



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

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

**“DESARROLLO E INSTRUMENTACION DE UN
ESCANER 3D”**

T E S I S

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

Presenta:

Lic. Juan Francisco Pintor Michimani

Directores:

Dr. Sergio Vergara Limon (FCE-BUAP)

Dra. Amparo Dora Palomino Merino (FCE-BUAP)

Director externo:

Dr. Jesús López Gómez (DAIA-UJAT)

Julio 2024

*Becario CONAHCYT

BUAP

Agradecimientos

Primero gracias dios por la vida que me ha regalado, por las oportunidades que me ofrece cada día para seguir superándome y por darme la fortaleza necesaria para permitirme culminar una meta más en mi área profesional.

Segundo a mis padres Juan y Magali, por el apoyo incondicional que siempre me brindan en cada paso que doy, por guiarme hacia el camino correcto a través de sus valores y sabios consejos que me han permitido ser una persona de bien y sobre todo por ser el pilar fundamental en cada aspecto de mi vida. A mis hermanos David, Israel y Giselle por motivarme todos los días. Quiero agradecer a mi novia, Isabel, por su amor, apoyo y comprensión a lo largo de este proceso. Su paciencia infinita y sus palabras de ánimo me han dado la fuerza necesaria para seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

A mis asesores de tesis, Dr. Sergio Vergara Limón, Dra. Ampara Dora Palomino Merino y Al Dr. Jesús López Gómez, por guiarme en este camino para lograr concluir este trabajo, por todos los conocimientos y el apoyo brindado.

A mis amigos de maestría Valentín, Fernanda, Luis, Angel, Steven, Michelle y Alfredo, por compartir su conocimiento, alegría y tristeza en el trayecto y tiempo que llevó la culminación de esta etapa.

A todos los maestros que impartieron su conocimiento en las clases de la maestría y que me impulsaron para seguir desarrollando el conocimiento, porque me enseñaron a no conformarme y a seguir desarrollando la curiosidad para preguntar y buscar los medios de desarrollar nuevo conocimiento.

A los que formaron parte de mi jurado revisor, Dr. José Eligio Moisés Gutiérrez Arias, Dra. María Aurora Diozcora Vargas Treviño y Dr. Alexandre Zmliak, por las observaciones y comentarios que contribuyeron en el desarrollo y culminación de este proyecto.

Al coordinador el Dr. José Eligio por apoyar los tramites y motivarnos a seguir adelante.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por hacer lo necesario para contar con posgrados de calidad y en especial a la Facultad de Ciencias de la Electrónica por darme la oportunidad de ser parte de este posgrado y que a través de su infraestructura y sus excelentes docentes me permitieron concluir mis estudios.

Y por ultimo al CONAHCYT por el apoyo brindado para continuar con mis estudios.

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía y mi fortaleza en cada paso de este camino. A mi familia, por ser mi pilar y mi mayor fuente de inspiración, a mis amigos por su compañía y palabras de aliento.

Resumen

Partiendo de un robot cartesiano de 3 grados de libertad tipo CNC desarrollado en la Maestría en Ciencias de la Electrónica Opción en Automatización de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, se presenta el desarrollo de Hardware, Firmware y software necesarios para llevar a cabo el control de dicho robot mediante una tarjeta FPGA con microprocesador embebido, de modo tal, que pueda funcionar como escáner 3D y de acuerdo con sus componentes y estructura mecánica sea comparado con robots industriales. Además, para tener comunicación con el robot se utiliza una interfaz de usuario desarrollada en Labview, la cual se comunica mediante protocolo Wi-Fi, esta permite la descarga del código de control al microprocesador, así como la lectura y escritura de datos.

Se realizó el estado del arte del tipo de máquinas que realizan ésta tarea las cuales son conocidas como Máquina de Medición por Coordenadas (MMC), este tipo de robots se caracterizan por ser muy precisión y realizar movimientos del orden de micras, el cual con una herramienta que lleva el nombre del palpador se encarga de realizar el escaneado de piezas.

Se presenta la descripción del robot el cual contempla todos los elementos mecánicos con el que fue fabricado, distancias de desplazamiento, resolución de los encoders, caracterización de los motores para que funcione casi como transmisión directa, así como el software e Labview que se utiliza.

Por otra parte se presenta el modelo dinámico el cual se obtuvo mediante la metodología de parámetros agrupados, agregando lo que es el fenómeno de fricción, también se describe todo el Hardware que se tuvo que re-conectar para que el robot funcionara de manera correcta, la fabricación de la herramienta palpador para que funcione como escáner.

De igual manera se presenta el Firmware que hace funcionar al robot y cada unos de sus elementos, se llevo a cabo una metodología para que el robot pueda moverse distancias del orden de micras, el controlador implementado y el software desabollado para hacer que el robot cartesiano funcione como escáner.

Se muestran los resultados obtenidos en el desarrollo de la tesis.

Índice general

Resumen	4
Introducción	11
Objetivos	20
1. Descripción del robot	21
1.1. Características mecánicas	22
1.2. Resolución del robot CNC	26
1.3. Sistema de Control	30
1.4. Software de usuario	31
1.5. Electrónica del Robot	34
1.6. Conclusiones	35
2. Modelo Dinámico con Fricción	36
2.1. Fricción	36
2.1.1. Tipos de Fricción	36
2.1.2. Modelo de fricción	38
2.2. Obtención del Modelo Dinámico	41
2.2.1. Ecuación de Euler-Lagrange	41
2.2.2. Método de parámetros Agrupados	41
2.2.3. Análisis 3 ejes	43
2.2.4. Representación en espacio de estados	49
3. Hardware	54
3.1. Componente sistema Palpador	54
3.1.1. Elección de palpador	58
3.1.2. Prototipo palpador	59
3.1.3. Diseño del palpador	60
3.1.4. Construcción del sistema Palpador	62
3.1.5. Punta Palpador	65
3.1.6. Montaje en eje Z	67
3.1.7. Electrónica Palpador	68
3.2. Robot Cartesiano (Estado inicial)	72
3.2.1. Alimentación del sistema	75
3.2.2. Fines de Carrera	76
3.2.3. Encoders	78
3.2.4. ADC	79
3.2.5. Puente H motores	82

3.2.6.	Puente H Alimentador de Material	84
3.2.7.	Etapa de potencia extrusor y cama caliente	85
3.2.8.	Cableado externo	85
3.2.9.	Tarjeta FPGA y módulo wifi	86
3.3.	Actualización de la electrónica	88
3.3.1.	Tarjeta para acoplar puertos y wifi al FPGA	88
3.3.2.	Cambio de Fines de Carrera	90
3.3.3.	Tarjeta Fines de carrera	92
3.3.4.	Aislamiento de señales	94
3.3.5.	Armado de electrónica	95
3.3.6.	Elementos mecánicos	99
3.4.	Conclusiones	100
4.	Metodología para mejorar el rendimiento del robot	101
4.0.1.	Método MT usada para eliminar error de cuantificación de velocidad	102
4.0.2.	Control de lazo cerrado del sistema CNC	103
4.0.3.	Efecto del muestreo	106
4.0.4.	Filtro Pasa-bajas	108
4.1.	Distribución Normal o Gaussiana	110
4.2.	Rutina de escaneo	112
5.	Resultados experimentales	113
5.1.	Eje X	113
5.2.	Eje Y	118
5.3.	Eje Z	123
5.4.	Resultados de la distribución del desplazamiento Δx cada $100\mu m$. .	128
5.5.	Resultados de la distribución del desplazamiento Δy cada $100\mu m$. .	129
5.6.	Escaneado	130
5.7.	Conclusiones	131
	Bibliografía	132
	Anexos	134

Índice de figuras

1.	CNC:Cincinnati Milacron Hydrotell	12
2.	Máquina de Medición de coordenadas con cabeza de escaneo Tipo puente	15
3.	CMM tipo Pórtico	15
4.	CMM tipo Pórtico	16
5.	Robot cartesiano para escaneado Vulkan	16
6.	Máquina de medición por coordenadas Aberlink Horizon	17
7.	Máquina Aberlink Horizon	17
8.	Modelo CAD de la MMC	18
9.	Montaje MMC con sistema de visualización	18
10.	Retablo Maya De Pakal El Grande, En Madera De Fina De Cedro . .	19
1.1.	Robot CNC 3 grados de libertad	21
1.2.	Riel de precisión y carro	23
1.3.	Corte Transversal Tornillo embalado	23
1.4.	Switch Fin de carrera	24
1.5.	Motor Z5D120-12 con reductor 5GU9K.	24
1.6.	Motor Z4D40-12GN-30S con reductor 4GN15K.	24
1.7.	Tarjeta de implementación DE0-CV.	25
1.8.	Curva Motor X.	29
1.9.	Curva Motor Y.	29
1.10.	Curva Motor Z.	29
1.11.	Diagrama general del robot Cartesiano.	31
1.12.	Diagrama general del robot CNC de 3 grados de libertad aplicado a impresión 3D.	32
1.13.	Interfaz gráfica para el compilador de posiciones deseadas.	32
1.14.	Segunda ventana del software de usuario: descarga de posiciones deseadas en la RAM.	33
1.15.	Pestaña de ejecución del programa: sub-pestaña de inicialización. . .	33
1.16.	Sub-pestaña de envío de comandos.	34
1.17.	Sub-pestaña Lectura de datos.	34
1.18.	Electrónica del Robot, FPGA.	35
1.19.	Electrónica de Potencia del ROBOT.	35
2.1.	Modelo Fricción de Coulomb.	36
2.2.	Fricción Estática.	37
2.3.	Fricción Dinámica.	38

2.4. Fricción Viscosa + coulomb.	38
2.5. Fricción acoplada	39
2.6. Fricción Stribeck	40
2.7. Gráfica del Torque de Fricción	40
2.8. Estructura mecánica.	41
2.9. Estructura mecánica.	42
2.10. Estructura, 3 grados de libertad.	44
2.11. Parámetros dinámicos.	53
3.1. Partes de un palpador.	55
3.2. Movimiento del Robot Cartesiano.	56
3.3. Dimensiones de un cuadro tallado en madera.	56
3.4. Palpador Recto.	57
3.5. Palpador de punta.	57
3.6. Palpador Cilíndrico.	58
3.7. Palpador Comercial de Precisión.	58
3.8. Vista preliminar Palpador.	58
3.9. Movimiento de la punta en el palpador.	59
3.10. Dibujo del palpador.	59
3.11. Rodamiento Lineal.	60
3.12. Pieza base herramienta palpador.	61
3.13. Seguro Omega.	61
3.14. Flecha para palpador.	62
3.15. Palpador Completo.	62
3.16. Piezas fabricadas palpador.	64
3.17. partes de una aguja.	66
3.18. Tipos de punta redonda.	66
3.19. Medición punta palpador.	67
3.20. Pieza para montaje en eje Z.	67
3.21. Palpador montado en eje Z.	68
3.22. Punta en palpador.	68
3.23. Circuito NE555.	69
3.24. Salida astable, biestable y monoestable.	69
3.25. Circuito monoestable formado por un 555.	70
3.26. Circuito antirrebote.	70
3.27. Compuerta NAND 4011BE.	71
3.28. Compuerta NAND 4011BE.	72
3.29. Circuito de acoplamiento al palpador.	72
3.30. Pulso generado por el circuito.	72
3.31. Cableado del robot.	73
3.32. Componentes y FPGA del robot.	74
3.33. Cables de conexión al FPGA.	74
3.34. Fuente Conmutada para alimentar Puente H del eje X.	76
3.35. Fuente conmutada eje Y y Fuente de alimentación para las tarjetas.	76
3.36. Fines de Carrera eje X.	77
3.37. Fines de Carrera eje Y y eje Z.	77

