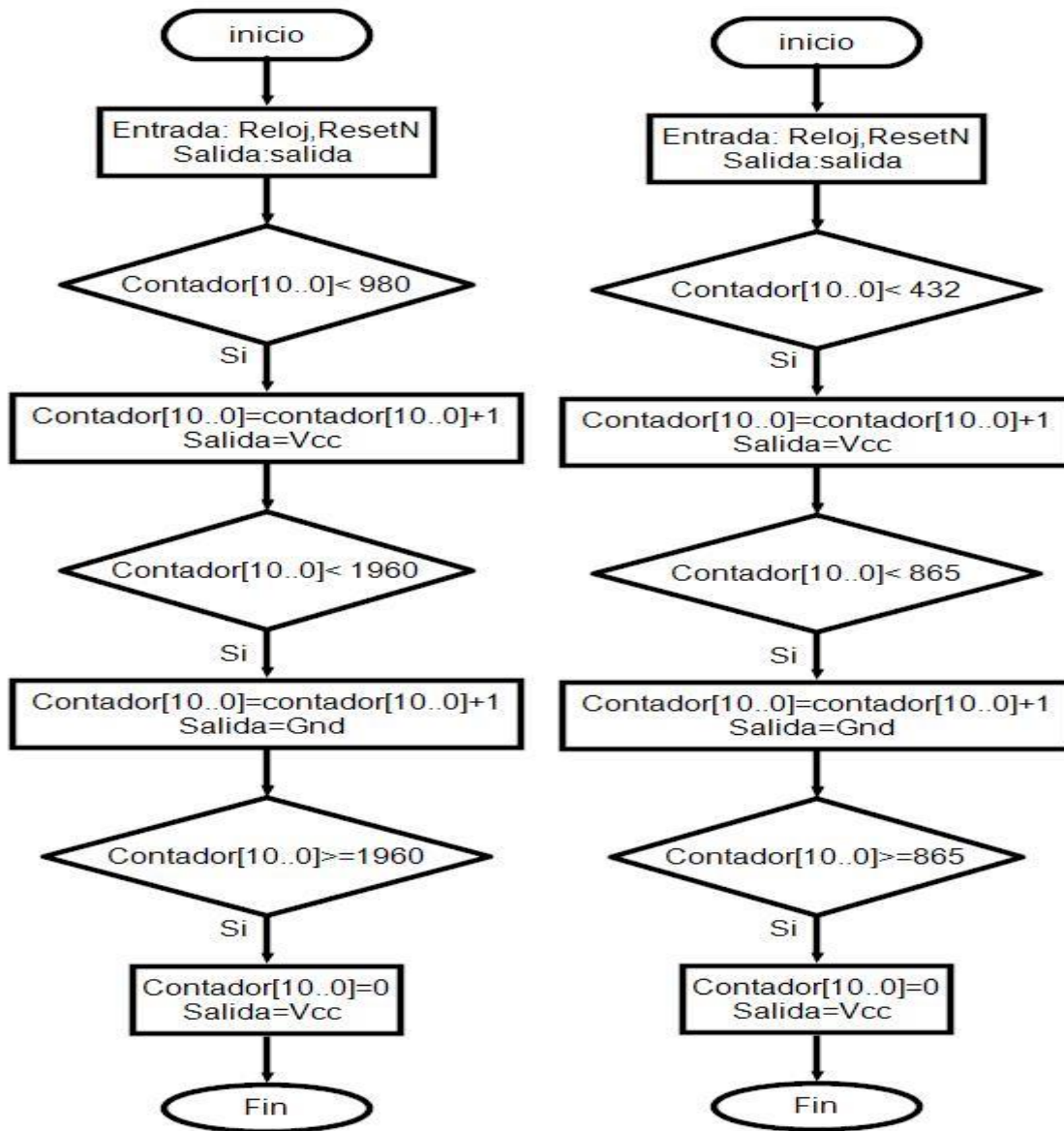


Figura 5.13 : (a) Frecuencia de 200Hz

(b) Frecuencia de 453Hz

En la Figura 5.14 podemos observar el bloque PWM0 que manda las salidas PWM_A Y PWM_B al driver diseñado que posiciona al sistema en el lugar deseado. La entrada torqueIn[15..0] es la que proviene del bloque de control de la salida resultado[31..0] la cual se convierte en un bus de 16 bits en el bloque Conversión de resultado RESCONV. Dentro de este bloque se selecciona la dirección del giro del motor según la posición deseada que se requiera, también se observa en la figura 5.15 el diagrama de flujo del PWM

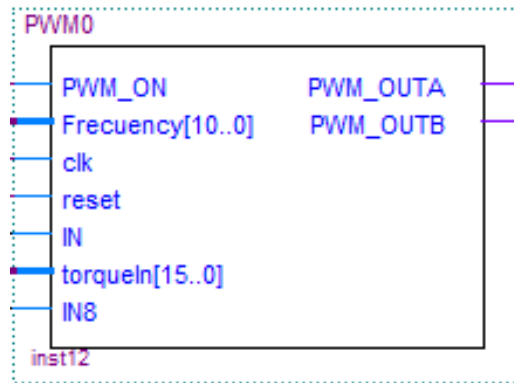


Figura 5.14: Bloque de PWM.

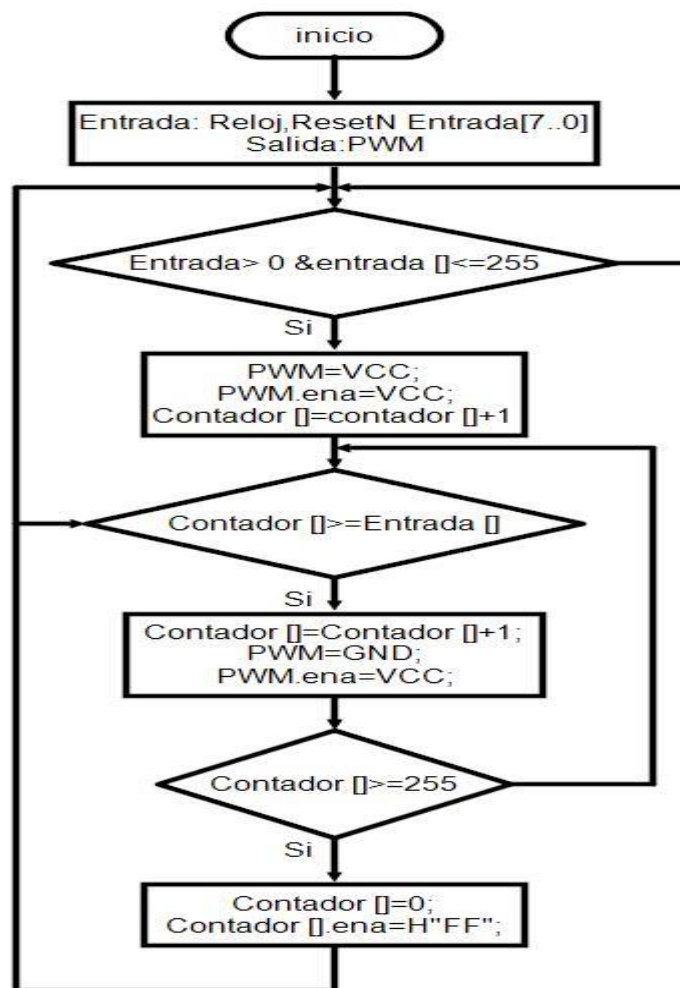


Figura 5.15: Diagrama de flujo del PWM.

5.5 Control del eje Y

Para poder controlar el eje Y se tuvo que realizar un divisor de frecuencia para poder disminuir la velocidad del FPGA y poder mandar los pulsos del motor a pasos a continuación se explica cómo se realizó el divisor de frecuencia. Para poder saber el periodo para la generación de 100 Hz, sabemos que trabajamos con 8 bits, esto quiere decir que nuestra frecuencia debe de ser 255 veces más rápida, esto nos genera un valor de 25.5 KHz esta frecuencia es la que se necesita, obtenemos el periodo de esta frecuencia y nos da un valor de $39.21\mu\text{s}$, como ya se conoce el periodo con el que se va a trabajar, ahora utilizamos el valor del reloj del FPGA que para este caso es de 100MHz, obtenemos el periodo de esta frecuencia que es de 10 ns y la dividimos por el periodo con el que se va a trabajar y este nos da el valor de 3921 y este el valor que tomara nuestro contador para generar la frecuencia de 100 Hz como se puede observar en las ecuaciones, en la figura 5.16 se muestra el diagrama de flujo del divisor de frecuencia a 100 Hz.

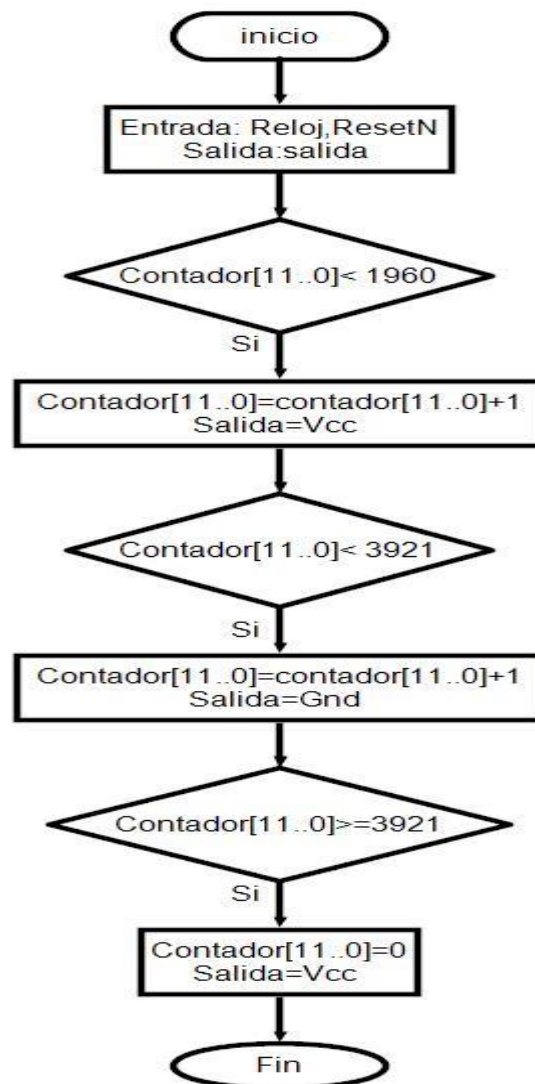


Figura 5.16: Diagrama de flujo de divisor de frecuencia a 100Hz.

Sabiendo que

$$T = \frac{1}{25.5\text{KHz}} = 39.21\mu\text{s} \quad (5.8)$$

$$\text{cuenta maxima} = \frac{39.21\mu\text{s}}{10\text{ns}} = 3921 \text{ cuenta maxima} \quad (5.9)$$

Una vez obtenida nuestra frecuencia de 100 Hz obtenemos nuestro divisor de frecuencia con el cual vamos a poder enviar los pulsos de las bobinas del motor a pasos

A continuación, se muestra en la figura 5.17 el bloque del motor a pasos al cual se le manda la posición y el giro y esta manda una serie de secuencias en para la bobina del motor a pasos

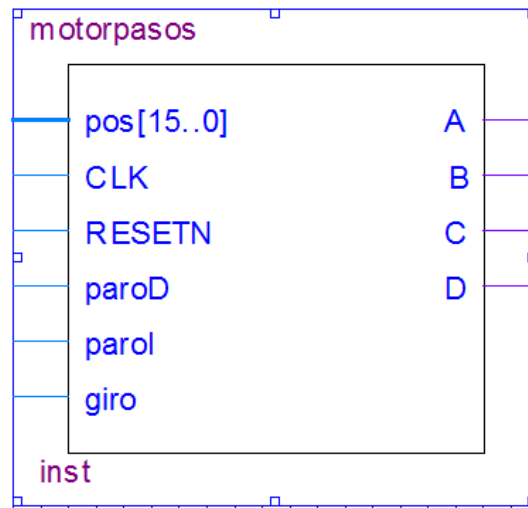


Figura 5.17: Bloque de motor a pasos.

Secuencia del motor a pasos para cada una de las bobinas se activan en alto o en bajo dependiendo la secuencia que se envié como se muestra en la tabla 5.2.

Secuencias	A	B	C	D
1	ON	OFF	ON	OFF
2	ON	OFF	OFF	OFF
3	OFF	ON	OFF	ON
4	OFF	ON	ON	ON

Tabla 5.2: Secuencias de motor a pasos.

Estas cuatro secuencias se programan en una máquina de estados con un contador para poder enviar las señales de alto y bajo en cada bobina y lograr que el motor a pasos se mueva dependiendo el valor de numero de secuencias que se envíen como se muestra en la figura 5.18.

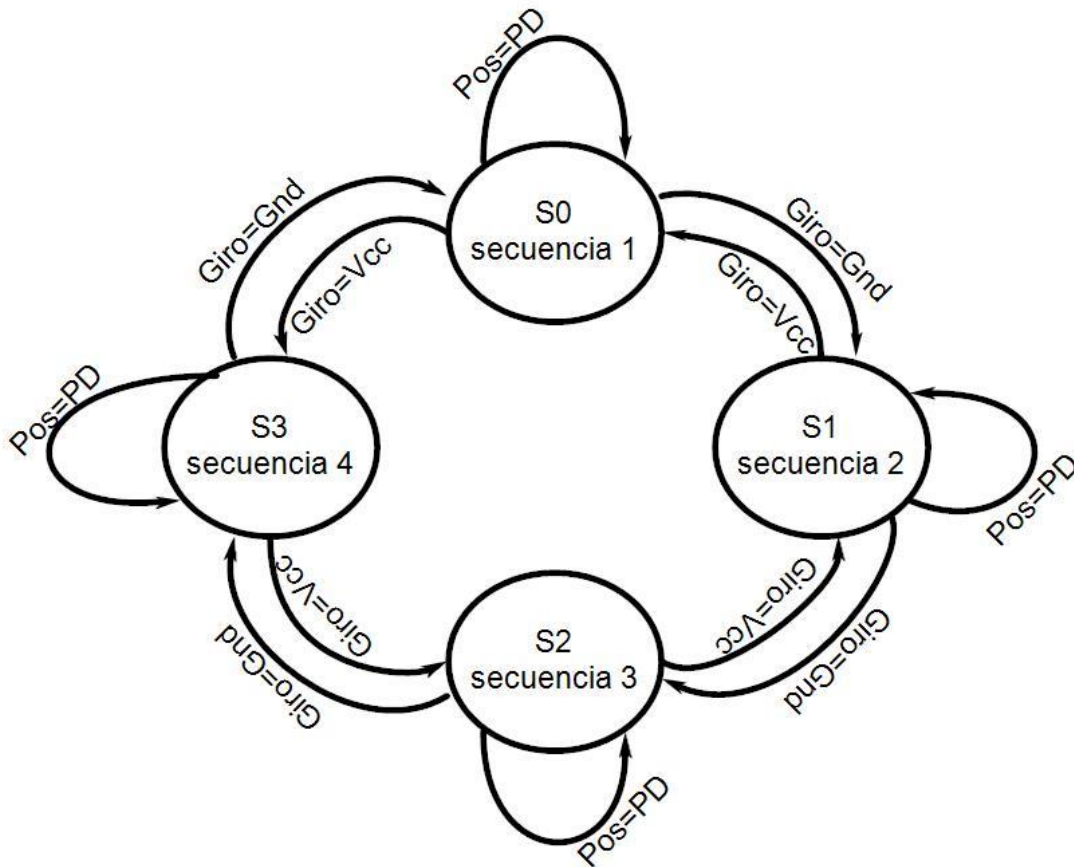


Figura 5.18: Máquina de estados para el motor a pasos.