3.38. Conexión de fines de carrera.	78
3.39. Etiquetas de los puertos de la tarjeta.	79
3.40. Etiquetas de Conexión ADC B Extrusor.	80
3.41. Conexión de los reguladores.	81
3.42. Conexión de los reguladores.	81
3.43. Conexión de los convertidores Analógico Digital de la cama caliente.	82
3.44. Diagrama Puente H.	83
3.45. Puentes H.	83
3.46. Conexión del Puente H.	84
3.47. a)Puente H para alimentador de material. b) Esquema de conexión para Puente H.	84
3.48. Etapa de potencia extrusor y cama caliente.	85
3.49. Cadena Porta cables.	86
3.50. FPGA con módulo Wifi.	86
3.51. Tarjetas de expansión para entradas/salidas correspondientes.	88
3.52. Cables para tarjeta Wifi.	89
3.53. Aislamiento de módulo wifi.	89
3.54. Aislamiento de módulo wifi.	90
3.55. Sensores inductivos.	90
3.56. Fines de carrera inductivos.	91
3.57. Diseño de Los soportes.	91
3.58. Montaje de Soportes.	92
3.59. Sensores montados eje X.	92
3.60. Sensores montados eje Y y Z	93
3.61. Conexión de fines de carrera.	93
3.62. Diseño de la tarjeta.	94
3.63. Separación de cables de alto y bajo consumo de corriente.	94
3.64. Medidas del espacio para interconectar tarjetas.	95
3.65. Esquema para acomodar circuitos.	95
3.66. Esquema para acomodar circuitos.	96
3.67. Comunicación PC con FPGA.	96
3.68. PINES FPGA.	97
3.69. Proceso de Conexión.	98
3.70. Interconexión de etapa de potencia.	98
3.71. Conexión de señales dentro del robot.	99
3.72. Alineación y mantenimiento Tuerca.	99
3.73. Cople.	100
3.74. Estrella de Neopreno.	100
4.1. Metodología para el robot.	101
4.2. Muestreo de Posición	102
4.3. Método MT calculo de la velocidad	103
4.4. Lazo de Control con retroalimentación en Posición.	104
4.5. Lazo de Control con retroalimentación en Posición y Velocidad.	104
4.6. Muestreo de una señal en el tiempo	107
4.7. Espectros de las señales en el proceso de muestreo	108

4.8. Diferentes Frecuencias de muestreo	108
4.9. Filtro Pasa-bajas	109
4.10. Filtro Pasa-bajas tipo Bessel	109
4.11. Curva de Distribución Normal.	111
4.12. Diagrama a bloques para escanear.	112
5.1. Gráfica Torque contra velocidad Eje X sin compensación Fricción. . .	113
5.2. Gráfica Torque contra velocidad Eje X, con compensación Fricción. .	114
5.3. Torque eje X sin compensación y con compensación de Fricción. . .	114
5.4. a) Posición del robot sin compensación fricción. b) Posición del robot con compensación fricción.	115
5.5. Posición Robot.	115
5.6. a) Velocidad sin compensar. b) Velocidad con compensación.	115
5.7. Velocidad Robot.	116
5.8. a) Aceleración sin compensar. b) Aceleración con compensación. . . .	116
5.9. Aceleración sin compensación y con compensación de Fricción	116
5.10. a) Jerk con compensación. b) Jerk sin compensar.	117
5.11. Error de posición eje X.	117
5.12. Gráfica Torque contra velocidad eje Y, sin compensación Fricción. . .	118
5.13. Gráfica Torque contra velocidad eje Y, con compensación Fricción. . .	118
5.14. Torque eje Y sin compensación y con compensación de Fricción. . . .	119
5.15. a) Posición del robot sin compensación fricción. b) Posición del robot con compensación fricción.	119
5.16. Posición Robot.	120
5.17. a) Velocidad sin compensar. b) Velocidad con compensación.	120
5.18. Velocidad Robot.	120
5.19. a) Aceleración sin compensar. b) Aceleración con compensación. . . .	121
5.20. Aceleración sin compensación y con compensación de Fricción	121
5.21. a) Jerk con compensación. b) Jerk sin compensar.	121
5.22. Error de posición eje Y.	122
5.23. Gráfica Torque contra velocidad eje Z, sin compensación Fricción. . .	123
5.24. Gráfica Torque contra velocidad eje Z, con compensación Fricción. . .	123
5.25. Torque eje Z sin compensación y con compensación de Fricción. . . .	124
5.26. a) Posición del robot sin compensación fricción. b) Posición del robot con compensación fricción.	124
5.27. Posición Robot.	125
5.28. a) Velocidad sin compensar. b) Velocidad con compensación.	125
5.29. Velocidad Robot.	125
5.30. a) Aceleración sin compensar. b) Aceleración con compensación. . . .	126
5.31. Aceleración sin compensación y con compensación de Fricción	126
5.32. a) Jerk con compensación. b) Jerk sin compensar.	126
5.33. Error eje Z.	127
5.34. Resultados al movimiento cada 100um, eje X.	128
5.35. Resultados al movimiento cada 100um, eje X.	129
5.36. Resultados al movimiento cada 100um, eje Y.	129
5.37. Escaneo Área Caparazón.	130

Introducción

Antecedentes

Durante mucho tiempo el ser humano ha tratado de crear máquinas que realicen tareas semejantes a la de un humano, a lo largo de la historia de la humanidad el hombre ha generado en cierta época cambios trascendentes, uno de estos fue la Revolución Industrial, esta transformación tuvo un enorme impacto en las relaciones laborales, así como en la organización social y económica de los Estados europeos al comienzo y del resto del mundo, en pocos años. La Revolución Industrial se desarrolló en dos etapas, la primera tuvo su comienzo en Inglaterra entre los siglos XVII y XVIII, en esta etapa los procesos que desarrollaban de forma manual en pequeños talleres o pequeñas unidades productivas a ser fabricados con máquinas en grandes fábricas; la segunda etapa fue a mediados del siglo XIX, esta tuvo mayor impacto en el transporte y las telecomunicaciones.

Los relojes pueden considerarse como las máquinas antiguas más perfectas, muy cercanas al concepto de automatismo y, consecutivamente, a la de robótica. Es frecuente hallar relojes que incluyen figuras humanas móviles que se mueven con el orden de las horas; sin embargo, la aparición de los primeros robots industriales se puede decir que se remontan en la industria textil del siglo XVIII, cuando Joseph Jacquard inventa en 1801 una máquina textil con la que utilizaba tarjetas perforadas para programar las acciones de la máquina. Con esto se da inicio a la automatización industrial mediante la implementación de dispositivos automáticos en la producción. La revolución industrial impulsó el desarrollo de estos agentes mecánicos, entre los cuales se destacaron el torno mecánico motorizado de Babbitt (1892) y el mecanismo programable para pintar con spray de Pollard y Roselund (1939). [1]

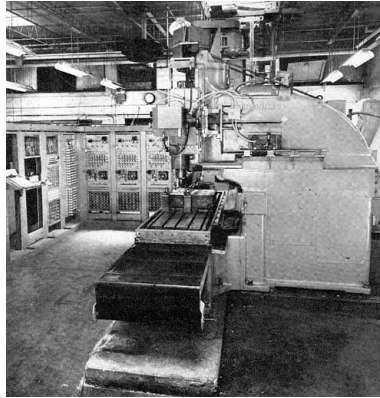


Figura 1: CNC:Cincinnati Milacron Hydrotell

Si bien ha habido un cambio tremendo en la historia de la tecnología CNC, hay algunas piedras angulares que no han cambiado. Todas las máquinas automáticas de fabricación de control de movimiento, desde los conceptos básicos de los primeros días hasta los sistemas altamente avanzados en la actualidad, todavía tienen 3 componentes principales. Estos incluyen una función de comando, un sistema de movimiento y un sistema de retroalimentación.

Un robot cartesiano consta principalmente de una serie múltiple de ejes que se desplazan cada uno de ellos de forma lineal, y entre los diferentes ejes conforman ángulos rectos unos respecto de otros. En los robots más habituales de 2 ejes se parte de un eje principal como base, normalmente un eje horizontal, sobre el cual se ensambla perpendicularmente otro eje, de forma también horizontal con lo que tenemos un robot cartesiano X-Y, o de forma vertical, con lo que obtenemos un robot cartesiano Y-Z. Los robots cartesianos de 3 grados de libertad más extendidos parten de un eje horizontal sobre el que se ensambla un segundo eje perpendicular también horizontal y sobre el cual a su vez se monta el tercer eje perpendicular, en esta ocasión verticalmente, conformando un robot de ejes cartesianos X-Y-Z.

Las aplicaciones de robots cartesianos en la industria son multitud, desde las configuraciones más sencillas de las unidades de pick & place de 2 ejes Y-Z, donde se manipulan piezas que se recogen de un punto y se dejan en otro tras un movimiento de subir-desplazar-bajar, hasta los procesos de mecanizado de las fresadoras más potentes controladas por complejos CNC. Cualquier proceso que incluya desplazamiento de piezas y herramientas en coordenadas cartesianas y a priori no necesite de cambio de ángulos de orientación es susceptible de ser resuelto con un robot de tipo cartesiano.

El proceso de manufactura ha tenido gran auge en el crecimiento económico de muchos países, con el paso del tiempo se quiere que este tipo de procesos sean de una mayor calidad a un menor costo. Los primeros controles numéricos se comenzaron a desarrollar por Hardware (NC), hasta llegar al control numérico por computadora. En la actualidad se han realizado trabajos con sistemas embebidos (FPGA) para implementar controles numéricos, uno de estos es el artículo [2], los costos actualmente de un CNC industrial son muy altos, alcanzando miles de dólares. Los altos precios de este tipo de maquinaria han abierto grupos de investigación para poder realizar este tipo de máquinas a un menor precio, varias universidades implementan

sus propias máquinas CNC tratando de "imitar" lo que hacen en las industrias.

Un FPGA (Field Programmable Gate Array) es un dispositivo de silicio semiconductor con la capacidad de programar una operación deseada su mapeo interno es similar a una matriz, construida con elementos electrónicos conectados entre sí. Surgen con la idea de un PLD (Programmable Logic Device). En 1984 Ross Freeman y Bernard Vonderschmitt, crearon el primer Prototipo de un FPGA para la empresa de Xilinx de la cual son cofundadores. La ventaja que presenta un FPGA es que puede ser programado al menos 100,000 veces. A nivel de capacidad un FPGA puede ser comparado con un ASIC (Application Specific Integrates Circuit) que tal como su nombre lo dice son circuitos integrados creados para una aplicación específica. Si bien los FPGA actuales son de bajo consumo y su tiempo de respuesta ronda los nanosegundos algunas compañías llevaron este a otro nivel, llevándolo a comportarse como un controlador. En cuanto a los códigos de programación estos pueden ser creados con HDL (Hardware Description Language). [3]

Todos los FPGA, independientemente del fabricante, tienen ciertos elementos en común, tienen un arreglo tipo matricial de elementos lógicos, como flips-flops y lógica combinatorial, que se configuran usando cierta tecnología de programación. Los terminales de entrada y salida del FPGA usan celdas especiales de E/S que son diferentes de las celdas de elementos lógicos. Además tienen un esquema de interconexión programable que permite la conexión entre las celdas de elementos lógicos entre sí, y con las celdas de E/S. El uso de un FPGA trae consigo muchas ventajas, las cuales son su gran flexibilidad, la re-usabilidad y su mayor rapidez de adquisición [4]. Las principales ventajas que ofrecen las FPGA son:

- Rendimiento: Generalmente, una CPU no puede ejecutar procesos en paralelo, esto da a las FPGA una ventaja, ya que pueden realizar el procesamiento y cálculo en paralelo a una velocidad más rápida. Un programa diseñado cuidadosamente en una FPGA normalmente, puede ejecutar cualquier función más rápido que una CPU que ejecuta código de forma secuencial.
- En cuanto a los sistemas embebidos un FPGA es caro, pero como son re-programables a largo plazo son rentables.
- Prototipado: Como se menciona anteriormente las FPGA son re-programables y re-utilizables. Esto las convierte en la perfecta elección para la creación de prototipos, especialmente para los propósitos de validación de un ASIC. Es importante determinar si el diseño del ASIC está funcionando, ya que son muy costosos de fabricar y si se termina con un chip que necesita modificaciones, se tendrá que invertir una cantidad importante de tiempo y dinero para rediseñarlo. Con la reprogramabilidad de las FPGAs se puede testar el funcionamiento y determinar la configuración ideal en un solo chip. Una vez que se ha finalizado la etapa de prototipado y determinado cuál es la mejor solución se puede utilizar la FPGA como un sistema ASIC.
- Diseño rápido y confiable: Se pueden crear soluciones y probar inmediatamente, lo cual permite modificar el programa sin cambiar el núcleo principal.

- Mantenimiento a largo plazo: los dispositivos están pensados para que una vez programados e instalados no requieran mayores mantenimientos.
- Aplicaciones en tiempo real: Las FPGAs son perfectas para sistemas de tiempo crítico debido a su arquitectura de procesamiento más eficiente. Como tales, son ideales para aplicaciones en tiempo real, ya que pueden realizar más procesamiento en un período de tiempo más corto en comparación con otras alternativas en el mercado.

Estado del arte

Hacia la última mitad del siglo XX se comienza a desarrollar el escáner 3D, con el objetivo de recrear superficies de objetos y lugares. Este tipo de tecnología es principalmente útil en el área de diseño y en la investigación. Los primeros prototipos de escáner 3D fueron desarrollados hacia los años sesenta, donde estos empleaban luces, cámaras y proyectores con el fin de realizar el escaneo. Existen distintas formas de digitalizar un objeto a 3D, muchos sensores que pueden hacer la función de escanear una pieza, sin embargo, estos se clasifican en contacto y no contacto.

Los escáneres 3D de contacto funcionan sondeando físicamente (tocando) la pieza y registrando la posición del sensor a medida que la sonda se mueve alrededor de la pieza. Una CMM es una máquina de medición de coordenadas que emplea tres componentes móviles que se trasladan a lo largo de guías con recorridos ortogonales. Un operador guía, un palpador alrededor de la pieza para realizar mediciones (x, y, z) del tipo: dimensional, posicional, desviaciones geométricas y mediciones de contorno.

Las MMC han sufrido cambios a lo largo de los años [5]:

- Años 60. Prácticamente, era una máquina de trazar, no había un desarrollo completo lo único que hacía era medir distancias y trazarlas.
- Años 70. Con la llegada del ordenador, fue posible construir máquinas, la cual moviera sus 3 ejes de manera automática. La automatización trajo consigo a que las máquinas pudieran hacer operaciones matemáticas básicas.
- Años 80. Con el avance en los computadores, la medición de estos equipos comenzó a mejorar el rendimiento, el mercado buscaba calidad y precisión.
- Últimas décadas. Las máquinas comenzaron a ser automáticas, comenzaron a salir los programas para trabajar con CAD, al ser construidas con nuevos materiales (carbono, cerámicas para las guías, aluminio), mejoraron considerablemente.

La evolución de las MMC en resumen se basa en el tipo de construcción y los materiales utilizados para realizarlos, y el segundo el cual en la actualidad tiene mucho auge es la medición y obtener el CAD, es decir al realizar la medición obtener el CAD y compararlo con uno realizado con un software especializado, y que el resultado se exacto.

Los tipos más comunes para las CMM, son: Cantiléver, Puente, Gantry, Brazo Horizontal, Portal, Puente fijo y Brazo articulado. [6]

- **CMM de puente.** Cuenta con un sistema de palpado que se mueve a lo largo de los 3 ejes, es un sistema cartesiano, las ventajas principal de este tipo de Máquinas es que es el más preciso, realiza mediciones a piezas mecánicas con altas tolerancias, así que las piezas pueden ser de tamaño pequeño a mediano. Las desventajas es que son muy costosos, muy poco portátiles.

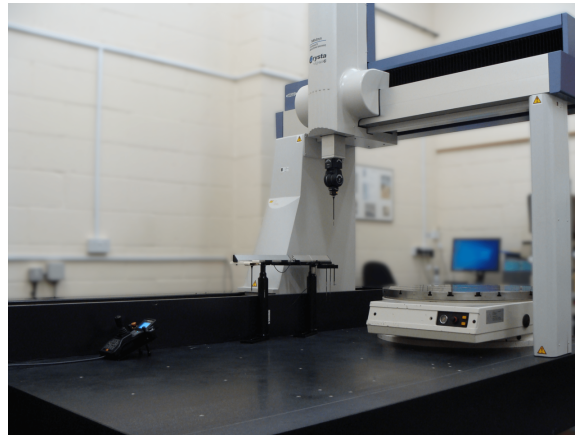


Figura 2: Máquina de Medición de coordenadas con cabeza de escaneo Tipo puente

- **CMM de pórtico.** Son fabricados para realizar mediciones a gran escala. las CMM de pórtico ofrecen lo mejor de lo mejor, incluida la alta precisión con el volumen máximo y son totalmente compatibles con una variedad de soluciones de sondeo, incluidos los escáneres láser Nikon, disparador táctil y 5 ejes. Construido con materiales con alta estabilidad térmica para garantizar una precisión óptima, proporcionando una CMM verdaderamente confiable cuando el tamaño realmente importa. [7]

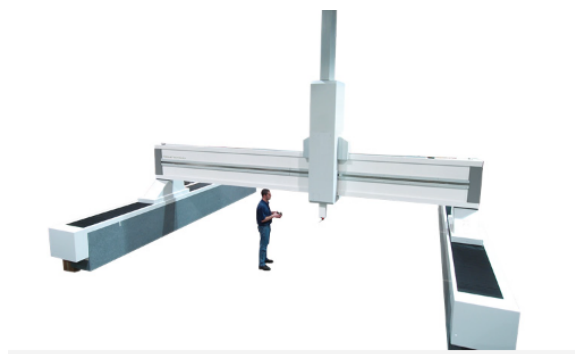


Figura 3: CMM tipo Pórtico

- **CMM Brazos articulados.** Generalmente, tienen múltiples segmentos con sensores polares en cada articulación. Según la MMC, a medida que el brazo articulado se mueve alrededor de la pieza, los sensores registran su posición y la ubicación del extremo del brazo se calcula utilizando matemáticas complejas y el ángulo de rotación de la muñeca y el ángulo de bisagra de cada articulación.

Aunque generalmente no son tan precisos como las MMC, los brazos articulados aún logran una alta precisión y son más baratos y un poco más fáciles de usar. Por lo general, no tienen opciones de CNC.



Figura 4: CMM tipo Pórtico

En la actualidad los robots se usan de manera extensa en la industria, siendo un elemento indispensable en una gran parte de los procesos de manufactura. Existen en la actualidad variedad de robots cuya función principal es el escaneo de piezas, un ejemplo claro es el Robot cartesiano para escaneado y fabricación ZDM con software M3. El palpador hace contacto con el objeto a medir haciendo que se desplace el mecanismo de la sonda y tomando la medida a partir de la señal generada. (Figura 5)



Figura 5: Robot cartesiano para escaneado Vulkan

También se encuentra la máquina Aberlink Horizon (Figura 6) fabricado por la empresa TECNIMETAL, es una máquina de medición por coordenadas, utiliza

accionamientos lineales sin fricción, que son la clave de su movimiento rápido y excepcionalmente suave. Ésta máquina sobresale por el tipo de movimientos que



Figura 6: Máquina de medición por coordenadas Aberlink Horizon

hace para el escaneo de alguna pieza, ya que hace movimientos de manera rápida, suave y silencioso, contando con una resolución de $0.1\mu m$, en la Figura 7 se puede ver la puesta en marcha de este tipo de robots, y como escanea algún tipo de pieza. Se

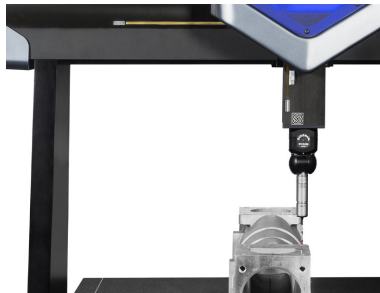


Figura 7: Máquina Aberlink Horizon

han realizado trabajos de investigación y prototipos para realizar MMC, esto con el fin de obtener máquinas más precisas, es el caso de Daniel Gallardo Artal (2018) [8], realizando una investigación para realizar un prototipo de MMC, en este trabajo se realizaron los planos para poder construir este tipo de máquinas, tratando de hacer que responda de una manera eficaz a un bajo coste, para controlar la máquina se utiliza una Tarjeta Arduino y una tarjeta extra que es la Placa CNC Shield V3, es una máquina muy completa, ya que realiza todas las funciones para tomar los datos de alguna pieza, sin embargo, a pesar de estar bien documentada para su correcta realización, solo se tiene el diseño. Otro trabajo fue “Diseño, Construcción y Fabricación de una Máquina Prototipo de Medición por Coordenadas” [9], en este trabajo para conocer la posición del palpador utilizaron sensores de posición de

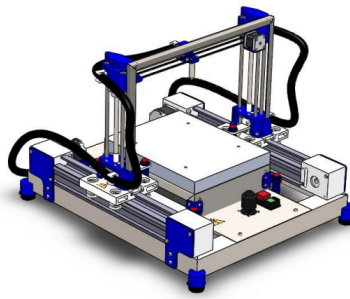


Figura 8: Modelo CAD de la MMC

infrarrojos, de ultrasonido y sensores de desplazamiento lineal por cable, el sistema de adquisición es un microcontrolador Atmega16 programado bajo el lenguaje ANSI C, todo esto visible en una LCD. Esta máquina tiene una tolerancia de 0.3 mm.

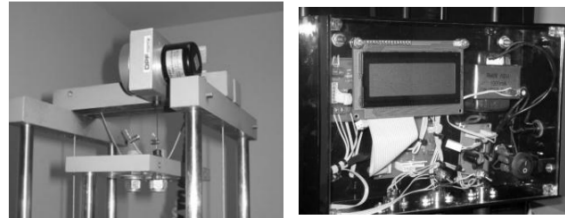


Figura 9: Montaje MMC con sistema de visualización

Justificación

Gracias al surgimiento del desarrollo de microcontroladores y a la implementación de servos en lazos cerrados, que permiten conocer con exactitud la posición real de los componentes de un robot y en el establecimiento del error con la posición deseada, se dio origen a una serie de tipos de robots, uno de estos son los robots de repetición o aprendizajes los cuales mediante el uso de controladores manuales o dispositivos auxiliares, repiten una secuencia de movimientos previamente realizados, otro son conocidos como robots inteligentes que son controlados mediante el uso de microcontroladores, además son capaces de relacionar y tomar decisiones dependiendo del medio que los rodea mediante la utilización de sensores, además existen los robots controlados por computador cuando además de ser controlados por un microcontrolador se dispone de un lenguaje compuesto por instrucciones adaptadas para el tipo de robot, con las que se puede ejecutar un programa secuencial para la elaboración.

Configuración Cinemática Cartesiana de un Robot (PPP) es una configuración compuesta por tres articulaciones (3D o PP). La posición de cada una de las articulaciones es controlada mediante coordenadas cartesianas (x, y si es de dos ejes o x, y, z si es de tres). Gracias a que los movimientos pueden iniciarse o detenerse simultáneamente en sus tres ejes el movimiento de la herramienta es mucho más suave, de igual forma permite que el robot se mueva directamente a una referencia, en lugar

de seguir trayectorias paralelas a cada eje, una de las ventajas de un robot cartesiano es que sus movimientos son totalmente lineales permitiendo así la implementación de controles más simples, de igual manera tienen un alto grado de rigidez mecánica, precisión y repetibilidad, pueden llevar cargas pesadas a lo largo de su campo de trabajo. En cuanto a sus desventajas los robots cartesianos son generalmente limitados en sus movimientos a su espacio de trabajo. La aplicación para la que se va a utilizar robot cartesiano en este proyecto consiste en la instalación de una herramienta de corte en la muñeca del robot con el fin de lograr mecanizados didácticos en materiales de bajos esfuerzos cortantes. Basado en el control numérico computarizado y en el funcionamiento de las fresadoras CNC.

Una aplicación clara en este proyecto es el escanear cuadros fabricados en madera Figura 10, un artesano en realizar un cuadro de este tipo tarda aproximadamente entre 15 días a un mes, pero al implementar este proyecto podemos escanear algún cuadro que haya realizado con anterioridad, y si cambiamos la herramienta de escaneo que es el palpador, por alguna otra de desbaste podemos darle la forma o por lo menos un avance considerable, y que el artesano se encargue de darle el toque final, en lugar de entregar una o dos al mes que cada una cuesta alrededor de 10,000 pesos, podrá entregar 10, y así poderles reducir el precio, saliendo rentable este tipo de automatizaciones.



Figura 10: Retablo Maya De Pakal El Grande, En Madera De Fina De Cedro

Objetivos

Los objetivos general y específicos de este trabajo de tesis se enuncian a continuación.

Objetivo General

“Diseñar y construir por medio de un palpador un escaner 3D”

Objetivos Específicos

- Estudiar el modelo dinámico del robot.
- Actualizar la instrumentación del robot para dejar el sistema robusto con el fin de minimizar fallas durante el traslado y uso del robot.
- Estudiar el sistema embebido del robot CNC de tres grados de libertad.
- Elegir el tipo de palpador adecuado para la herramienta que nos permita realizar la función de escáner 3D.
- Diseñar y construir el hardware del palpador como herramienta.
- Desarrollo del firmware y software del robot para las funciones de escáner 3D.
- Realizar pruebas experimentales del sistema diseñado.
- Publicación de resultados.
- Escritura de Tesis.