5.6 Diagrama final del firmware del robot cartesiano

Se muestra en la figura 5.19 el diagrama completo del firmware del robot cartesiano de 3 gdl .

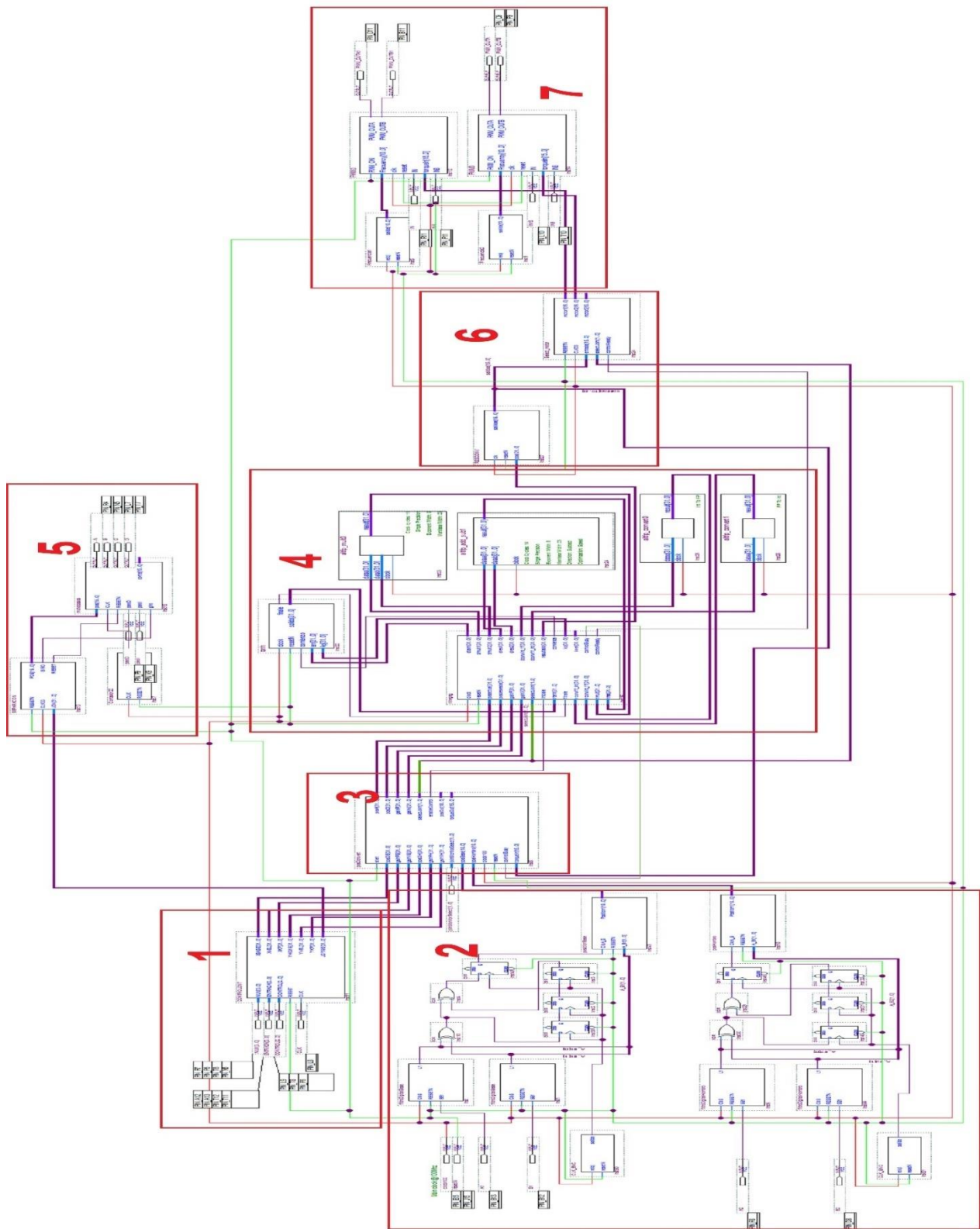


Figura 5.19: Firmware completo del robot cartesiano.

Posteriormente, se describirán los bloques ya antes mencionados, pero ya en conjunto, para poder realizar la adquisición de datos del sistema y envío de información, para lograr realizar el control de nuestro robot cartesiano.

En la figura 5.20 se pueden observar el bloque número 1 el cual realiza la adquisición de los datos que se envían de LabVIEW al Pic el bloque almacena las ganancias proporcional, derivativa y la posición deseada por medio de 12 bits que se dividen en 2 paquetes de 4 bits donde un paquete es de dato y el otro es de numeración para identificar cada uno de los datos y no perder ninguno, posteriormente se envía un paquete de 3 bits que son de control el cual nos ayuda a identificar las ganancias y la posición deseada y por último se envía el reloj para poder sincronizar el Pic con el FPGA .

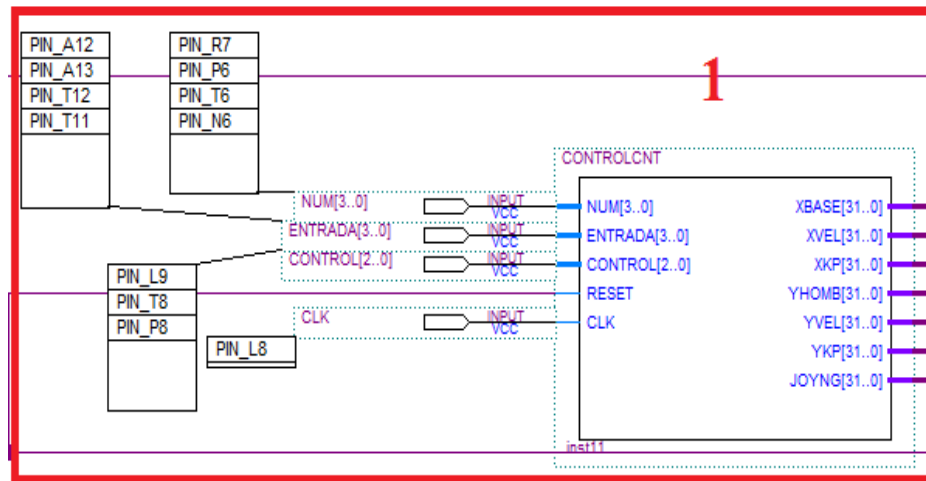


Figura 5.20: Bloque 1.

En la figura 5.21 se muestra el bloque 2 donde se reciben las señales de los encoders de los motores para poder procesar las señales de cada una de las señales A,B y poder saber cuál es la posición en la que se encuentra nuestro sistema.

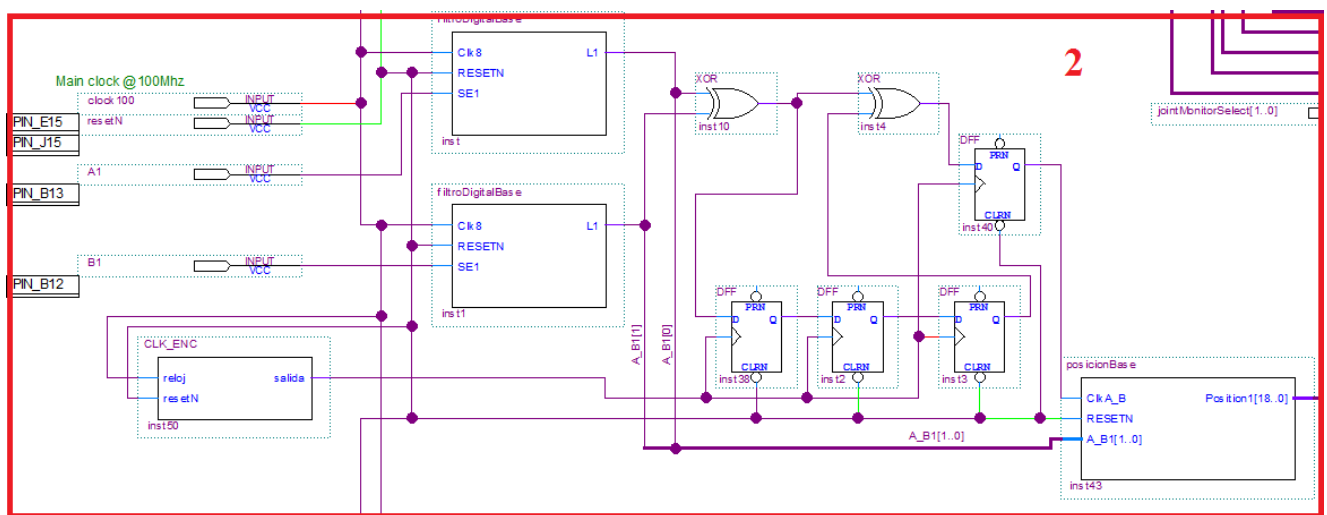


Figura 5.21: Bloque 2.

En la figura 5.22 se muestra el bloque 3 donde se reciben las posiciones deseadas, las ganancias y la posición que envían los encoders, para que posteriormente sean enviadas una por una, para poder aplicar el control tangente hiperbólica.

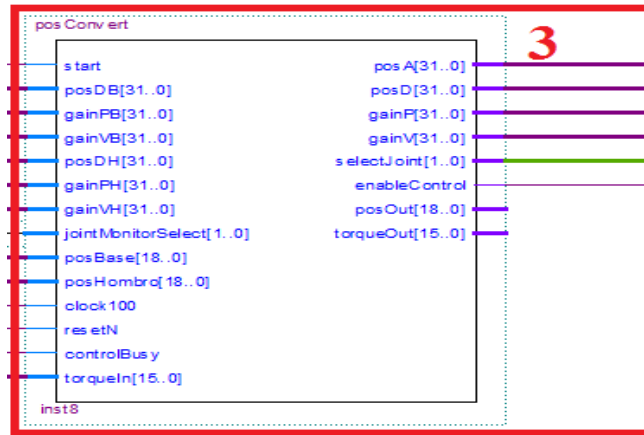


Figura 5.22 Bloque 3

En la figura 5.23 se muestra el bloque 4, el control tangente hiperbólica en este bloque se realiza la ley de control donde llega la posición actual, las ganancias y la posición deseada para poder realizar las operaciones pertinentes y obtener el torque requerido.

Sabiendo que:

$$\tau = K_p * \tanh(\tilde{q}) - K_v * \tanh(\dot{q})$$

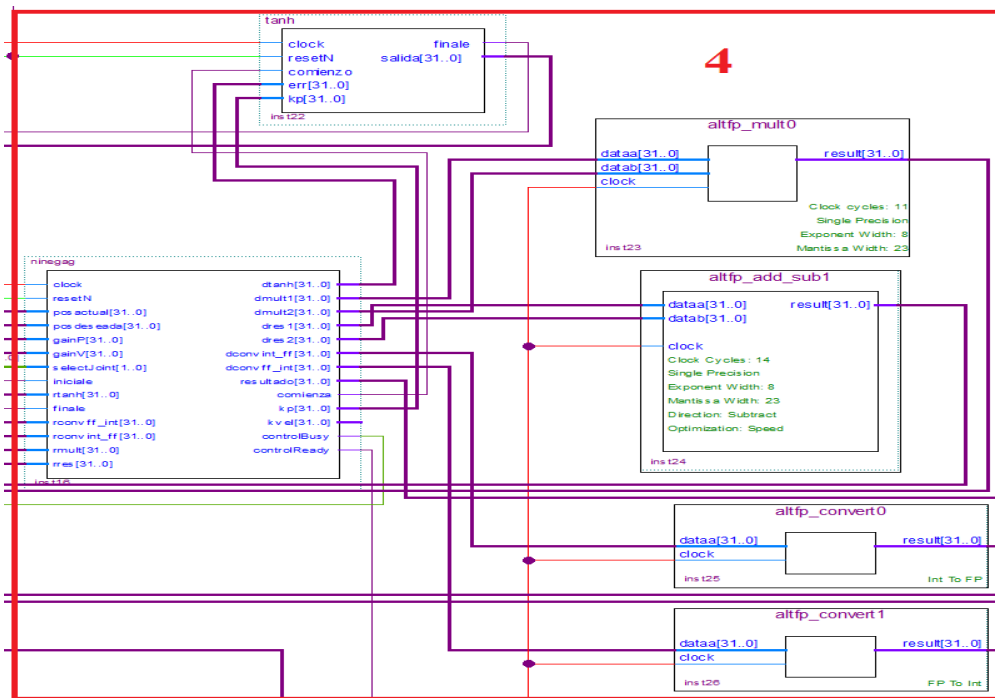


Figura 5.23: Bloque 4.

En la figura 5.24 se muestra el bloque 5 el firmware que controla el motor a pasos en lazo abierto el cual consta de un divisor de frecuencia a 100 Hz y un bloque que envía la posición deseada y el giro, teniendo la posición y la frecuencia se envían las secuencias antes mencionadas para poder activar cada una de las bobinas del motor a pasos.

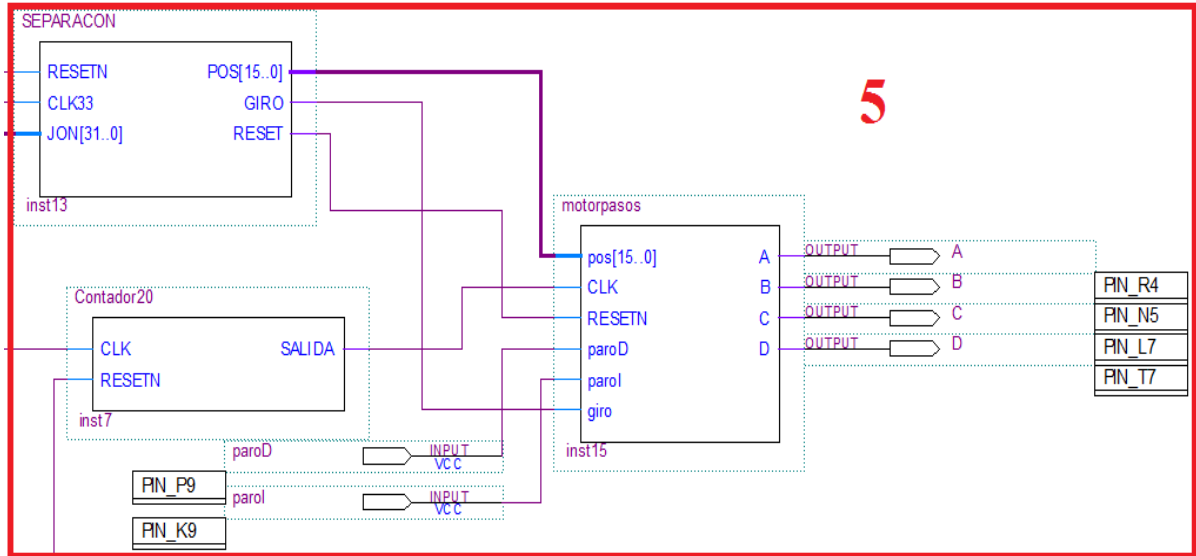


Figura 5.24: Bloque 5.