Capítulo 1

Descripción del robot

Para tener en cuenta como es el desarrollo del proyecto es necesario conocer el robot, cuales son las partes que la componen. En el laboratorio de las Maestría en Ciencias de la Electrónica opción en Automatización (MCEA) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), se tiene un robot tipo cartesiano de 3 grados de libertad (G.D.L) el cual se muestra en 1.1, configurado para funcionar como un control numérico por computadora, el cual el usuario utiliza para darle las coordenadas, el robot ofrece grandes beneficios el cual pueden hacerles adaptaciones, en este caso hacerle un cambio para que funcione como escáner 3D.

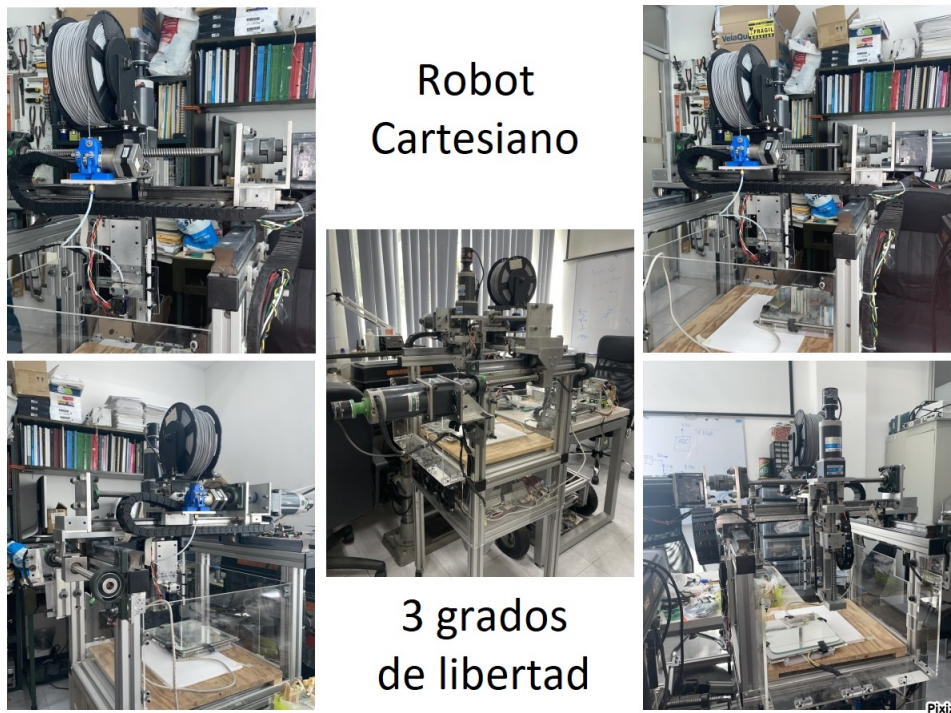


Figura 1.1: Robot CNC 3 grados de libertad

1.1. Características mecánicas

Se han realizado trabajos en el robot y han ido mejorando el mecanismo, el robot está fabricado de acero, los rieles de alta precisión hacen que tenga mayor eficiencia para cada grado de libertad [10]. Además, los rieles están sobre unos carros lineales para obtener un mejor desplazamiento lineal con mínima fricción. Para transformar el movimiento rotatorio que proporcionan los motores a un movimiento lineal, se colocaron tornillos embalados. Para los movimientos de los 3 gdl, se tienen motores reductores que se alimentan a 12V, que proporcionan 3100 rpm, y generan un torque de 3-4Nm, entonces para poder ocuparlos como servomotores tienen acoplado un encoder cuya resolución es de 1000 pulsos por revolución para determinar la posición actual. En la tabla 1.1, se muestra las características generales del sistema. A continuación se describen los componentes que integran el robot:

Descripción	Requerimiento
Número de grados de Libertad	3(X,Y,Z)
Ejes X y Y	Desplazamiento: $X = 276mm$ Tornillo embalado de 12mm Guía de alta precisión 32mm Bloque para guía de 32mm
Eje Z	Desplazamiento: 145mm Tornillo embalado de 12mm Guía de alta precisión de 15mm Bloque para guía de 15mm
Tamaño (mm)	950 x 1470 x 860
Resolución	$\Delta x = 0.286\mu m$ $\Delta y = 0.287\mu m$ $\Delta z = 0.171\mu$
Velocidad	$v_x = 35mm/s$ $v_y = 25mm/s$ $v_z = 21mm/s$
Software	Abierto
Conectividad	Wifi
Sistemas Operativos	Abiertos

Tabla 1.1: Características Generales del Robot

- Riel de alta precisión. Ambos son implementados en cada eje del robot, para obtener un desplazamiento lineal con una fricción mínima.



Figura 1.2: Riel de precisión y carro

- Tornillo embalado. Para poder convertir el movimiento rotatorio del motor en un movimiento lineal es necesario utilizar el tornillo embalado, el funcionamiento del mecanismo es que dentro de el tiene balines internos que desplazan la tuerca del tornillo. El funcionamiento se muestra en la figura 1.3



Figura 1.3: Corte Transversal Tornillo embalado

- Interruptores de carrera. El robot tiene instalado en cada uno de los ejes switch de fin de carrera, se instalaron para delimitar el área de trabajo, y no tenga un daño en el robot. En pocas palabras se utilizan como un “paro de emergencia” en caso de que el control llegue a fallar, se activan los switch y detienen el movimiento del robot. A continuación se muestra los fines de carrera utilizados.
- Motores DC y reductores. El sistema usa motores para mover los distintos ejes. Para X, Y , se tienen 2 motores con reductor, específicamente el modelo Z5D120-12 que se alimentan a 12 V y son capaces de proporcionar 3100 rpm a un torque de entre 3 y 4 Nm. Los reductores que se tienen para estos motores son del modelo 5GU9K. Por otro lado, al eje Z se le acopló un motor modelo



Figura 1.4: Switch Fin de carrera

Z4D40-12GN-30S, el cual también se alimenta a 12 V y que posee un reductor modelo 4GN15K. A continuación se muestran los dos motores utilizados en las Figuras 1.5 y 3.33



Figura 1.5: Motor Z5D120-12 con reductor 5GU9K.



Figura 1.6: Motor Z4D40-12GN-30S con reductor 4GN15K.

- Encoders. El encoder que se utiliza es el modelo E6B2-CWZ6C, provee 1000 pulsos por revolución, el rango de alimentación es de 5-24 V con un consumo de corriente que puede que llegar hasta 80m A. Este tipo de encoder de cuadratura proporciona 3 señales de salida denominadas A,B,Z, con el propósito de brindar la posición y la velocidad, a demás con una buena interpretación de la señal es posible verificar en que sentido gira el motor
- Módulo wifi modelo es el Wi RN-XV, wifi cuál establece la comunicación entre el sistema mecatrónica y la computadora. Con este dispositivo es posible

activar el microprocesador y mandar instrucciones desde la computadora para controlar sus funciones y los movimientos del robot. El módulo consta de un dispositivo con acceso LAN inalámbrico integrado que es completo e independiente. También posee un protocolo de comunicación TCP/IP y tiene la gran ventaja de que solo requiere de 4 pines para su implementación.

- Tarjeta de implementación DE0-CV. Esta tarjeta es un FPGA modelo Cyclone V 5CEBA4F23C7N. El dispositivo completo cuenta con las siguientes características principales:
 - FPGA Cyclone V 5CEBA4F23C7N
 - 49,000 elementos lógicos programables
 - 3080 Kbits de memoria embebida
 - Memoria SDRAM de 64MB x 16 bits de bus de datos
 - 4 PLLs fraccionales
 - Memoria EPCS64
 - 2x20 pines de propósito general (72 pines I/O, 2 pines de alimentación de 3.3VCD y 2 de 5VCD con sus respectivas tierras)
 - 6 displays de 7 segmentos
 - 10 LEDs
 - 10 interruptores
 - 4 pulsadores de propósito general
 - 1 pulsador para el reset de la CPU

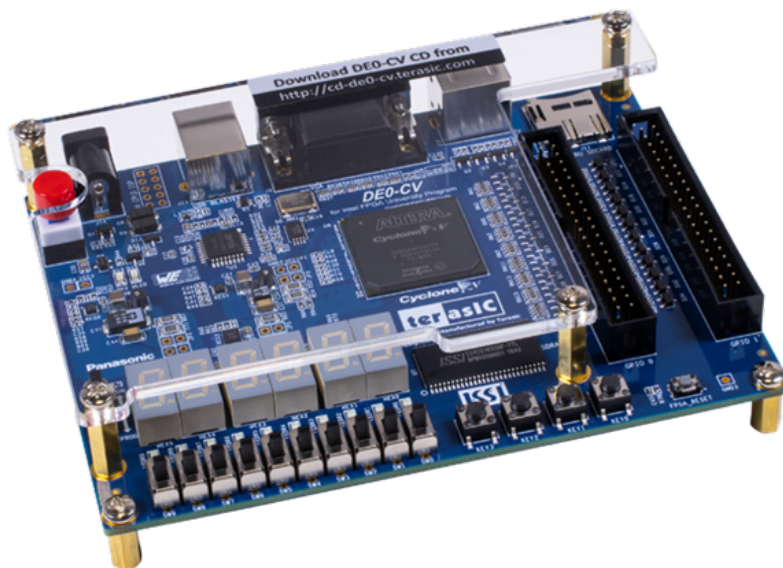


Figura 1.7: Tarjeta de implementación DE0-CV.

Se puede consultar la referencia [11] para encontrar datos más específicos del robot.

1.2. Resolución del robot CNC

Un factor importante en los CNC es la resolución con la que realizan el maquinado, para el robot CNC que se está presentando, las variables a considerar son la longitud de desplazamiento del carro en cada eje, el número vueltas del tornillo embalado para recorrer esa distancia, los reductores y la resolución del encoder. Los Motores que se encuentran en X, Y cuentan con reductores de 9:1, es decir 9 giros del motor por 1 del reductor, realizando la prueba de forma manual, cada que el reductor da una vuelta el motor gira 8.69 vueltas. El motor en el eje Z se tiene un reductor con relación 15:1, realizando la prueba por una vuelta del reductor el motor realiza 14.6 vueltas. La resolución de los tornillos embalados, es de una vuelta/cm. Los encoder tienen una resolución de 1000 pulsos/vueltas, al ser encoder de cuadratura se multiplica por 4 que son los posibles cambios, por lo tanto, se tienen 4000 combinaciones, es decir, 4000 conteos/vuelta del motor. Con los datos presentados se calcula la resolución de los ejes.

$$\Delta_x = \frac{L_x}{N * R * C} = \frac{276mm}{27.75 * 8.69 * 4000} = 0.286um \quad (1.1)$$

$$\Delta_y = \frac{L_y}{N * R * C} = \frac{245mm}{24.5 * 8.69 * 4000} = 0.287um \quad (1.2)$$

$$\Delta_z = \frac{L_z}{N * R * C} = \frac{145mm}{14.5 * 14.6 * 4000} = 0.171um \quad (1.3)$$

Donde:

- $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$, es la resolución de los ejes X, Y y Z .
- L_x, L_y, L_z es la longitud total desplazada en cada eje.
- N es el número de vueltas necesarias para desplazarse en L
- R es la reducción de la caja de engranes de motor.
- C son los conteos del encoder por vuelta del motor.

Con estas características es posible realizar el escaneo de alguna pieza. Un motor puede ser caracterizado, lo que implica que el par solicitado para la entrada del motor corresponde al par de la salida, siempre que este se encuentre en el rango de torque del dispositivo, esto es de gran ayuda, ya que en las ecuaciones del modelo dinámico vamos a considerar que se le está solicitando un torque para poder realizar las simulaciones. [10]. Para poder lograr esto, se debe considerar que el proceso de caracterización consta de varios pasos:

1. Primero se debe determinar el torque máximo del motor, para lo cual se realiza una variación del voltaje de alimentación con que se conecta el motor (sin exceder el límite de voltaje de trabajo recomendado en la hoja de datos).