En la figura 5.25 se muestra el bloque 6 la parte del firmware donde el bloque Conversión de resultado resconv, Dentro de este bloque se selecciona la dirección del giro del motor según la posición deseada que se requiera, se envía el torque que nos provee el controlador y posteriormente se envía a cada uno de los ejes a controlar.

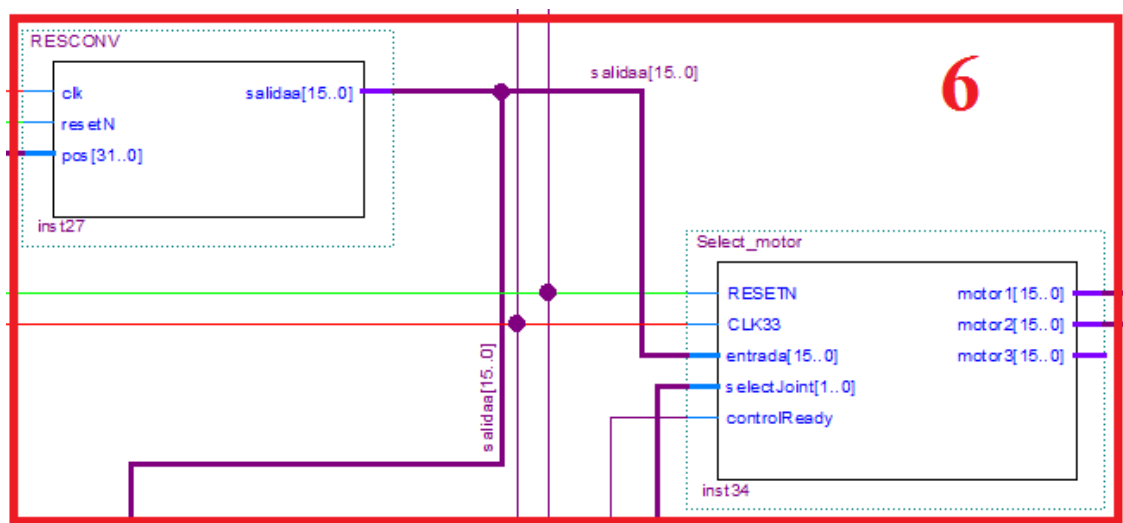


Figura 5.25: Bloque 6.

En la figura 5.26 se muestra el bloque 7 la parte del firmware donde se envia el pwm y la frecuencia a la cual trabaja cada uno de los motores, en este bloque de frecuencia se proporciona la frecuencia que necesita el motor, como ya se había mencionado con anterioridad cada motor trabaja a distintas frecuencias, las frecuencias de trabajo de cada motor después de caracterizarlos fueron de 453 Hz y 200 Hz, el bloque de PWM proporciona la cantidad de ancho de pulso necesario para poder controlar la cantidad de par necesario al motor.

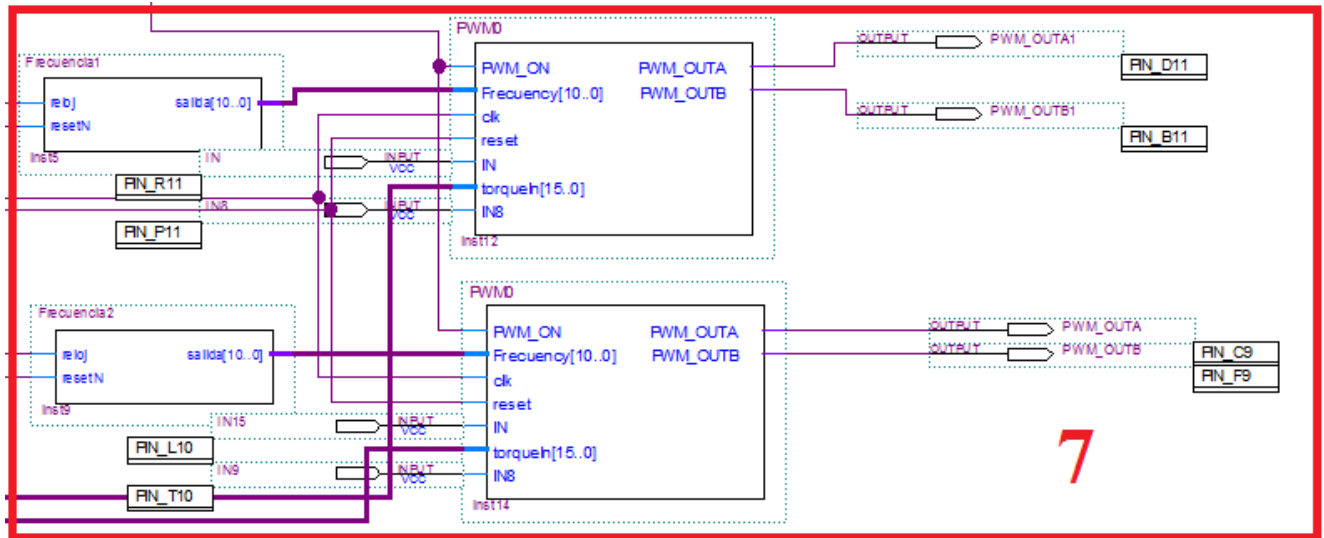


Figura 5.26: Bloque 7.

5.7 Software del sistema

Para poder manipular la posición deseada del robot de 3 gdl se realizó una interfaz de usuario en el ambiente de programación LabVIEW, en la figura 5.27 podemos observar la estructura del diagrama a bloques de dicha interfaz.

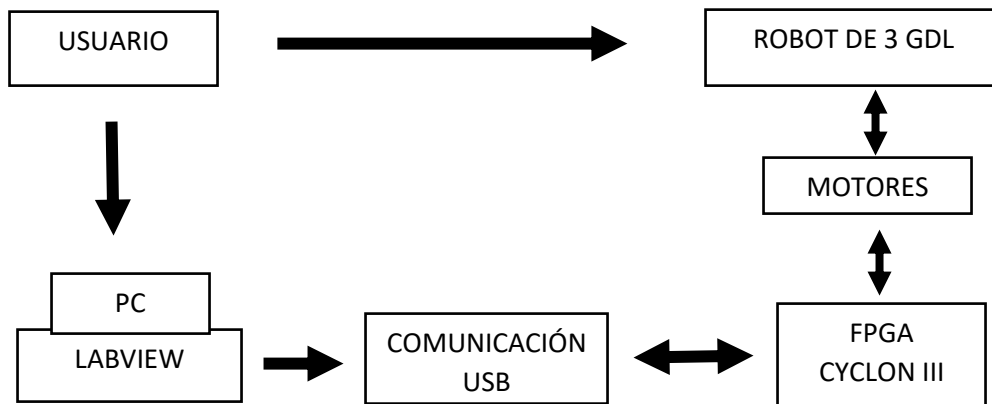


Figura 5.27 Diagrama a bloques de la interfaz de usuario

5.7.1 Diseño de la interfaz de usuario

En la Figura 5.28 se muestra la interfaz de usuario desarrollada en LabVIEW ya que es un entorno de programación destinado al desarrollo de aplicaciones, similar a los sistemas de desarrollo comerciales que utilizan el lenguaje C o BASIC. Sin embargo, LabVIEW se diferencia de dichos programas en un importante aspecto: los lenguajes de programación se basan en líneas de texto para crear el código fuente del programa, mientras que LabVIEW emplea la programación gráfica o lenguaje G para crear programas basados en diagramas de bloques. Por ese motivo se eligió esta herramienta ya que el usuario podrá familiarizarse rápidamente con el programa en donde podrá colocar la posición deseada en milímetros para que el robot llegue a la posición requerida.

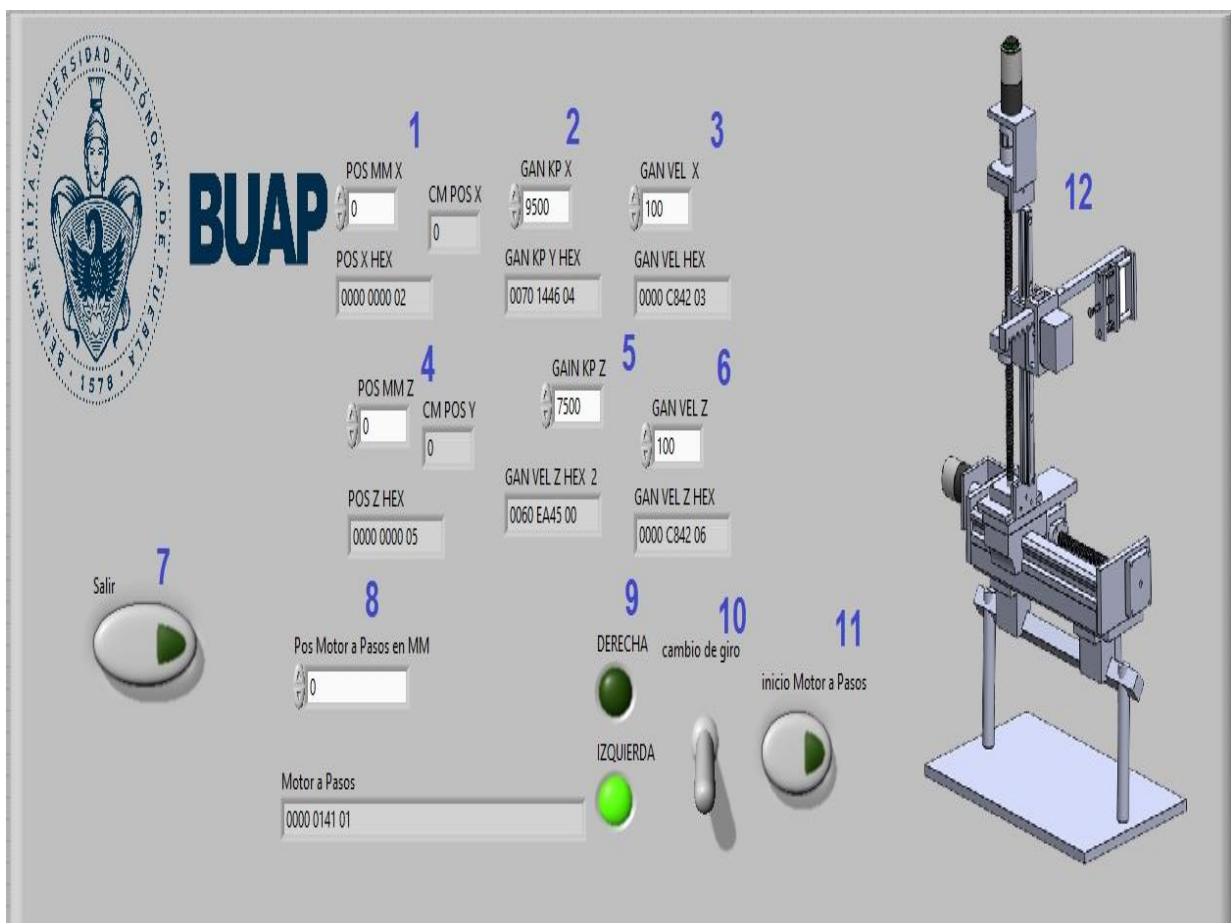


Figura 5.28: Interfaz de usuario para mandar las posiciones deseadas.

A

continuación, se explican cada una de las partes de la interfaz del usuario.

- 1) Posición deseada en milímetros del eje X
- 2) Ganancia proporcional del eje X
- 3) Ganancia derivativa del eje X

- 4) Posición deseada en milímetros del eje Z
- 5) Ganancia proporcional del eje Z
- 6) Ganancia derivativa del eje z
- 7) Botón de salida del programa
- 8) Posición deseada en milímetros del eje Y
- 9) Indicadores leds del giro del motor
- 10) Selector de cambio de giro
- 11) Iniciar movimiento del eje
- 12) Diseño del robot de 3 gdl.

5.7.2 Programa de adquisición y envío de datos

Como protocolo de comunicación se ocupa el USB , El USB es una comunicación serie de alta velocidad. Ha sustituido en gran medida al famoso puerto serie RS-232, ello se debe en gran medida a que el USB utiliza señales digitales TTL, mientras que el puerto serie utiliza señales digitales entre -12 y +12 voltios, además de la gran diferencia de velocidad de transmisión entre ambos dispositivos. La transmisión del USB se realiza mediante un cable de cobre de par trenzado con una impedancia de unos 90 ohm llamados D+ y D-. Estos pueden dar energía a dispositivos externos, con una tensión de 5V y un máximo consumo de 500mA. Los datos se envían por transferencias Bulk se realizan de forma relativamente rápida si el bus dispone de mucho ancho de banda libre. En un bus USB con mucho ancho de banda reservado, la transferencia puede alargarse durante periodos de tiempo relativamente grandes.

Las funciones de acceso al puerto USB con el microcontrolador PIC18F4550 se realizan mediante la librería mpushapi.dll Para hacer uso de esta librería en LabVIEW se utiliza el VI Call Library Fuction Node ver figura 5.29.

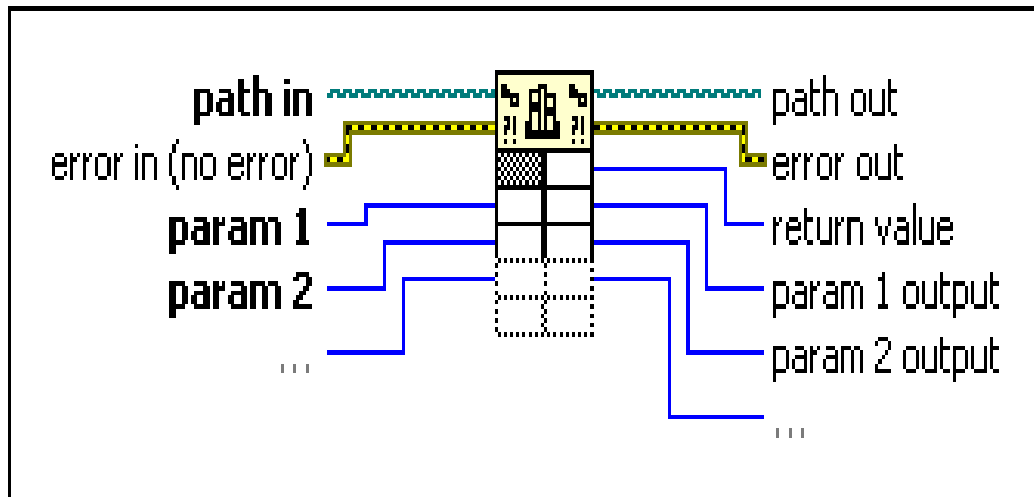


Figura 5.29: Call Library Function Node.