2. Realizar el cálculo correspondiente para obtener la mitad del torque máximo al que trabaja el motor al alimentarlo con una señal de PWM al 50% del ciclo de trabajo. En orden de poder lograr este paso, es necesario contar con el programa que te genere la señal de variación de frecuencia del PWM, la cual debe ir desde los 50 Hz hasta la frecuencia determinada por el usuario.
3. El siguiente paso consiste en seleccionar las frecuencias o frecuencia que proporcione el valor que sea más cercano a la mitad del torque máximo que se calculó en el paso anterior.
4. Se debe probar cada una de las secuencias seleccionadas al ir variando el ciclo de trabajo del 10% al 90% de su rango. Esto se realiza sin variar la alimentación del motor, empleando para ello el voltaje del torque máximo. Cuando se varía el ciclo de trabajo, se debe determinar el torque del motor para cada variación del PWM y con los datos obtenidos graficar lo que corresponde a la respuesta del motor.
5. Al final, se deben revisar las gráficas obtenidas y analizarlas para determinar la ecuación de la curva característica. Con esto, se tiene que seleccionar la frecuencia que proporcione la respuesta más cercana posible a un comportamiento lineal para el motor.

Al seguir este procedimiento, es posible demostrar que un motor DC convencional puede ser empleado para emular un motor de transmisión directa, lo cual resulta muy conveniente, sobre todo en la parte de costos, dado que los motores de transmisión directa son mucho más caros que los motores DC convencionales. Además, con lo que se ha descrito anteriormente de procedimiento y características, es posible observar que el generador PWM, el cual permite mandar una señal de control que tiene la forma de un pulso de ancho determinado, se vuelve sumamente importante para el funcionamiento del motor. Con la curva característica obtenida para el comportamiento del motor, es posible solicitar un torque y obtenerlo con la variación del ancho de pulso del PWM. Para el motor del eje X, Y se tiene una Frecuencia de 2.5 kHz.

Ciclo de Trabajo PWM	Torque (Nm) X	Torque (Nm) X
0	0	0
10	2.8616	3.3124
12	3.9494	4.2924
14	4.3708	5.1058
16	5.2528	5.8016
18	5.9976	6.3406
20	6.4288	6.8208
22	7.595	7.6832
24	8.1155	8.477
26	8.428	9.31
28	9.555	9.996
30	10.388	11.0152
32	10.8192	11.7992
34	11.6032	12.348
36	12.348	13.1

Tabla 1.2: Caracterización de motores X, Y

Ciclo de Trabajo PWM	Torque (Nm) Z
0	0
10	0.0616077
20	0.3435096
30	0.6571488
40	0.840105
50	1.250823
60	1.437513
70	1.8930366
80	2.072259
90	2.5688544

Tabla 1.3: Caracterización del motor Z

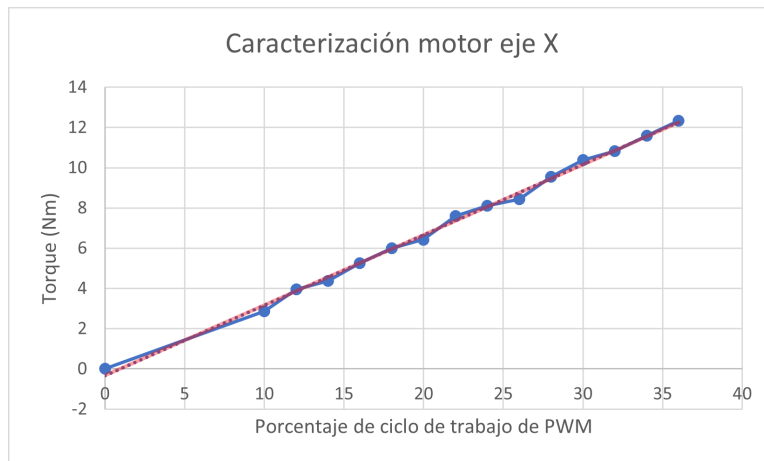


Figura 1.8: Curva Motor X.

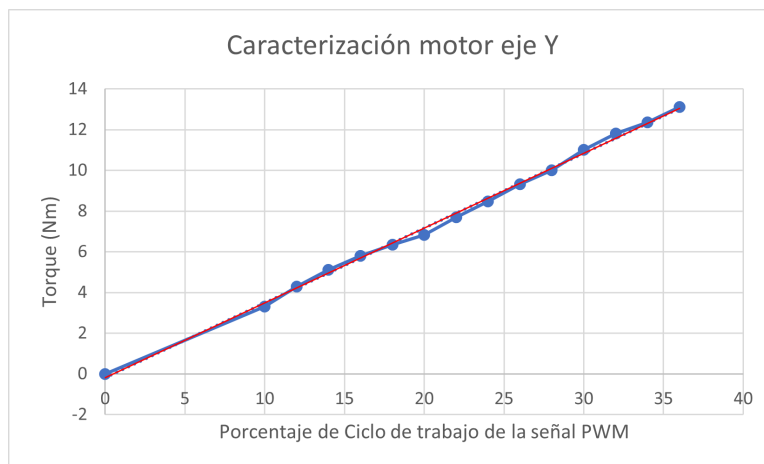


Figura 1.9: Curva Motor Y.

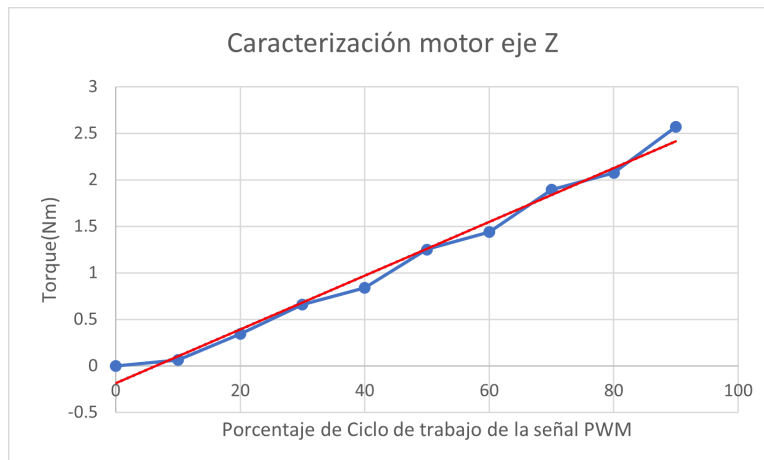


Figura 1.10: Curva Motor Z.

1.3. Sistema de Control

El control del robot tiene mucha importancia, ya que es el responsable de mandar los comandos. El control se realiza mediante una FPGA DEV0-CV perteneciente a la familia Cyclone 5, desarrollando un Firmware embebido en el software Quartus II. El microprocesador embebido en el FPGA es el encargado de realizar todo el control, este microprocesador se desarrolló en MCEA, está diseñado con base en una arquitectura MIPS (Microprocessor without Interlocked Pipeline Stages), y tiene un procesador con un banco con 32 registros de 32 bits con arquitectura RISC (Reduced Instruction Set Computer). El Firmware tiene un protocolo de comunicación wifi que permite mantener un enlace de datos con una computadora y la tarjeta de adquisición. Además, este permite procesar la información proveniente de la computadora y la tarjeta de adquisición de datos, procesar la información proveniente del usuario en lenguaje ensamblador y de esta forma realizar las correspondientes operaciones aritméticas con la finalidad de realizar el control del robot de manera eficiente y de acuerdo con las instrucciones establecidas por el diseñador.

El Firmware implementado tiene bloques para que el robot tenga un correcto funcionamiento, a continuación se describen los más importantes.

- Administrador de Wifi. Permite al FPGA comunicarse con protocolo serial al módulo WiFly, el cual conecta de forma inalámbrica con la computadora. De esta forma se tiene comunicación entre la computadora y la tarjeta del robot por medio del software de control.
- Administrador SDRAM. Es un bloque de control de memoria que permite enviar comandos para escribir y leer datos de 32 bits en forma paralela. Recibe y procesa los datos que recibe del WiFi.
- Decodificador de señales. Procesa las señales provenientes de los encoder. Las señales A y B, provenientes de los encoder tienen un desfase de 90° , en dichas señales se tiene la información de la dirección y el sentido. En Firmware tiene un bloque para decodificar este tipo de señales donde se lleva a cabo el conteo de pulsos y determinar en que posición se encuentra, también se puede determinar si gira en sentido horario o antihorario.
- Interruptores de proximidad. Se encarga de leer los sensores de proximidad (Fines de carrera), que se encuentran en cada eje, este bloque hace que si por alguna razón el control tuviera una falla este corta el voltaje a los motores.
- Generadores PWM. El Firmware genera la señal de PWM y controla la velocidad de los motores.

El usuario manipula los parámetros del robot por medio de una interfaz implementada en LabView, en esta se pueden manipular parámetros del sistema como lo son las posiciones deseadas para los motores y las ganancias de ajuste de los controles usados en cada eje del mecanismo. Dicha Interfaz el control hacia el microprocesador, por medio de Wifi, la FPGA es la encargada de ejecutar algoritmos de control que emplea el robot CNC para funcionar, 3 lazos de control cerrados que corresponden a los ejes de movimiento X, Y, Z .

En la figura 3.36 se muestra el diagrama general del robot.

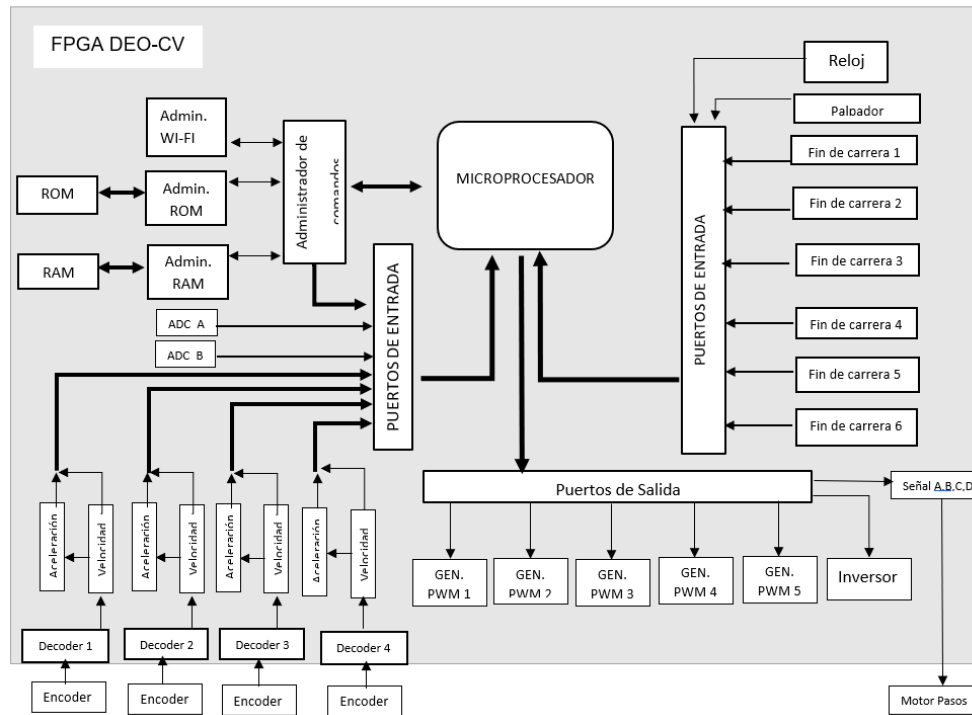


Figura 1.11: Diagrama general del robot Cartesiano.

1.4. Software de usuario

Es necesario saber la información que el microprocesador está mandando y a su vez mandar información a la máquina, es por eso que se tiene una interfaz usuario-máquina. Para el dispositivo de estudio, se tienen desarrollados dos software de usuario:

- Compilador de posiciones deseadas.
- Interfaz de usuario.

El **Compilador de posiciones deseadas** es necesario para obtener las instrucciones para que la máquina construya una figura 3D y se generan por medio del procesamiento del diseño de una pieza 3D realizada en un software CAD (computer assisted design), lo que hace es traducir el diseño a instrucciones que el microprocesador pueda ejecutar. (Figura 3.37)

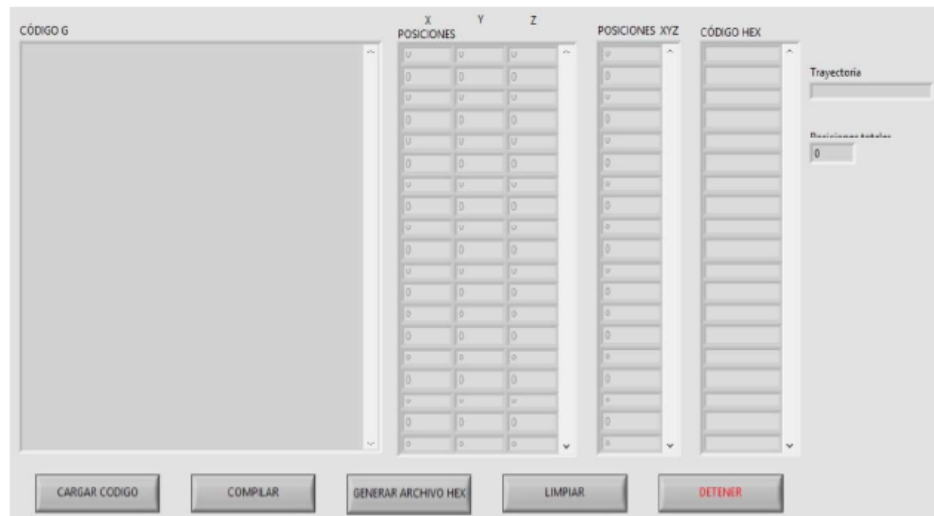


Figura 1.12: Diagrama general del robot CNC de 3 grados de libertad aplicado a impresión 3D.