Con este VI es posible asignarle parámetros a las funciones que contiene la librería mpushapi.dll para enviar y recibir datos. Los pasos para utilizar la librería en LabVIEW se muestran en el diagrama siguiente figura 5.30.

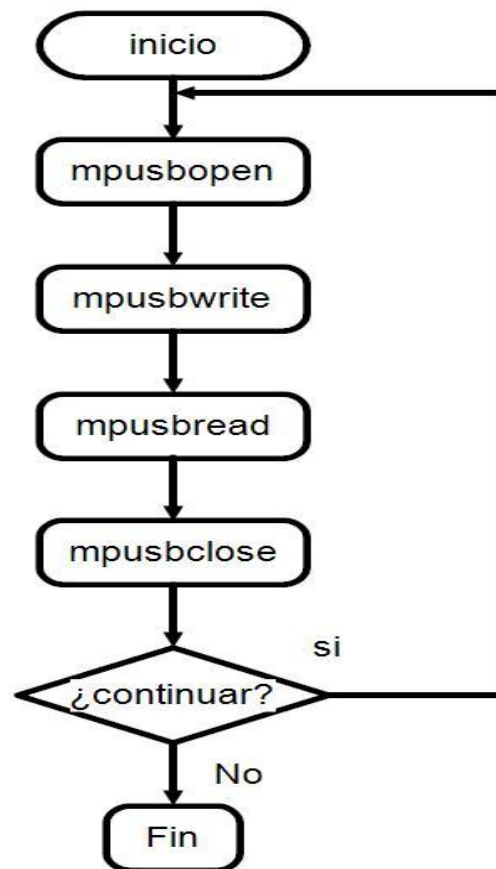


Figura 5.30: Diagrama de configuración de librería mpushapi.

Teniendo esto en cuenta los SubVi de lectura y escritura se muestran en la siguiente figura 5.31.

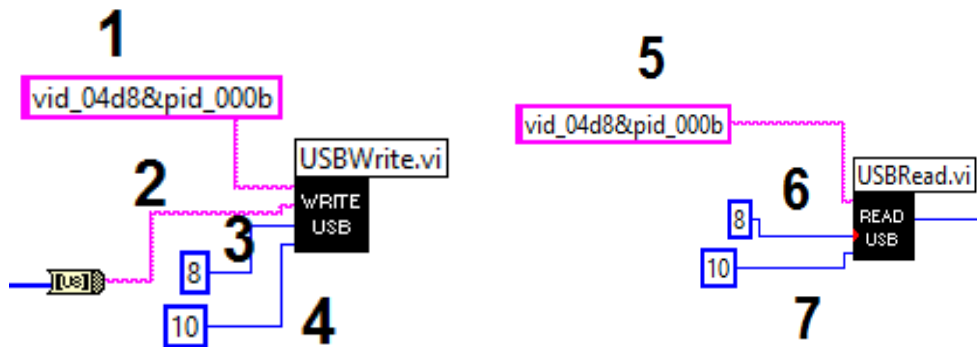


Figura 5.31: SubVi de lectura y escritura.

donde:

- 1) Vid_Pid: Es el nombre del vendedor y producto con el que fue configurado el dispositivo, en este caso: "vid_04d8&pid_000b"
- 2) Dato a Enviar: Indica el dato que se va a enviar.
- 3) N.bytes a escribir: Indica el número de bytes o el tamaño del dato que se va a transferir.
- 4) Retardo de salida: Indica cada cuánto tiempo se realizará la captura de datos. El tiempo tiene que indicarse en milisegundos.
- 5) Vid_Pid: Es el nombre del vendedor y producto con el que fue configurado el dispositivo, en este caso: "vid_04d8&pid_000b"
- 6) Dato Recibido: En esta parte es donde se capturan los datos que se estén recibiendo.
- 7) Retardo de entrada: Indica cada cuánto tiempo se realizará la captura de datos. El tiempo tiene que indicarse en milisegundos.

Teniendo la comunicación LabVIEW, Pic y FPGA procedemos a realizar el programa en LabVIEW para enviar las posiciones de cada uno de los ejes del sistema

Para mandar la posición del eje X, se observa en la figura 5.32 el esquema; para el cual se asigna el valor de la posición deseada en milímetros, el cual el usuario proporciona en decimal y es convertido en hexadecimal, este valor y el valor del comando de control se concatenan y se envían mediante USB Write el cual escribirá los datos en el Pic para poderlos procesar en el FPGA.

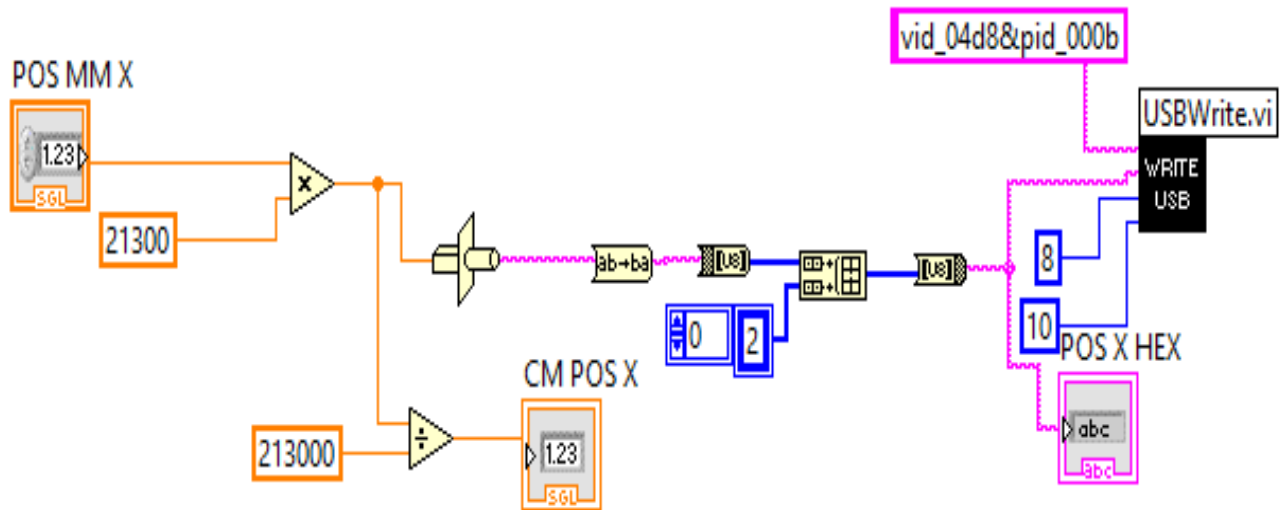


Figura 5.32: Diagrama de posición del eje X.

Para mandar la Ganancia Proporcional del eje X, se observa en la figura 5.33 el esquema; para el cual se asigna el valor de la Ganancia deseada, se proporciona en decimal y es convertido en hexadecimal, este valor del comando de control se concatena y se envían mediante USBWrite el cual escribirá los datos en el pic para poderlos procesar en el FPGA.

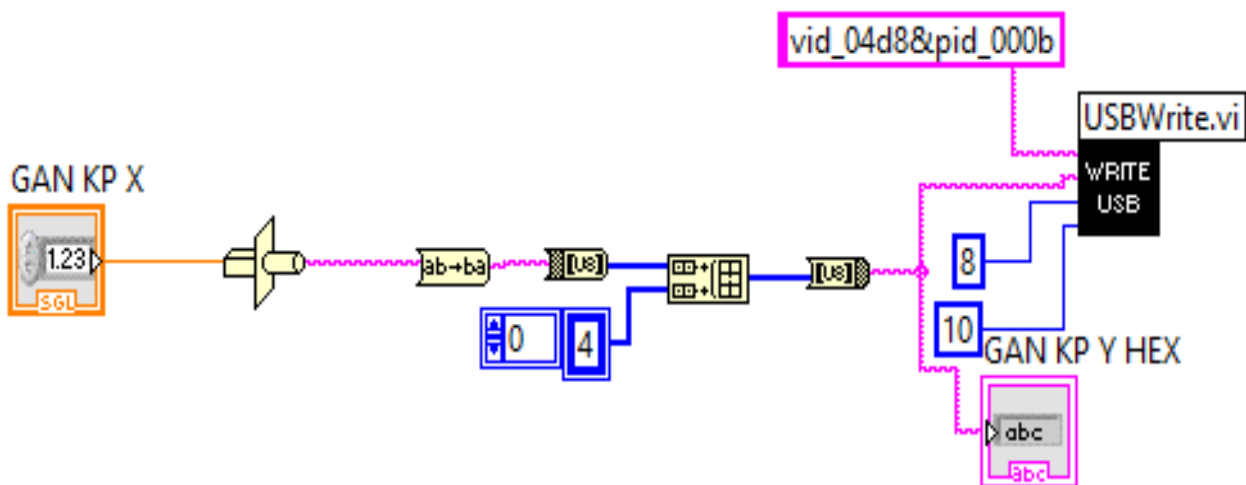


Figura 5.33: Diagrama de Ganancia proporcional.

Para mandar la Ganancia derivativa del eje X, se observa en la figura 5.34 el esquema donde se utiliza el mismo principio para el cual se asigna el valor de la Ganancia deseada, el cual se proporciona en decimal y es convertido en hexadecimal, el valor del comando de control se concatena y se envían mediante USB Write el cual escribirá los datos en el Pic para poderlos procesar en el FPGA.

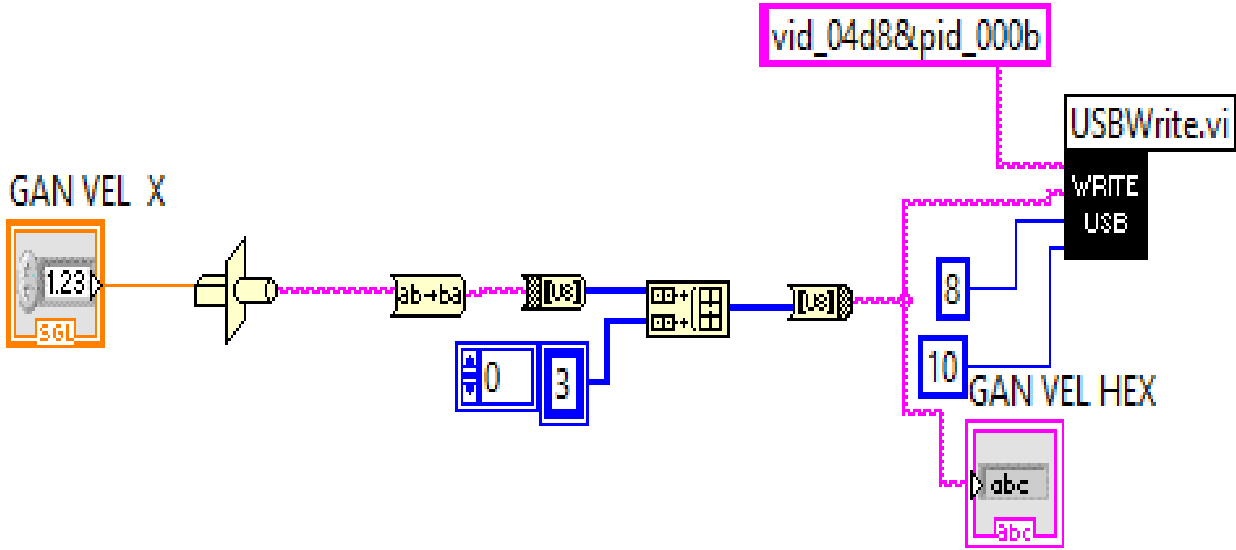


Figura 5.34: Diagrama de Ganancia Derivativa.

Este mismo procedimiento se repite para el eje Z

En la figura 5.35 se muestran los bloques para enviar la posición del eje Z

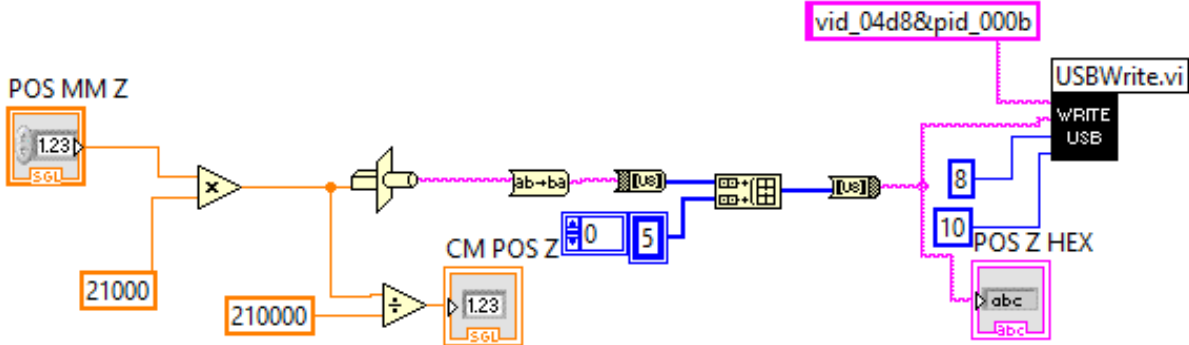


Figura 5.35: Diagrama de posición del eje Z.

En la figura 5.36 se muestran los bloques que nos sirven para enviar la ganancia derivativa

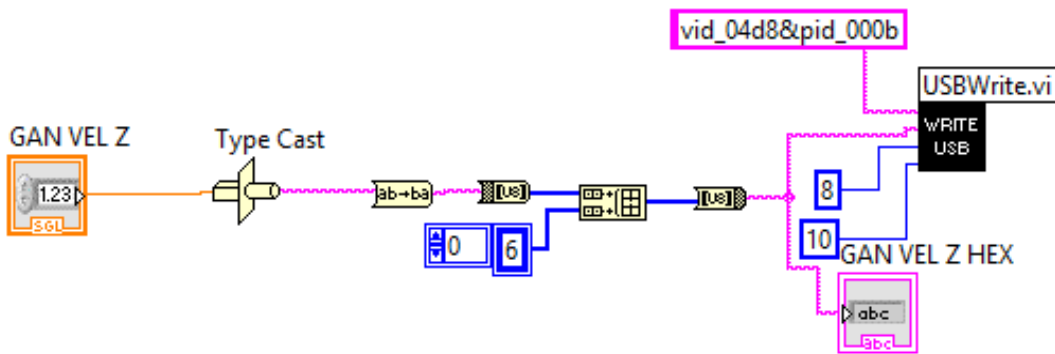


Figura 5.36: Diagrama de Ganancia Derivativa.

En la figura 5.37 se muestran los bloques que envían el valor de la ganancia proporcional

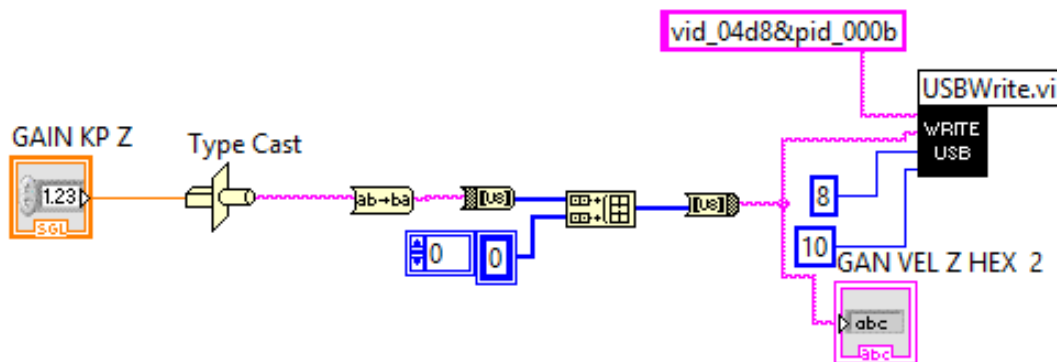


Figura 5.37: Diagrama de Ganancia proporcional.

Para enviar la posición del eje Y se hizo la conversión del número de cuentas del motor a pasos a milímetros se concatena con el valor del giro del motor y la señal de inicio del motor, todo esto se envía en un paquete de 32 bit convertido en hexadecimal mediante USB Write el cual escribirá los datos en el Pic para poderlos procesar en el FPGA y hacer el control del motor a pasos, en la figura 5.38 se muestra el diagrama de posición del eje Y .

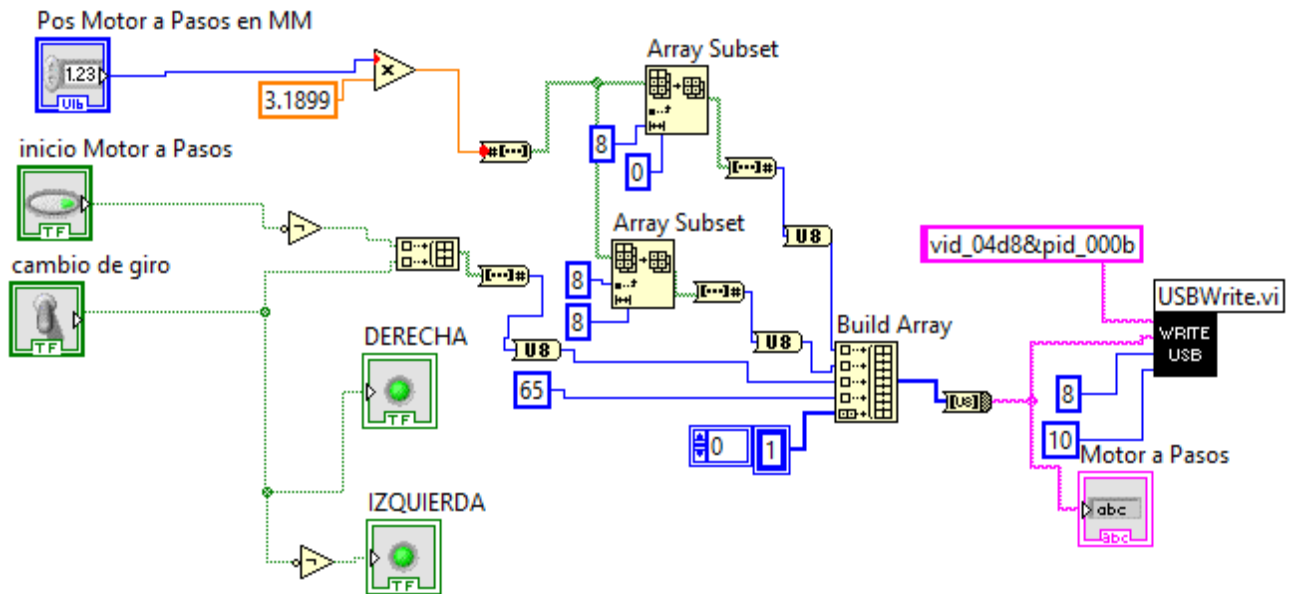


Figura 5.38: Diagrama de posición del eje Y.

5.8 Conclusión

El firmware para el robot de 3 gdl se realizó en Quartus II 13.0, el cual conforma el circuito lógico programable para llevar a cabo el control de posición deseada del sistema, mediante una tangente hiperbólica, de tal manera que nos proporcione una respuesta más suave por lo cual asegurar que los circuitos electrónicos no operen en su límite, también se desarrolló el software de usuario ya que es una interfaz practica que sirve de intermediaria para que el usuario pueda fijar posiciones deseadas. El software se realizó en LabVIEW 12, el cual es nuestro control de mandos para que el usuario pueda fijar la posición deseada del sistema, las ganancias proporcional y derivativa.

Capítulo 6 : Resultados Experimentales.

En este capítulo se presentarán los resultados experimentales como: la caracterización de los motores, las señales de cuadratura del encoder y el sistema completo del robot de 3 grados de libertad.

6.1 Resultados de caracterización de los Motorreductores 37dx54L

En la tabla 6.1 se muestra la frecuencia a la que trabaja el primer motor de manera eficiente en este caso el motor trabaja a un voltaje nominal de 12 volts y la frecuencia es de 453Hz esta frecuencia va ocasionar que el motor trabaje de manera lineal.

Voltaje nominal: 12v		
Frecuencia: 453Hz	Kilogramos (kg)	Torque
10%	0	0
20%	0.575	0.21491258
30%	1.475	0.55129748
40%	2.175	0.81293018
50%	3.05	1.13997105
60%	3.56	1.33058916
70%	4.115	1.53802652
80%	5.035	1.88188664
90%	5.65	2.11174965

Tabla 6.1: Ciclo de trabajo.

En la figura 6.1 se muestra la linealidad del motor a 453 Hz que depende del torque y del ciclo de trabajo que se varia del 10% al 90 %.

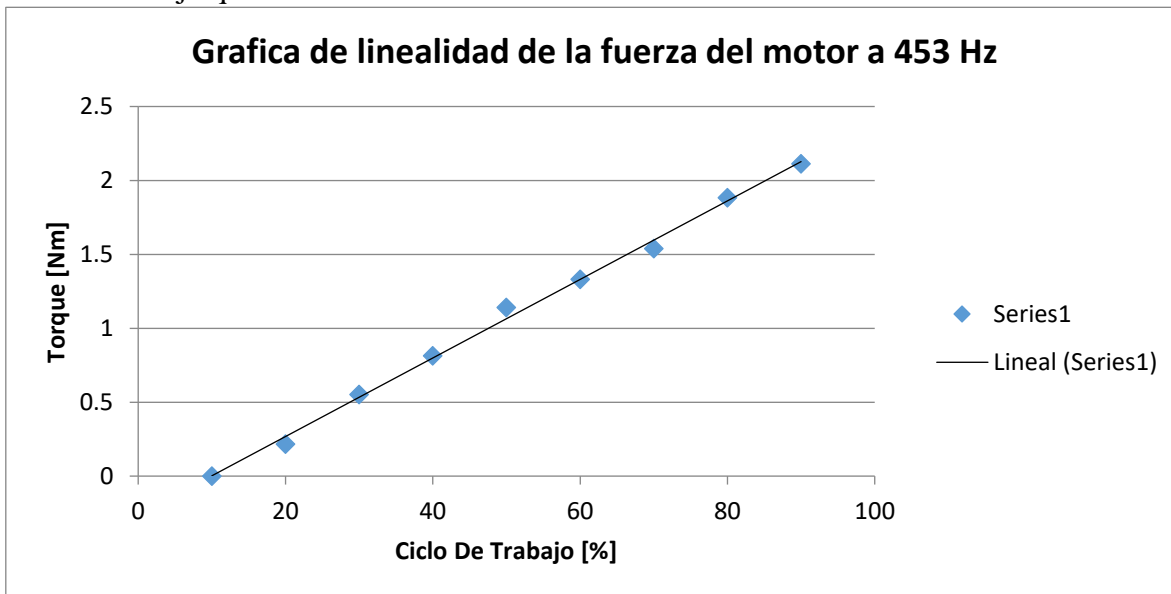


Figura 6.1: Grafica de linealidad de la fuerza del motor a 453 Hz.

En la tabla 6.2 se muestra la frecuencia a la que trabaja el segundo motor de manera eficiente en este caso el motor trabaja a un voltaje nominal de 12 volts y la frecuencia es de 200Hz esta frecuencia ayudara a que el motor trabaje de manera lineal.

Voltaje nominal: 12v		
Frecuencia: 200Hz	kilogramos(kg)	Torque
10	0.035	0.01308164
20	0.84	0.31395924
30	1.35	0.50457735
40	2.16	0.80732376
50	3.5	1.3081635
60	4.14	1.54737054
70	4.9	1.8314289
80	5.1	1.9061811
90	5.58	2.08558638

Tabla 6.2: Ciclo de trabajo.

En la figura 6.2 se muestra la linealidad del motor a 200 Hz que depende del torque y del ciclo de trabajo que se varia del 10% al 90 %.

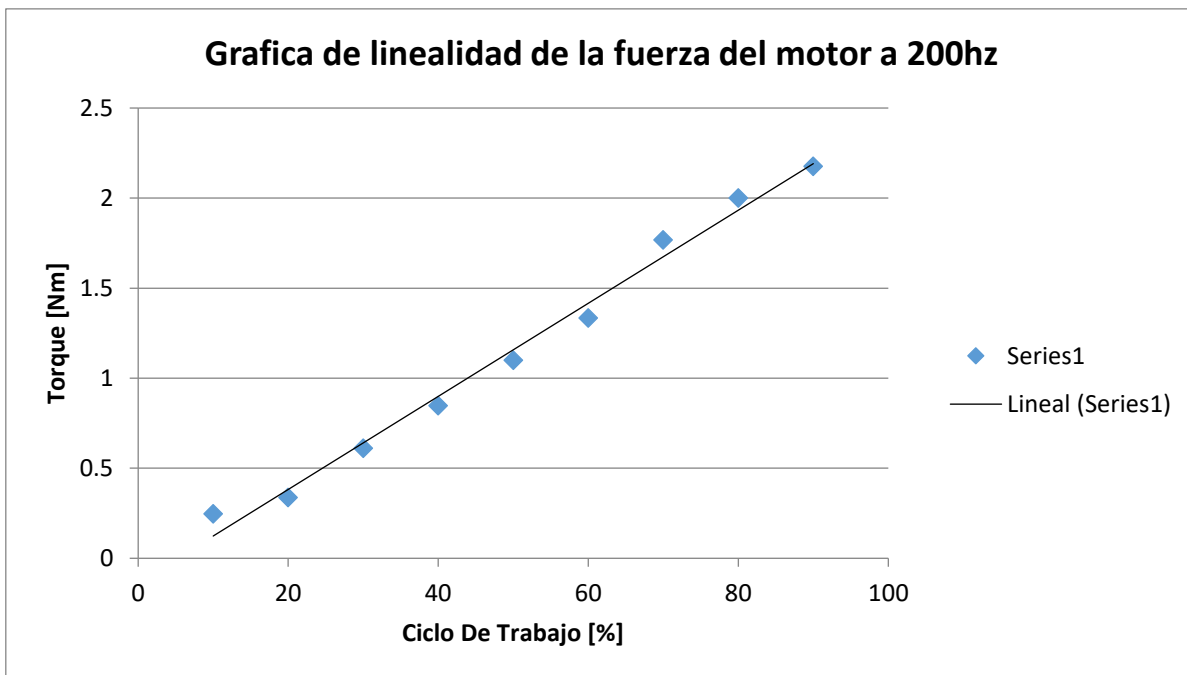


Figura 6.2: Grafica de linealidad de la fuerza del motor a 200hz.

6.1.1 Resultado de la señal de encoder

En la Figura 6.3 Se muestra las pruebas que se realizaron al encoder, el cual muestra un desfase de 90° entre los canales A y B, esto nos proporcionó el cambio de giro para llegar a la posición deseada

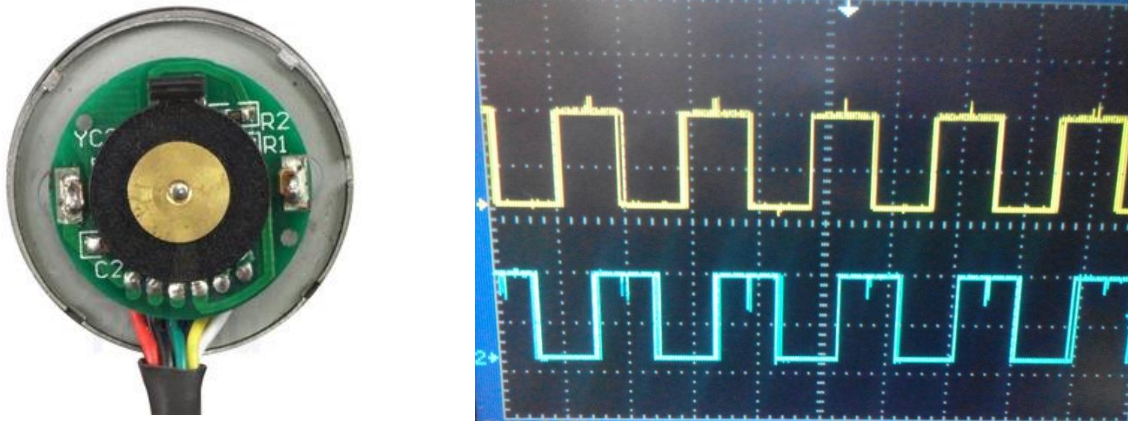


Figura 6.3: señales del encoder.

6.2 Resultado Etapa de control

En la figura 6.4 se muestra la etapa de potencia y la etapa de comunicación como también se muestran las conexiones que comunican al robot de 3 gdl, las conexiones contienen las señales de los encoders, la señal de pwm, las alimentaciones de los motores, las señales del motor a pasos y las señales de los fin de carrera de cada uno de los ejes.