La interfaz está desarrollada en LabView, el programa solicita el archivo CAD, el cual lo compila y transforma a código G, después se compila para generar el código Hexadecimal el cual produce las coordenadas para cada eje. La interfaz tiene la opción de generar un archivo para guardar las posiciones en un archivo de texto desde donde puede ser ingresado al otro software de usuario.

La segunda interfaz lleva a cabo el control del robot y permite al usuario controlar la velocidad y posición de los 3 ejes (cada uno por separado). La interfaz está implementada en LabView, el software cuenta con 3 ventanas, en la Figura 3.38 es donde se puede descargar el archivo del código con las instrucciones necesarias para realizar el control del sistema y cerrar los lazos de control de la máquina.



Figura 1.13: Interfaz gráfica para el compilador de posiciones deseadas.

En la pestaña 2 se realiza la descarga a la memoria RAM (Figura 1.14), del archivo con las posiciones deseadas para la realización de una pieza. Este archivo debe tener las instrucciones (coordenadas) en formato hexadecimal, lo que explica la importancia del primer software de usuario. Es importante mencionar que antes de realizar la descarga del archivo, la interfaz provee con la opción de asignar un

offset para que al descargar los datos se empiecen a almacenar en una dirección determinada de la RAM.

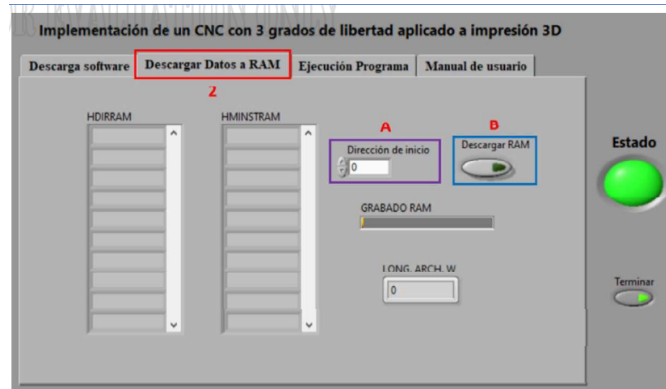


Figura 1.14: Segunda ventana del software de usuario: descarga de posiciones deseadas en la RAM.

La última pestaña es la ejecución del programa este a su vez contiene 3 sub-pestañas, la primera sub-pestaña (Figura 1.15) se encarga de asignar los parámetros de inicio (Velocidades deseadas) para cada uno de los dispositivos controlados por el microprocesador. También permite asignar las ganancias K_s y K_p para los controles de lazo cerrado. Tiene un botón para iniciar o detener el programa.

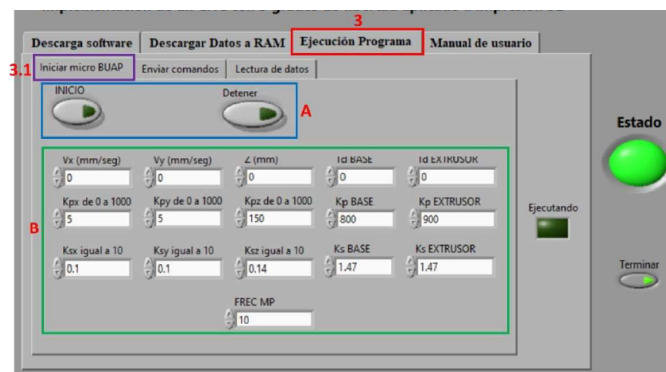


Figura 1.15: Pestaña de ejecución del programa: sub-pestaña de inicialización.

La segunda sub-pestaña, Enviar comandos (Figura 3.43), en este se mandan datos directos al microprocesador, mandar las posiciones deseadas en cada uno de los dispositivos controlados, variar las ganancias de los controles, etc.

La última sub-pestaña es la encargada de leer los datos que vienen del microprocesador (Figura 3.44), como la posición actual que viene de alguno de los ejes. Los datos son procesados por la interfaz, es por eso que tiene la opción de poder guardar los datos en un archivo con extensión .tex para posteriormente realizar un análisis y procesamiento de los mismos.

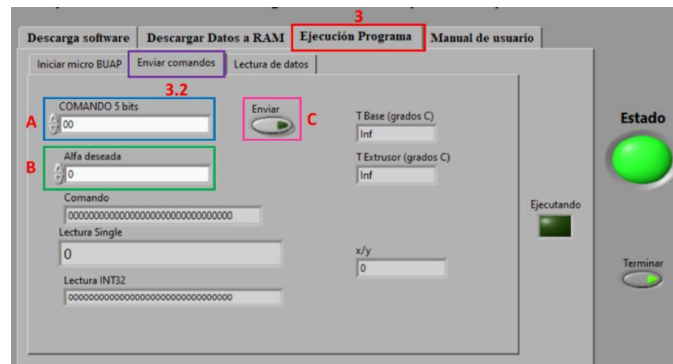


Figura 1.16: Sub-pestaña de envío de comandos.

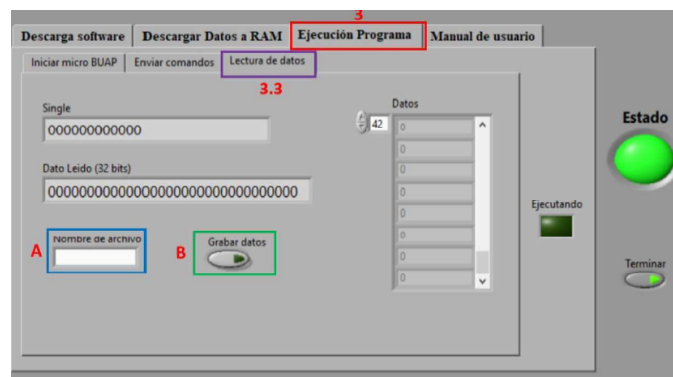


Figura 1.17: Sub-pestaña Lectura de datos.

1.5. Electrónica del Robot

El robot cartesiano cuenta con una electrónica que hace funcionar a los motores, realizar el acoplamiento adecuado de las señales para no dañar el FPGA, sin embargo, no se encuentra en las mejores condiciones, ya que a pesar de que funciona, y se han realizado bastantes trabajos en torno a este robot, si se le da uso continuo se sobre-calientan los puentes H lo que provoca un mal funcionamiento en el sistema, en la Figura 3.45 podemos ver como el FPGA, se encuentra inmerso dentro de muchos cables, Jumpers, circuitos que realizan distintas tareas en específico, por otra parte, en la Figura 1.19 se muestra la electrónica de Potencia, puede verse que no tiene buenos disipadores, se deben realizar muchos cambios para dejar una electrónica robusta, esto con el objetivo de que el robot pueda funcionar como un robot Industrial.

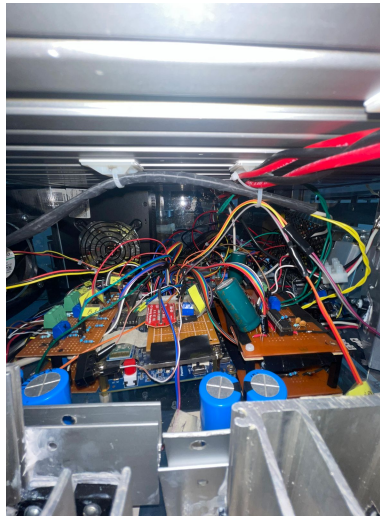


Figura 1.18: Electrónica del Robot, FPGA.



Figura 1.19: Electrónica de Potencia del ROBOT.

1.6. Conclusiones

Este proyecto comienza con un robot cartesiano CNC de 3 GDL, las características con las que cuenta hace que sea muy preciso, y se pueda transformar a un escáner 3D, con base a esto es posible realizarlo, haciendo ciertos cambios en el Hardware, Firmware y Software, como lo es colocar el palpador, proponer un nuevo sistema de control y cambiar la electrónica, todo eso tomando como base el robot cartesiano y los parámetros descritos.

Capítulo 2

Modelo Dinámico con Fricción

2.1. Fricción

La fricción, fuerza de roce o fuerza de rozamiento es una fuerza existente entre dos superficies que se encuentren en contacto, y que se opone al movimiento, o sea, tiene dirección contraria al movimiento. Esta fuerza puede ser de dos tipos: estática (cuando se opone al inicio de un deslizamiento) o dinámica (cuando se opone al movimiento relativo). [12]. La fuerza de fricción no es una de las fuerzas fundamentales del universo, como lo es la gravedad, sino que se debe a la compleja interacción entre la superficie de dos objetos en contacto físico. Generalmente, se habla de fricción para objetos sólidos, pero también existe fricción en los líquidos: el efecto de la fricción entre las capas de una sustancia líquida define su viscosidad.

2.1.1. Tipos de Fricción

Cuando se tiene dos superficies u objetos en reposo no lubricados, en contacto, realizan un movimiento, es por eso que a este tipo de fricción también se le conoce como Seca

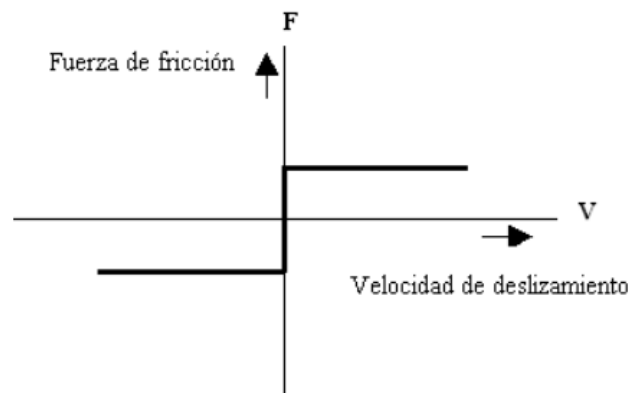


Figura 2.1: Modelo Fricción de Coulomb.

El modelo de este tipo de fricción está descrita por:

$$F_c = F_n \mu_s \operatorname{sgn}(v) \quad (2.1)$$

Donde F es la fuerza de fricción, F_n es la fuerza normal, μ_s es el coeficiente de fricción de coulomb, este modelo se utiliza debido a su simplicidad, por ende es el más usado, tomando en cuenta que rozamiento es lo mismo que fricción, de la fricción de coulomb se derivan dos:

- Fricción estática: las superficies se están en reposo relativo.
- Fricción dinámica: se da cuando una de las superficies desliza sobre la otra.

La fricción estática necesita una fuerza para iniciar el movimiento de un objeto, el cual debe vencer el coeficiente de fricción estática, denotado por μ_s , la fuerza de fricción estática denotada por F_s , varía desde un valor cero cuando no se le aplica ninguna fuerza externa y la fuerza de Fricción máxima, esto es cuando el cuerpo va a comenzar a moverse. Esta fricción estática suele ser mayor a la dinámica, lo cual explica por qué es más difícil empezar a empujar un mueble pesado sobre suelo rugoso, que seguir empujándolo una vez que ya está en movimiento. [12].

La fricción estática solo tiene una dependencia estática de velocidad. La fuerza de fricción es igual a las fuerzas extensibles, mientras un máximo o mínimo es alcanzado: $F_{max} = F_n\mu_s, F_{min} = -F_n\mu_s$.