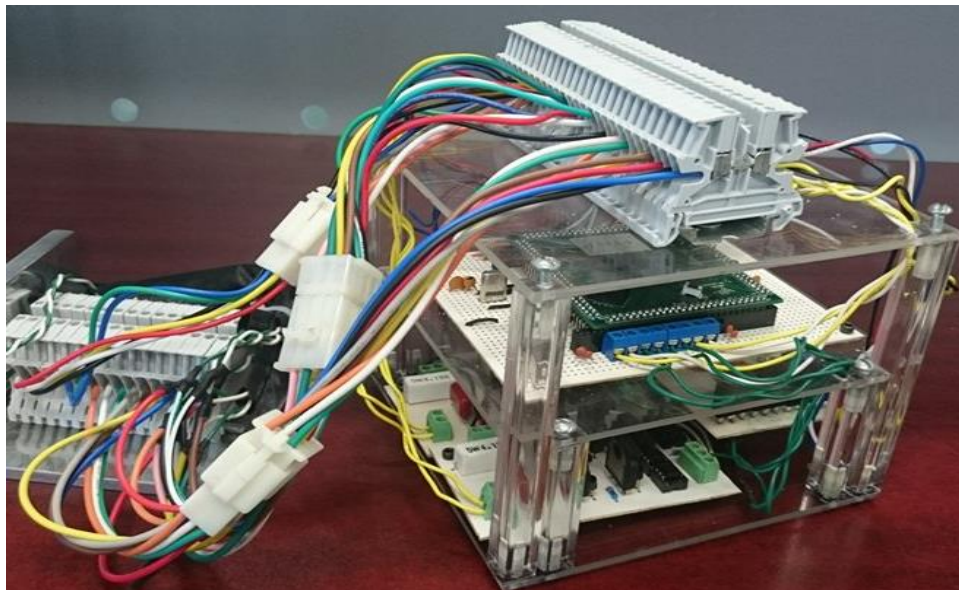


Figura 6.4: Etapa de control.

6.2.1 Resultado Robot de 3 gdl

En la figura 6.5 se muestran los 3 ejes que conforman el robot de 3 gdl el sistema completo tiene un peso de 7.465kg, el Peso del eje X es de 3.555kg, Peso del eje Z es de 2.005kg, Peso del eje Y 705 gr Peso extra de Clemas, conexiones y cadena porta cables es de 1.200kg

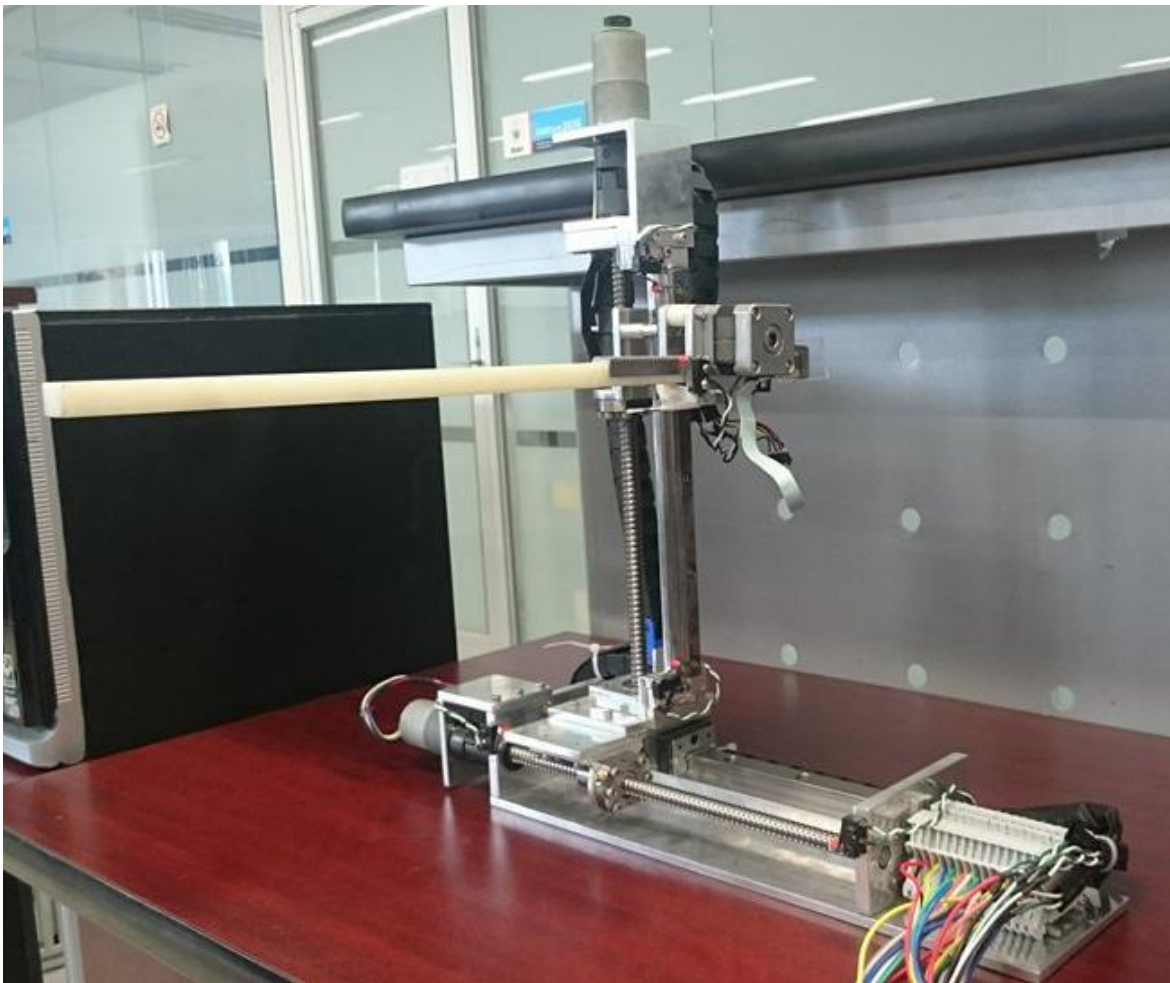


Figura 6.5: Robot de 3 grados de libertad.

6.2.2 Resultado del control de mandos

En la Figura 6.6 se observar el control de mandos del robot de 3 gdl, el cual fue realizado en LabView 2012. Este ambiente visual permite al usuario manipular de una manera amigable el sistema, con el programa de labview se envían las posiciones deseadas a cada uno de los ejes.

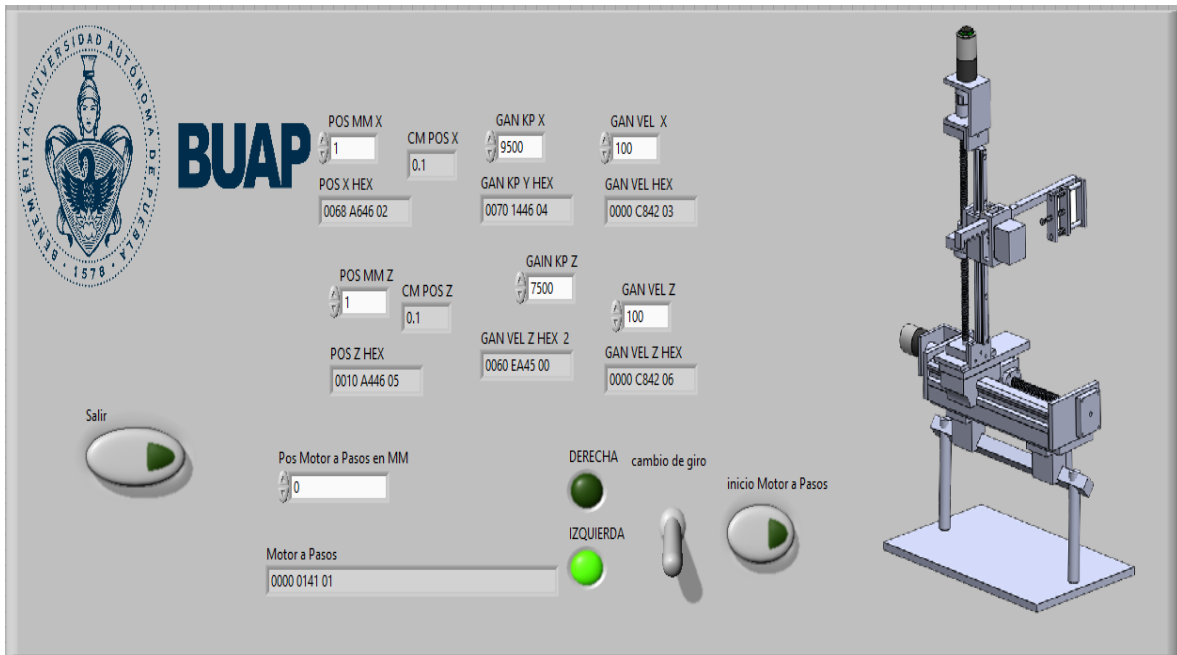


Figura 6.6: Panel de control.

6.3 Robot de 3 Gdl y etapas de control

En la Figura 6.7 podemos observar el prototipo final del robot de 3 grados de libertad, se diseñó un cubo de acrílico de 10 x10 x 15 que nos sirve como soporte para ensamblar la etapa de comunicación y etapa de potencia.

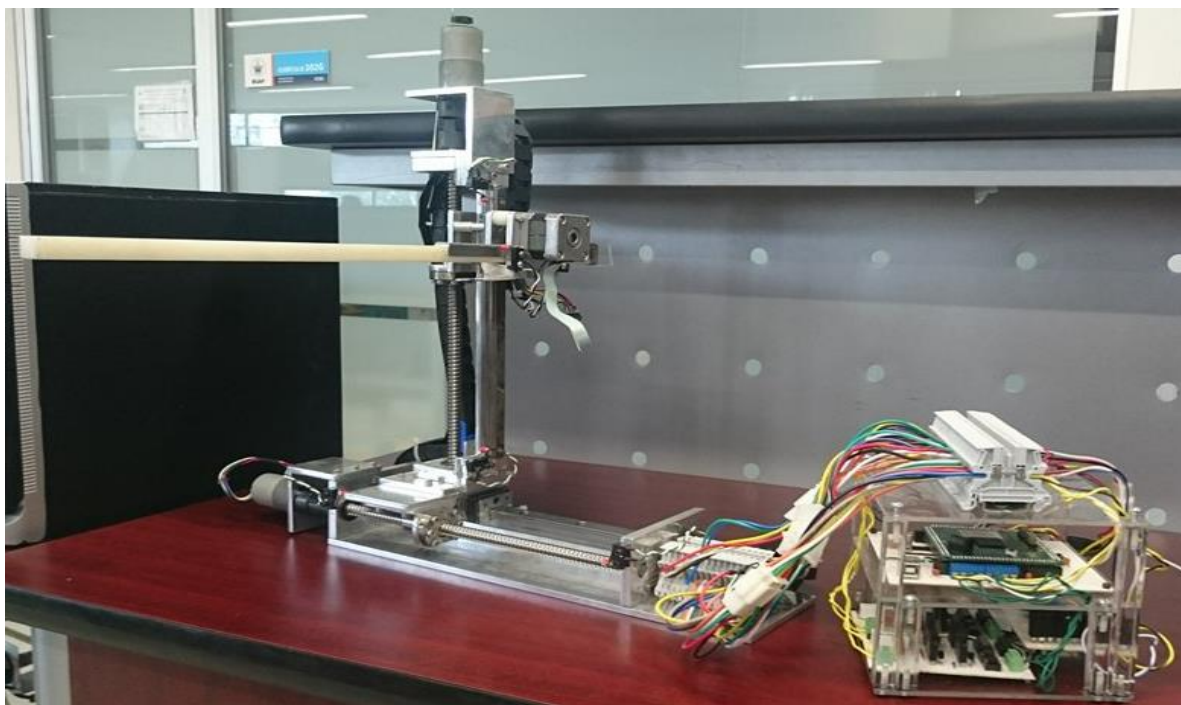


Figura 6.7: Robot y etapa de control.

En la figura 6.8 se muestra la respuesta del torque del eje X a diferentes distancias como se puede observar en la grafica cuando la distancia es muy grande el torque se mantiene y cuando va llegando a la posicion deseada el torque disminulle hasta ser igual a cero eso se debe a que cuando el eje llega a su posicion deseada el torque es nulo, tambien se observa en la grafica que cuando el torque es negativo significa que va a si un lado y cuando es positivo se dirige al lado contrario por ejemplo si se pone una posicion de 100mm en el software entonces el torque es positivo y si se pone una posicion de 1mm entonces el torque es negativo.

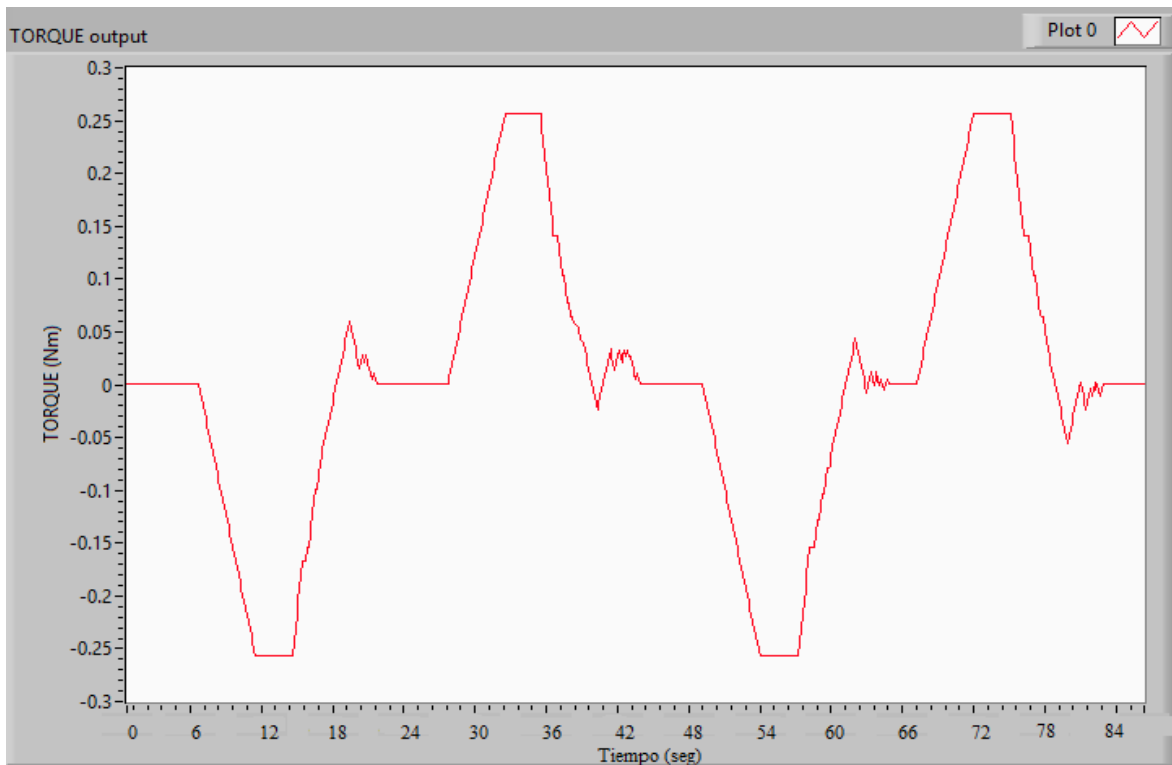


Figura 6.8: Grafica de torque del eje X.