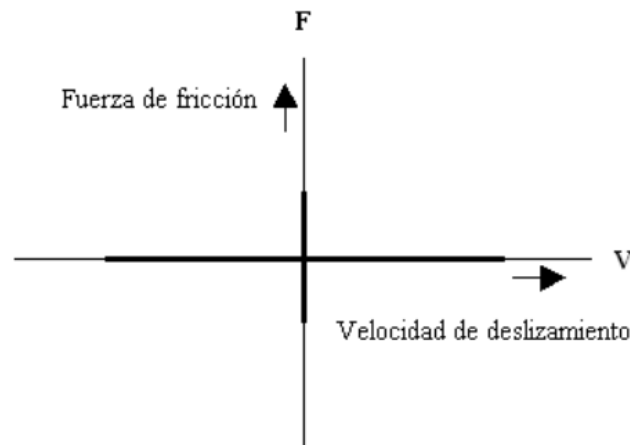


Figura 2.2: Fricción Estática.

La fricción dinámica ocurre cuando los dos objetos están en movimiento, es decir se mueven el uno contra el otro, el coeficiente de fricción dinámica se denota por μ_k , consideremos la Figura 2.3, cuando está ocurriendo el deslizamiento en la superficie de contacto, la fuerza de fricción dinámica es proporcional a la fuerza normal, entonces tenemos que $F_k = \mu_k N$

Existen varios mecanismos donde se presenta el fenómeno de fricción, un ejemplo claro y que se presenta en el robot cartesiano a utilizar es en los tornillos embalados, cuando el tornillo embalado gira depende del coeficiente de fricción y del ángulo θ de paso del tornillo

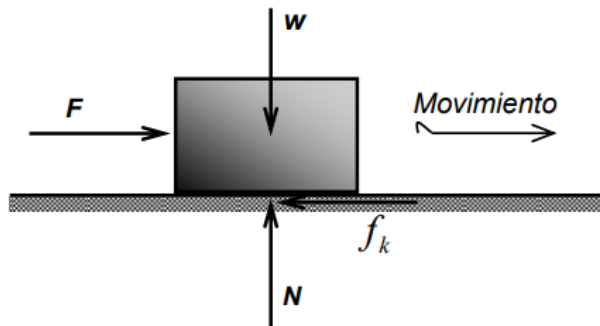


Figura 2.3: Fricción Dinámica.

2.1.2. Modelo de fricción

Modelar la fricción resulta complejo, ya que se deben realizar varias consideraciones como que tanto desgaste existe, si hay lubricación, la temperatura en la que se encuentra, etc. Es por eso que existen distintos modelos para identificar la fricción.

Para reducir el fenómeno de fricción se introduce lubricante en los elementos, esto ayuda al sistema, sin embargo, modifican la dinámica de la fricción, es por eso que Reynolds propone el modelo de fricción viscosa, el cual menciona que la fuerza de fricción es directamente proporcional a la velocidad.

$$F_v = c\dot{x} = cv \quad (2.2)$$

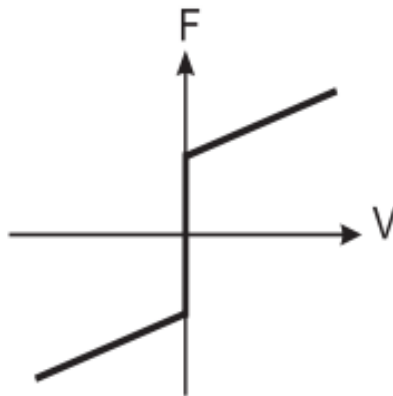


Figura 2.4: Fricción Viscosa + coulomb.

Anteriormente, se mencionó el modelo de fricción de coulomb, después se combinó con la Fricción viscosa, estos dos modelos solo abarcan una parte del fenómeno de fricción, es por eso que se hizo una unión de 4 tipos de fricción.

- Fricción estática.

- Fricción de ruptura.
- Fricción de Coulomb.
- Fricción viscosa.

Al realizar este tipo de acoplamiento se obtiene la siguiente gráfica. (Figura 2.5) La

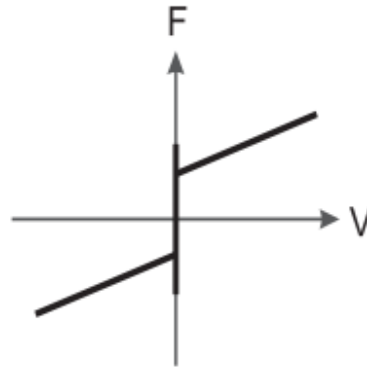


Figura 2.5: Fricción acoplada

lubricación reduce los efectos de fricción; sin embargo, este tiene varias fases, las cuales son cuatro: lubricación límite, lubricación acotada, lubricación fluida parcial y lubricación fluida completa, es aquí cuando surge el modelo stribeck.

Este modelo plantea una transición suave de fricción estática a dinámica, que pasa por los estadios de lubricación límite, acotada, fluida parcial y fluida completa, siendo la primera de ellas la que corresponde a cero velocidades y la última de ellas a la de mayor velocidad. La incorporación del fenómeno Stribeck que se muestra en la Figura 2.6 incorpora las cuatro etapas.

El efecto de Stribeck es un fenómeno que se presenta a muy bajas velocidades y representa el transitorio entre la energía requerida para vencer la fricción estática y la energía requerida para vencer la fricción de Coulomb. Esto se da cuando un sistema mecánico pasa del reposo al inicio del movimiento.

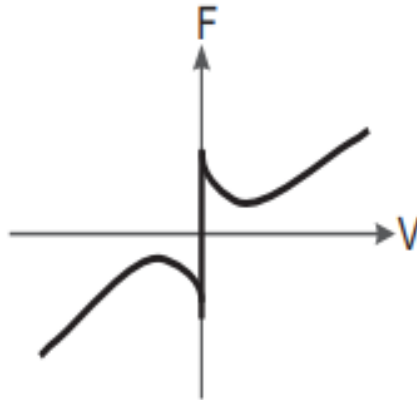


Figura 2.6: Fricción Stribeck

De acuerdo a [13] la fricción que incluye estos fenómenos puede modelarse de la siguiente manera:

$$F_{si} = \tau_{fsi} + k_c \text{signo}(\dot{q}) + b_i \dot{q} \quad (2.3)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \tau_{fsi} = & \frac{1}{4} S_{ti1} [\text{signo}(\dot{q}) + 1] [1 + \tanh(k_i(\dot{q} + S_{hi2}))] \\ & - \frac{1}{4} S_{ti2} [1 - \text{signo}(\dot{q})] [1 - \tanh(k_i(\dot{q} - S_{hi1}))] \end{aligned} \quad (2.4)$$

El cual representa la siguiente forma

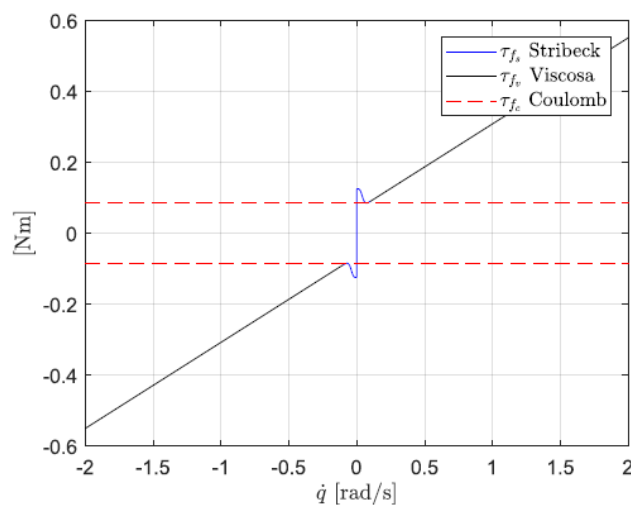


Figura 2.7: Gráfica del Torque de Fricción

2.2. Obtención del Modelo Dinámico

Es importante determinar el modelo dinámico para realizar un control más apropiado del robot y que además presente un mejor desempeño, de igual manera, es muy útil para analizar su comportamiento con diferentes algoritmos de control.

2.2.1. Ecuación de Euler-Lagrange

El modelo dinámico parte del Lagrangiano de un sistema:

$$\mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathcal{K}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathcal{U}(\mathbf{q}) \quad (2.5)$$

Definimos como la diferencia entre la energía cinética $\mathcal{K}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ y la energía Potencial $\mathcal{U}(\mathbf{q})$, de la ecuación 2.1, podemos definir las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange con la siguiente ecuación.

$$\tau = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \mathbf{q}} \quad (2.6)$$

Aplicando la ecuación de Lagrange, considerada como el antecedente de la ecuación de Euler-Lagrange, obtenemos la ecuación 2.3:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \mathbf{q}} + \frac{\partial \mathcal{D}t(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \dot{\mathbf{q}}} = \frac{\partial \delta \mathcal{W}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \dot{\mathbf{q}}} - F_s \quad (2.7)$$

\mathcal{L} representa el Lagrangiano del sistema, $\mathcal{D}t$ es la energía disipativa del sistema (Denominada energía de disipación de Rayleigh), $\delta \mathcal{W}$ es el trabajo virtual que interactúan en el sistema agrupado. El método de parámetros agrupados, permite considerar todas las energías del sistema utilizando la mecánica clásica para describir cada componente.

2.2.2. Método de parámetros Agrupados

Para comenzar el análisis dinámico del sistema, nos basamos en la estructura mecánica de uno de los ejes del robot (Figura 2.8), ya que en los demás ejes la estructura es la misma.



Figura 2.8: Estructura mecánica.

Partimos del método de parámetros agrupados, el cual intervienen todos los elementos mecánicos conectados [13], como se muestra en la Figura 2.8. Como primer

elemento tenemos el motor, seguido de la caja de engranajes, el cople es el encargado de unir dos ejes, el de salida de la caja de engranes y el tornillo embalado, este último está conectado a una tuerca la cual lo acopla a la mesa de trabajo. Realizando el esquema completo para cada elemento tenemos lo siguiente: En la Figura 2.10 se

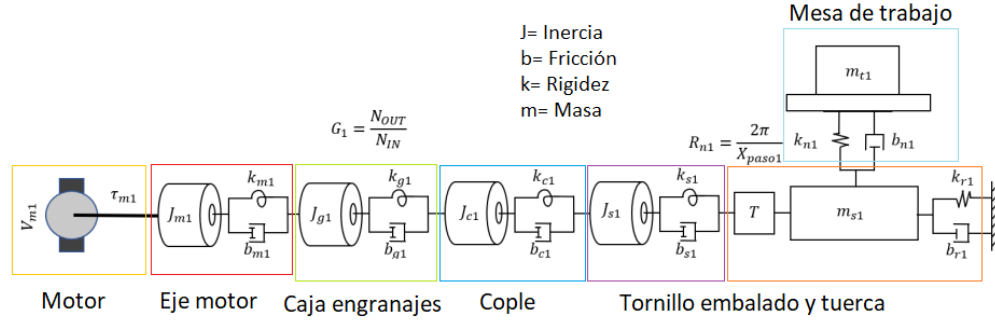


Figura 2.9: Estructura mecánica.

muestra la representación de cada fenómeno que afecta al CNC, como puede apreciarse tiene constantes y variables, La tabla 2.1 muestra las constantes del robot, en este caso son para el eje X, pero al tener la misma configuración puede generalizarse para el eje Y y Z. El robot como se mencionó anteriormente es de tipo cartesiano, así que la cinemática para el eje X esta dada por la siguiente expresión.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{b1} + x_{xt1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Siguiendo la metodología de parámetros agrupados y la ecuación de Lagrange, debemos plantear la ecuación del eje ya con las energías correspondientes. (Ecuación 2.3), obteniendo las siguientes ecuaciones.

$$K_1(\varphi_1, \dot{\varphi}_1) = \frac{1}{2} J_{m1} \dot{\theta}_{m1}^2 + \frac{1}{2} J_{g1} \dot{\theta}_{g1}^2 + \frac{1}{2} J_{c1} \dot{\theta}_{c1}^2 + \frac{1}{2} J_{s1} \dot{\theta}_{s1}^2 + \frac{1}{2} m_{s1} (\dot{X}_{s1})^2 + \frac{1}{2} m_{t1} (\dot{X}_{t1})^2 \quad ; \quad (2.9)$$

$$U_1(\varphi_1) = \frac{1}{2} K_{m1} (\theta_{m1} - G_1 \theta_{g1})^2 + \frac{1}{2} K_{g1} (\theta_{g1} - \theta_{c1})^2 + \frac{1}{2} K_{c1} (\theta_{c1} - \theta_{s1})^2 + \frac{1}{2} K_{s1} (\theta_{s1} - R_{n1} X_{s1})^2 + \frac{1}{2} k_{r1} X_{s1}^2 + \frac{1}{2} k_{t1} (X_{s1} - X_{t1})^2 \quad (2.10)$$

$$D_1(\varphi_1, \dot{\varphi}_1) = \frac{1}{2} b_{m1} (\dot{\theta}_{m1} - G_1 \dot{\theta}_{g1})^2 + \frac{1}{2} b_{g1} (\dot{\theta}_{g1} - \dot{\theta}_{c1})^2 + \frac{1}{2} b_{c1} (\dot{\theta}_{c1} - \dot{\theta}_{s1})^2 + \frac{1}{2} b_{s1} (\dot{\theta}_{s1} - R_{n1} \dot{X}_{s1})^2 + \frac{1}{2} b_{r1} \dot{X}_{s1}^2 + \frac{1}{2} b_{t1} (\dot{X}_{s1} - \dot{X}_{t1})^2 \quad (2.11)$$

$$\delta \mathcal{W}_1(\varphi_1) = \tau_{m1} \delta \theta_{m1} \quad ; \quad ; \quad ; \quad (2.12)$$