En la figura 6.9 se puede observar la gráfica del error generado por el sistema del eje X, estos errores se generan al actualizar el punto actual deseado en el sistema una vez que el sistema ya llego a la posición deseada, en la gráfica se puede observar que cuando el sistema esta lejos de la posición deseada el error crece y cuando el sistema se aproxima a la posición deseada el error disminuye hasta hacerse cero.

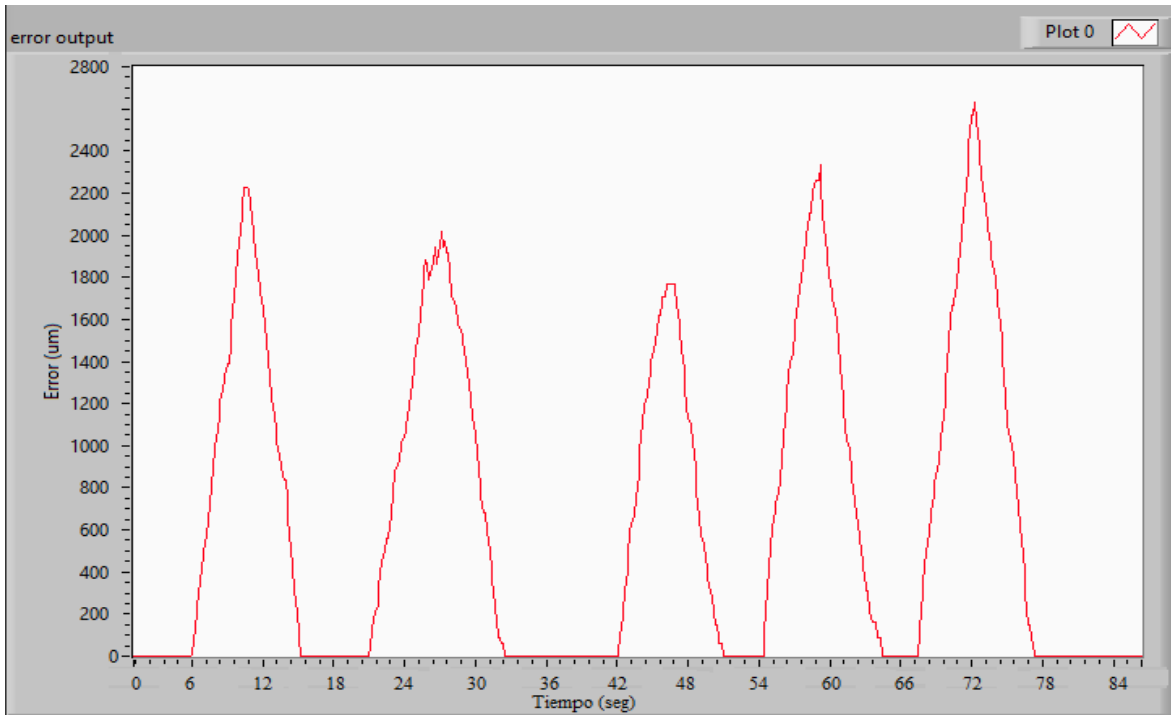


Figura 6.9: Grafica de error del eje X.

En la figura 6.10 se muestra la respuesta del torque del eje Z a diferentes distancias como se puede observar en la grafica cuando la distancia es muy grande el torque se mantiene y cuando va llegando a la posicion deseada el torque disminulle con un pequeño sobre impulso hasta ser igual a cero.

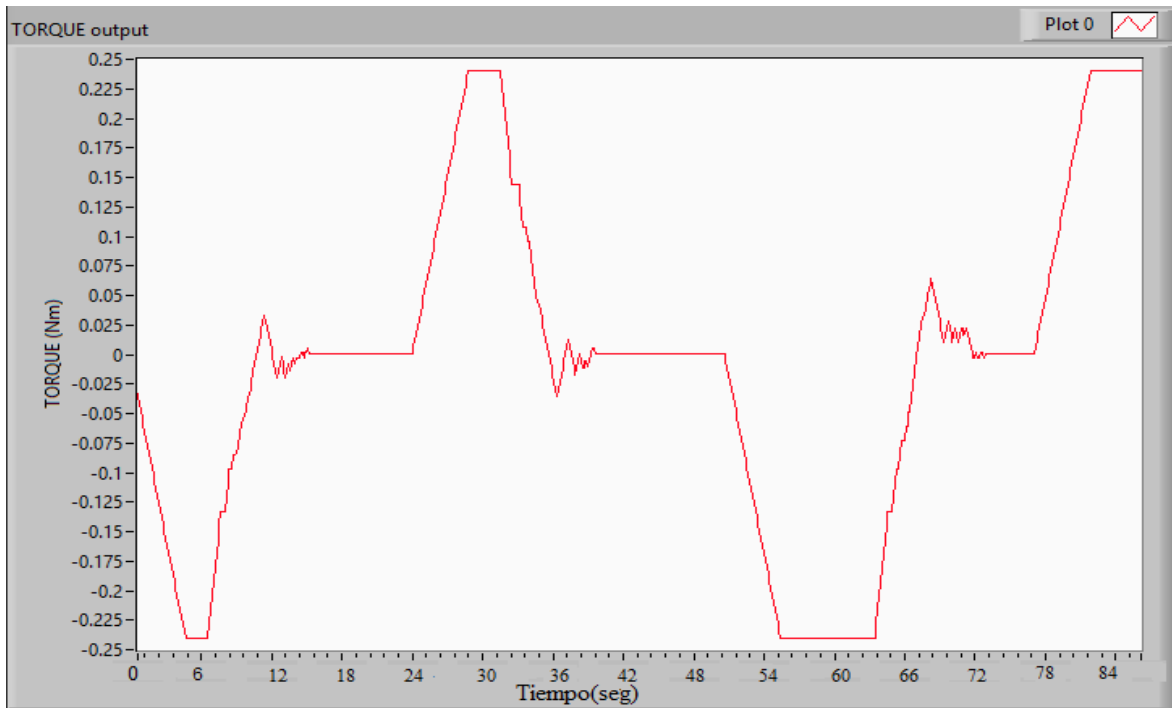


Figura 6.10: Grafica de torque del eje Z.

En la figura 6.11 se puede observar la gráfica del error generado por el sistema del eje Z, estos errores se generan al actualizar el punto actual deseado en el sistema una vez que el sistema ya llego a la posición deseada, en la gráfica se puede observar que cuando el sistema esta lejos de la posición deseada el error crece y cuando el sistema se aproxima a la posición deseada el error disminuye hasta hacerse cero.

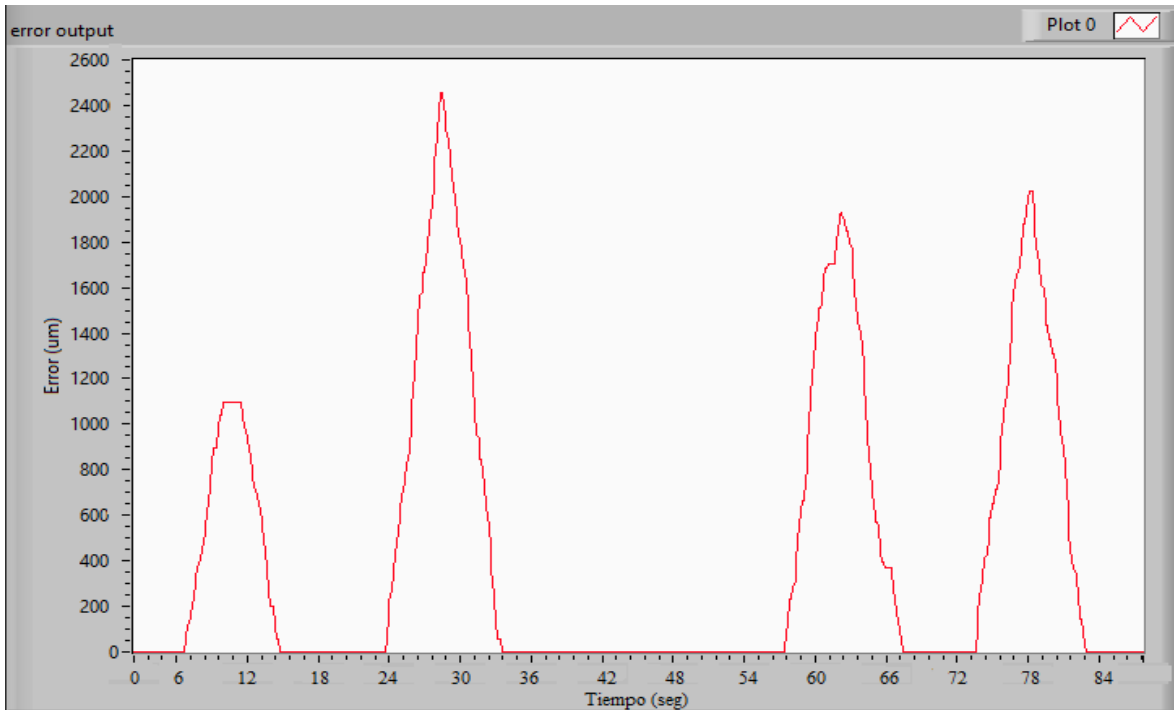


Figura 6.11: Grafica de error del eje Z.

En la figura 6.12 se muestra con ayuda de Quartus el valor de secuencias que se envían para que el motor a pasos del eje Y recorra una distancia de 10mm en este caso el valor del número de secuencias es de 32, como ya se había mencionado en capítulos anteriores el motor trabaja con pulsos de alto y bajo los cuales son enviados a cada una de las bobinas del motor.

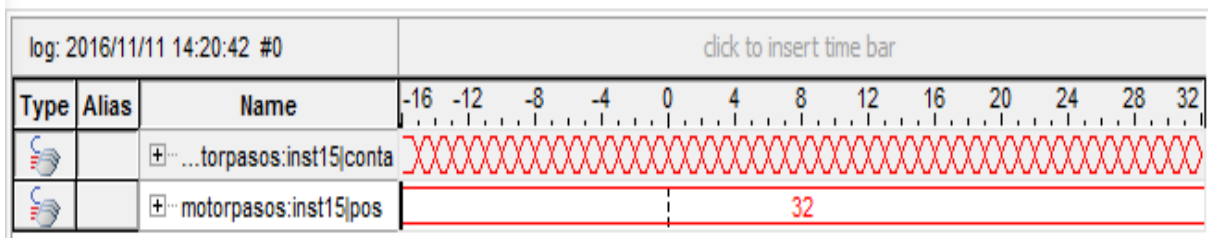


Figura 6.12: Valor de secuencias para 10 mm.

En la figura 6.13 se muestra el valor de secuencias para recorrer 56mm.

log: 2016/11/11 14:24:07 #0			click to insert time bar								
Type	Alias	Name	-16	0	16	32	48	64	80	96	
		+...torpasos:inst15 conta	00B3h								
		+...motorpasos:inst15 pos	179								

Figura 6.13 Valor de secuencias para 56 mm.

6.3.1 Implementación del robot de 3 Gdl

En la figura 6.14 podemos observar la implementación del proyecto para lo cual se ensamblan todas las etapas: mecánica, firmware, software y la etapa de comunicación USB.

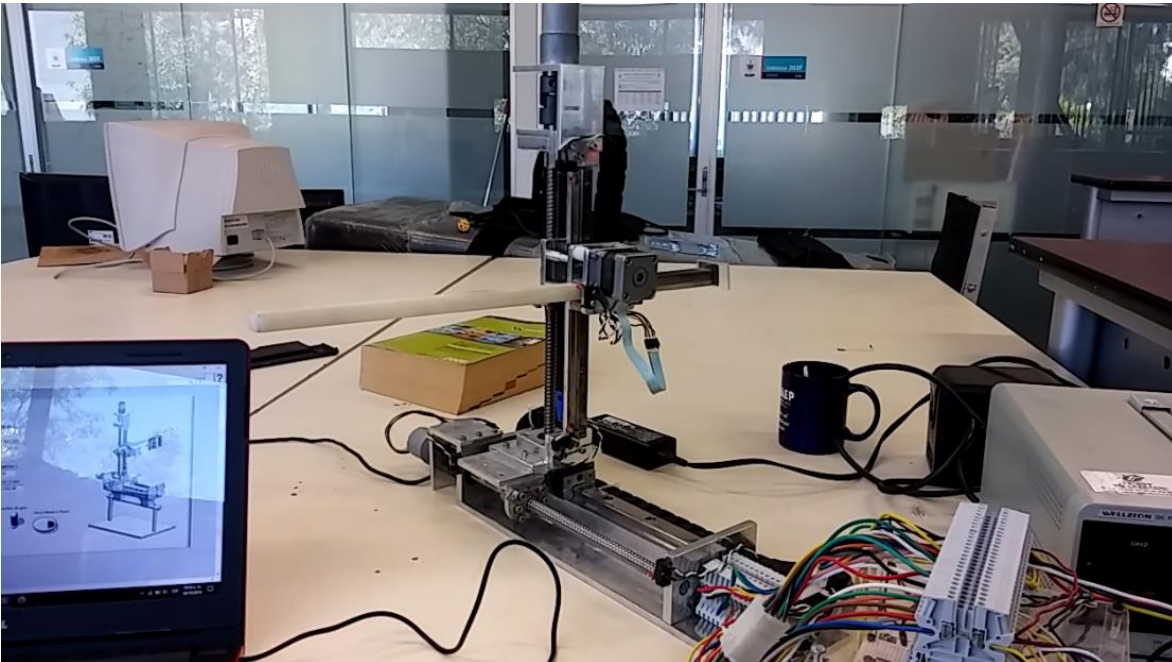


Figura 6.14: Implementación del sistema.

En la tabla 6.3 se muestra una comparación entre un sistema estereotáxico comercial y el sistema desarrollado, donde se pueden observar las ventajas que tiene nuestro robot como por ejemplo el precio, la precisión, el rango de movimiento y que el sistema se controla por medio de firmware.


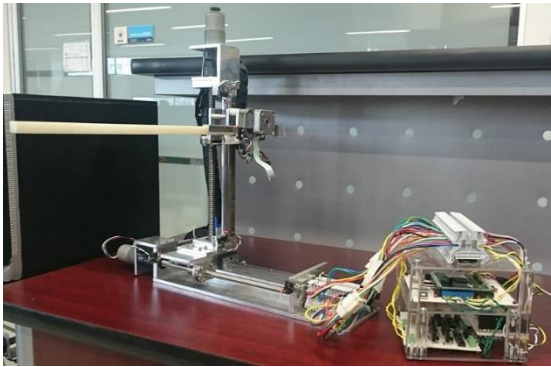
	
Precio: 122,380.00 pesos	Precio 30,000.00 pesos
Precisión 100 micras	Precisión 1 micra
Movimiento en eje X 80mm en eje Z 80 mm en eje Y 80 mm	Movimiento en eje X 150mm en eje Z 150mm en eje Y 80 mm
Peso: 5.500 kg	Peso: 6.265kg
Posicionamiento manual	Posicionamiento por medio de software

Tabla 6.3: Comparación de sistema estereotáxico y sistema desarrollado.

6.4 Conclusión

Al realizar la caracterización de los motores aseguramos que el sistema trabaje de manera lineal y tenga un buen funcionamiento. Se utilizaron bloques lineales y rieles ya que son de baja fricción y son muy estables, el sistema del robot de 3 Gdl es ligero y robusto el cual nos da una gran ventaja contra otros dispositivos, para la etapa de control se utilizó el menor espacio posible ya que se requería que el sistema fuera portable.

Conclusiones Generales

El objetivo general de esta tesis, así como los objetivos particulares se han completado satisfactoriamente, ya que se cuenta con un robot manipulador modular de 3 grados de libertad en configuración cartesiana que es controlado vía USB para evitar interferencias en las mediciones.

En comparación con sistemas comerciales en específico con los sistemas estereotáxico es que el robot manipular de tres grados de libertad es de muy bajo costo, es controlable y está diseñado por tecnología mexicana, ya que los sistemas estereotáxico se posicionan de manera manual y son muy caros.

Otra de las ventajas de este robot en comparación de los comerciales es que es de muy alta precisión es ligero y robusto, una de las innovaciones en este robot es que se aplica un control tangente hiperbólica ya que se controlan dos motores a lazo cerrado.

Otra de las ventajas es que es modular, ya que el robot no es de propósito general por lo que se puede utilizar como un robot cartográfico que permite realizar un barrido sobre circuitos integrados, permitiendo conocer la interferencia y el acoplamiento electromagnético que puede producirse entre los distintos bloques que conforman los circuitos integrados.

Las aportaciones de este proyecto es que se realizó desde el diseño, construcción y la automatizo del sistema se realizaron varios diseños en Solidworks del robot cartesiano donde se pudo construir uno más ligero y robusto con el fin de que sea portable y modular.

En la construcción del robot se utilizaron Bloques y rieles lineales de alta precisión para poder tener un buen desempeño y no tener ningún tipo de vibraciones en la estructura gracias a estos materiales utilizados se puede decir que nuestro robot es muy preciso,

Se utilizaron motores de corriente directa que se caracterizaron para poder garantizar que trabajen de manera lineal se utilizan 2 puentes H para cada uno de los Motorreductores 37dx54L y un driver en configuración Darlington para el motor a pasos este robot es controlado por medio de un FPGA y un protocolo de comunicación USB se desarrolla una interfaz en LabVIEW para poder manejar las posiciones requeridas.

Apéndice A



EL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE LA PAZ

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

A

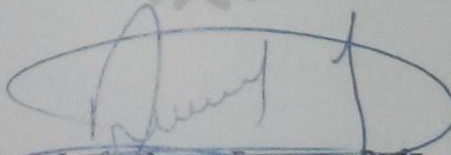
LIC. RICARDO TORRES REYES, DR. SERGIO VERGARA LIMÓN, DR. PEDRO JAVIER GARCÍA RAMÍREZ, DRA. MARÍA AURORA DIOZCORA VARGAS TREVIÑO Y DRA. AMPARO PALOMINO MERINO

POR SU ARTÍCULO: DISEÑO DE UN ROBOT CARTESIANO PARA SER EMPLEADO EN UN SISTEMA CARTOGRÁFICO DE RESOLUCIÓN CONTROLADA PRESENTADO EN EL TERCER CONGRESO INTERNACIONAL DE ROBÓTICA Y COMPUTACIÓN CELEBRADO DEL 2 AL 4 DE MAYO DEL AÑO EN CURSO.

LA PAZ, B.C.S., 4 DE MAYO DE 2016.



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE LA PAZ
DIRECCIÓN


ING. JESÚS DAVID ESTRADA RUÍZ
DIRECTOR



Diseño de un robot cartesiano para ser empleado en un sistema cartográfico de resolución controlada.

Lic. Ricardo Torres Reyes, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
Av. san Claudio y 18 Sur, Ciudad Universitaria, México,
ricardot@cecs.buap.mx

Dr. Sergio Vargas Limón, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av.
san Claudio y 18 Sur, Ciudad Universitaria, México, svargas@cecs.buap.mx

Dr. Pedro Javier García Ramírez Investigador T-C. Instituto de Ingeniería
Boca del Río, Veracruz, México, pjgarcia@iiv.mx

Dra. María Aurora Díezcos Vargass Treviño, Benemérita Universidad
Autónoma de Puebla, Av. san Claudio y 18 Sur, Ciudad Universitaria, México,
mavargas@cecs.buap.mx

Dra. Amparo palomino merino Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
Av. san Claudio y 18 Sur, Ciudad Universitaria, México,
palomino@cecs.buap.mx

Resumen: El objetivo de este trabajo es presentar el diseño y modelado de un robot de tipo cartesiano de tres grados de libertad el cual se utilizará para hacer un estudio espacial y puntual de un área de trabajo con una precisión en el orden de micrómetros (μm). Se explica el modelo dinámico del robot cartesiano de 3 grados de libertad (gdL). Otros puntos que se aborda en este escrito es una descripción sobre el desarrollo del firmware del sistema, que está dentro de un FPGA de la marca ALTERA de la familia Cyclone II, el cual se encarga de la comunicación de nuestro sistema con la pc, la construcción del robot y los materiales que se utilizaron, también se menciona la caracterización de los motores para que trabajen de forma lineal.

Abstract— The main goal of this paper is to present the design and modeling of a Cartesian robot of three degrees of freedom which will be used to make a timely study space and a work area with an accuracy in the order of micrometers (μm). The dynamic model is explained. We describe the data acquisition system including a description of the hardware and firmware development. All the system is based on a FPGA of ALTERA Cyclone II family, which is responsible for the communication of our system with the PC. Robot construction and materials used are described and the characterization of a motors to work linearly.

I. INTRODUCTION

El gran aporte que da la robótica a la medicina es de considerarse, hoy en día es posible realizar cirugías de alto riesgo con una gran seguridad y exactitud, evitando así algún error humano durante los procesos quirúrgicos, realizar cirugías en zonas las cuales el cirujano no puede acceder o visualizar, como son los casos de cirugía de los ojos, a corazón abierto, o en situaciones más complejas como retirar agua del cerebro, además de dañar mucho menos el tejido sano alrededor del área afectada y una recuperación más rápida.

En aplicaciones fisiológicas el poder contar con robots cartesianos de gran resolución permite realizar análisis a gran escala, como es en el caso del campo de los circuitos integrados (CI). Con el continuo crecimiento en tamaño, número de transistores y consumo de potencia eléctrica de los CI, estos actualmente juegan un papel preponderante en la determinación de la compatibilidad electromagnética de los sistemas electrónicos en los que son utilizados. En general, las estructuras de los CI's así como sus empaquetados tienen poca influencia eléctricamente hablando, y no radian por sí mismos energía de manera eficiente. Por otro lado, las fuentes de Radio Frecuencia (RF) generadas por los CI's, suelen tener que interactuar con una estructura más grande conectada a la placa de un circuito impreso (PCB) para irradiar de manera significativa. Sin embargo, el ruido acoplado derivado de los CI's en estructuras resonantes cerca de un PCB es un problema común en los sistemas digitales de alta velocidad.

II. DISEÑO DEL ROBOT

Para realizar el diseño del robot cartesiano se utilizó el programa de solidworks ya que es una solución de diseño tridimensional completa que integra un gran número de funciones avanzadas para facilitar el modelado piezas, crear grandes ensamblajes, generar planos y otras funcionalidades que le permiten validar, gestionar y comunicar proyectos de forma rápida, precisa y fiable.

Y para el diseño mecánico se utilizaron Guita de movimiento lineal Tipo HSR como se muestra en la "Figura

Apéndice B

```
#include <18F4550.h>

#fuses
HSPLL,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP,NODEBUG,USBDIV,PLL1,CPUDIV1,VREGEN,MCLR,NOPBADEN

#use delay(clock=48000000)

#define USB_HID_DEVICE FALSE

#define USB_EP1_TX_ENABLE USB_ENABLE_BULK
#define USB_EP1_RX_ENABLE USB_ENABLE_BULK

#define USB_EP1_TX_SIZE 8
#define USB_EP1_RX_SIZE 8

#include <pic18_usb.h>
#include <PicUSB.h>
//#include <usb_desc_scope.h>
#include <usb.c>

int numero;

void main(void) {
int8 recibe[8];
int8 envia[8];

    set_tris_d(0x00);
    output_d(0x00);
    set_tris_a(0x00);
    output_a(0x00);
    set_tris_b(0xFF);
    set_tris_e(0x00);
    output_e(0x00);

    usb_init();           //inicializamos el USB
    usb_task();           //habilita periferico usb e interrupciones
    usb_wait_for_enumeration(); //esperamos hasta que el PicUSB sea configurado por el host
```

```

while (TRUE)
{
    if(usb_enumerated())    //si el PicUSB está configurado
    {
        if (usb_kbhit(1))    //si el endpoint de salida contiene datos del host
        {
            usb_get_packet(1, recibe, 8); //recoje el paquete de tamaño 3bytes del EP1 y almacenamos
//en r
            {
                output_d(recibe[0]& 0x0F);
                output_a(1);
                output_high(Pin_A5);
                output_low(Pin_A5);
                output_d(recibe[0]>> 4 & 0x0F);
                output_a(2);
                output_high(Pin_A5);
                output_low(Pin_A5);
                output_d(recibe[1]& 0x0F);
                output_a(3);
                output_high(Pin_A5);
                output_low(Pin_A5);
                output_d(recibe[1]>> 4 & 0x0F);
                output_a(4);
                output_high(Pin_A5);
                output_low(Pin_A5);
                output_d(recibe[2]& 0x0F);
                output_a(5);
                output_high(Pin_A5);
                output_low(Pin_A5);
            }
        }
    }
}

```

```

output_d(recibe[2]>> 4 & 0x0F);
output_a(6);
output_high(Pin_A5);
output_low(Pin_A5);
output_d(recibe[3]& 0x0F);
output_a(7);
output_high(Pin_A5);
output_low(Pin_A5);
output_d(recibe[3]>> 4 & 0x0F);
output_a(8);
output_high(Pin_A5);
output_low(Pin_A5);
output_e(recibe[4]);
output_high(Pin_A5);
output_low(Pin_A5);
numero=input_b() >>4 & 0x0F;
if (numero==1)
{
envia[0]=input_b();
output_low(Pin_A4);
output_high(Pin_A4);
}
else if (numero==2)
{
envia[1]=input_b();
output_low(Pin_A4);
output_high(Pin_A4);
}
else if (numero==3)
{

```

```
envia[2]=input_b();
output_low(Pin_A4);
output_high(Pin_A4);
}
else if (numero==4)
{
envia[3]=input_b();
output_low(Pin_A4);
output_high(Pin_A4);
}
else if (numero==5)
{
envia[4]=input_b();
output_low(Pin_A4);
output_high(Pin_A4);
}
else if (numero==6)
{
envia[5]=input_b();
output_low(Pin_A4);
output_high(Pin_A4);
}
else if (numero==7)
{
envia[6]=input_b();
output_low(Pin_A4);
output_high(Pin_A4);
}
else if (numero==8)
{
```

```
envia[7]=input_b();
output_low(Pin_A4);
output_high(Pin_A4);
}
else
{
output_low(Pin_A4);
output_high(Pin_A4);
}
        usb_put_packet(1, envia, 8, USB_DTS_TOGGLE); //enviamos el paquete de tamaño
1byte del EP1 al PC
    }
}
}
}
}
}
}
```

Referencias

- [1] Vergara S., Vargas M.A., Paic G., Tejeda G., Fernandez A., León I., Reyes F., and Villasenor L. **“Characterization of the ACORDE scintillator counters using a PCI electronic card”**, volume 53 (2) 120-125. Revista Mexicana de Física, México, Abril 2007.
- [2] Dorian Rojas Balbuena, **“Diseño, construcción e instrumentación de un robot cartesiano pick and place de 4 GDL”**, Tesis de maestría FCE, BUAP, Puebla, Puebla, junio del 2011.
- [3] Fernando Reyes Cortes, **“Robótica control de robots manipuladores”**, Ed. alfa omega, 1er edición.
- [4] Josep Balcells, José Luis Romeral, **“Autómatas Programables”**, Ed. Marcombo, 1997.
- [5] Shanley T. and Don A. **“PCI System Architecture”**. Addison-Wesley Developer’s Press, fourth edition, 1999
- [6] Javier Vargas Valencia, Iliana Ramírez Velázquez, Santiago Pérez Walton, **“física mecánica conceptos básicos y problemas”**, Ed. ITM, 1a edición diciembre del 2008
- [7] Antonio Barrientos, Luis F. Peñin, Carlos Balaguer, Rafael Aracil. **“Fundamentos de robótica”**, Ed. Mc Graw Hill, 1997
- [8] Aníbal Ollero Baturone. **“Robótica Manipuladores y robots móviles”**, Ed Alfaomega, julio de 2008
- [9] Subir Kumar Saha. **“Introducción a la Robótica”**, Ed. Mc Graw Hill, 2008
- [10] Tipo de robot dosificador cartesiano, disponible en:
<http://www.dotestsl.com/robot-dosificador-cartesiano-2300.html> 2015.
- [11] Robot cartesiano de 3 g.d.l. Lexium, disponible en:
http://www.alumotion.eu/portfolio_item/urcaps-uring/ 2015.
- [12] Robots de control numérico TecnoMATIC, disponible en:
http://www.directindustry.es/prod/tecnomatic-robots-30488.html#product-item_1029775 2015.
- [13] Guía aplicada del robot cartesiano, Schneider electric, 11 de diciembre del 2008, versión 1.3
- [14] **“Control de Movimiento de Robots Manipuladores”**, Rafael Kelly, Ed. PEARSON Prentice Hall.
- [15] Gibram Humberto Bezares Colmenares **“Robot cnc Multiherramienta”** Tesis de maestría FCE, BUAP Puebla, Puebla. Enero 2015.
- [16] Maria Montserrat Oropeza Saucedo **“Automatización de una mesa de inclinación para fisioterapia utilizando un sistema embebido”** Tesis de maestría FCE, BUAP Puebla, Puebla. Octubre 2015.