Por lo que los vectores φ_1 y $\dot{\varphi}_1$ son:

$$\varphi_1 = [\theta_{m1}, \theta_{g1}, \theta_{c1}, \theta_{b1}, X_{s1}, X_{t1}]^T \quad (2.13)$$

$$\dot{\varphi}_1 = [\dot{\theta}_{m1}, \dot{\theta}_{g1}, \dot{\theta}_{c1}, \dot{\theta}_{b1}, \dot{X}_{s1}, \dot{X}_{t1}]^T \quad (2.14)$$

Aplicando la Ecuación de Lagrange obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$J_{m1}\ddot{\theta}_{m1} + K_{m1}(\theta_{m1} - G_1\theta_{g1}) + b_{m1}(\dot{\theta}_{m1} - G_1\dot{\theta}_{g1}) = \tau_{m1} \quad ; \quad (2.15)$$

$$J_{g1}\ddot{\theta}_{g1} + K_{m1}G_1(G_1\theta_{g1} - \theta_{m1}) + K_{g1}(\theta_{g1} - \theta_{c1}) + b_{m1}G_1(G_1\dot{\theta}_{g1} - \dot{\theta}_{m1}) + b_{g1}(\dot{\theta}_{g1} - \dot{\theta}_{c1}) = 0 \quad (2.16)$$

$$J_{c1}\ddot{\theta}_{c1} + K_{g1}(\theta_{c1} - \theta_{g1}) + K_{c1}(\theta_{c1} - \theta_{s1}) + b_{g1}(\dot{\theta}_{c1} - \dot{\theta}_{g1}) + b_{c1}(\dot{\theta}_{c1} - \dot{\theta}_{s1}) = 0 \quad (2.17)$$

$$J_{s1}\ddot{\theta}_{s1} + K_{c1}(\theta_{s1} - \theta_{c1}) + K_{s1}(\theta_{s1} - R_{n1}X_{s1}) + b_{c1}(\dot{\theta}_{s1} - \dot{\theta}_{c1}) + b_{s1}(\dot{\theta}_{s1} - R_{n1}\dot{X}_{s1}) = 0 \quad (2.18)$$

$$(m_{s1})\ddot{X}_{s1} + K_{s1}R_{n1}(R_{n1}X_{s1} - \theta_{s1}) + K_{r1}X_{s1} + K_{t1}(X_{s1} - X_{t1}) + b_{s1}R_{n1}(R_{n1}\dot{X}_{s1} - \dot{\theta}_{s1}) \\ b_{r1}\dot{X}_{s1} + b_{t1}(\dot{X}_{s1} - \dot{X}_{t1}) \quad (2.19)$$

$$(m_{t1})\ddot{X}_{t1} + K_{t1}(X_{t1} - X_{s1}) + b_{t1}(\dot{X}_{s1} - \dot{X}_{t1}) + b_{t1}(\dot{X}_{t1} - \dot{X}_{s1}) + F_{s1} = 0 \quad (2.20)$$

Cada ecuación representa una componente del sistema mecánico, las 6 ecuaciones muestran el modelo para un solo eje, así que puede generalizarse para los 3, ya que tienen la misma forma de funcionamiento. Incluyendo el modelo de fricción propuesto [13] el cual incluye la fricción de coulomb, la fricción viscosa y el efecto stibek

$$F_{s1} = \tau_{fs1} + k_c \text{signo}(\dot{X}_{t1}) + b_1 \dot{X}_{t1} \quad (2.21)$$

Donde:

$$\tau_{fs1} = \frac{1}{4}S_{t11} \left[\text{signo}(\dot{X}_{t1}) + 1 \right] \left[1 + \tanh(k_1(\dot{X}_{t1} + S_{h12})) \right] \\ - \frac{1}{4}S_{t11} \left[1 - \text{signo}(\dot{X}_{t1}) \right] \left[1 - \tanh(k_1(\dot{X}_{t1} - S_{h11})) \right] \quad (2.22)$$

2.2.3. Análisis 3 ejes

Para hacer el análisis de los 3 ejes, se sigue el mismo procedimiento que para el de un eje, En las siguientes tablas, se muestran las constantes de los ejes del robot y las variables de los ejes, el sufijo $i = 1, 2, 3$ el cual corresponde a cada eje.

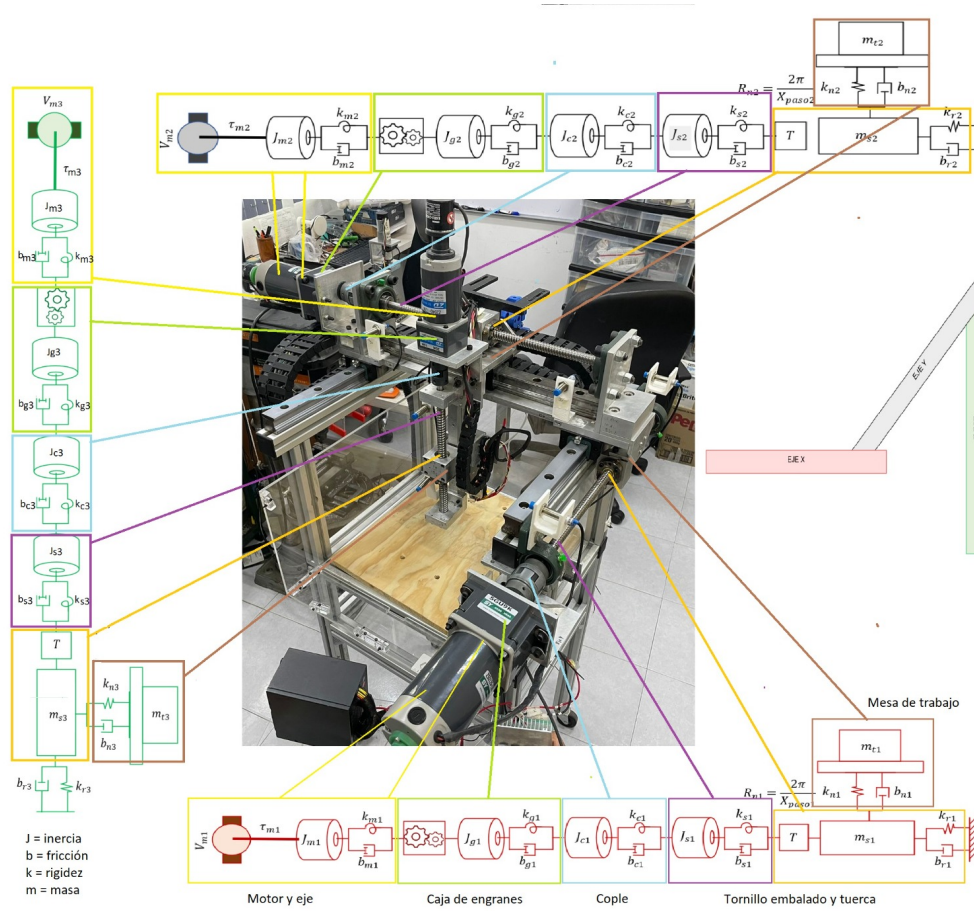


Figura 2.10: Estructura, 3 grados de libertad.

Símbolo	Significado y Unidades
K_{mi}	Rigidez del eje del motor [Nm/rad]
K_{gi}	Rigidez del mecanismo de la caja de engranes [Nm/rad]
K_{ci}	Rigidez del cople [Nm/rad]
K_{si}	Rigidez torsional del tornillo embalado [N/m]
K_{ri}	Rigidez axial del tornillo embalado [Nm/rad]
K_{ni}	Rigidez de la unión entre la tuerca y la mesa de trabajo [Nm/rad]
b_{mi}	Coefficiente de fricción del eje del motor [Nms/rad]
b_{gi}	Coefficiente de fricción de la caja de engranes [Nms/rad]
b_{ci}	Coefficiente de fricción del cople [Nms/rad]
b_{si}	Coefficiente de fricción torsional del tornillo embalado [Nms/rad]
b_{ni}	Coefficiente de fricción de la mesa de trabajo [Nm/s]
b_{ri}	Coefficiente de fricción axial del tornillo embalado [Nm/s]
J_{mi}	Inercia del motor [kgm^2]
J_{gi}	Inercia de la caja de engranes [kgm^2]
J_{ci}	Inercia del cople [kgm^2]
J_{si}	Inercia del tornillo embalado [kgm^2]
m_{si}	Masa del tornillo embalado y la tuerca [m]
m_{ti}	Masa de la mesa de trabajo [m]

Tabla 2.1: Constantes de los ejes del robot

Símbolo	Definición
θ_{mi}	Posición angular del eje del motor
θ_{gi}	Posición angular del eje de la caja de engranes
θ_{ci}	Posición angular del cople
θ_{si}	Posición angular del tornillo embalado
X_{si}	Posición axial del tornillo embalado
X_{ti}	Posición axial de la mesa de trabajo
$\dot{\theta}_{mi}$	Velocidad angular del motor
$\dot{\theta}_{gi}$	Velocidad angular de la caja de engranes
$\dot{\theta}_{ci}$	Velocidad angular del cople
$\dot{\theta}_{si}$	Velocidad angular del tornillo embalado
\dot{X}_{si}	Velocidad Axial del Tornillo embalado
\dot{X}_{ti}	Velocidad Axial de la mesa de trabajo

Tabla 2.2: Variables de los ejes del robot

Como se hizo para el primer eje, planteamos el movimiento para cada uno de los

Ejes.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{s1} + x_{xt1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{s1} + x_{xt1} \\ x_{s2} + x_{xt2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{s1} + x_{xt1} \\ x_{s2} + x_{xt2} \\ x_{s3} + x_{xt3} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

De forma particular las ecuaciones de energía quedan de la siguiente manera:

$$K_i(\varphi_i, \dot{\varphi}_i) = \frac{1}{2}J_{mi}\dot{\theta}_{mi}^2 + \frac{1}{2}J_{gi}\dot{\theta}_{gi}^2 + \frac{1}{2}J_{ci}\dot{\theta}_{ci}^2 + \frac{1}{2}J_{si}\dot{\theta}_{si}^2 + \frac{1}{2}m_{si}(\dot{X}_{si}^2) + \frac{1}{2}m_{ti}(\dot{X}_{ti}^2) \quad (2.24)$$

$$U_i(\varphi_i) = \frac{1}{2}K_{mi}(\theta_{mi} - G_i\theta_{gi})^2 + \frac{1}{2}K_{gi}(\theta_{gi} - \theta_{ci})^2 + \frac{1}{2}K_{ci}(\theta_{ci} - \theta_{si})^2 + \frac{1}{2}K_{si}(\theta_{si} - R_{ni}X_{si})^2 + \frac{1}{2}k_{ri}X_{si}^2 + \frac{1}{2}k_{ti}(X_{si} - X_{ti})^2 \quad (2.25)$$

$$\mathcal{D}_i(\varphi_i, \dot{\varphi}_i) = \frac{1}{2}b_{mi}(\dot{\theta}_{mi} - G_i\dot{\theta}_{gi})^2 + \frac{1}{2}b_{gi}(\dot{\theta}_{gi} - \dot{\theta}_{ci})^2 + \frac{1}{2}b_{ci}(\dot{\theta}_{ci} - \dot{\theta}_{si})^2 + \frac{1}{2}b_{si}(\dot{\theta}_{si} - R_{ni}\dot{X}_{si})^2 + \frac{1}{2}b_{ri}\dot{X}_{si}^2 + \frac{1}{2}b_{ti}(\dot{X}_{si} - \dot{X}_{ti})^2 \quad (2.26)$$

$$\delta\mathcal{W}_i(\varphi_i) = \tau_{mi}\delta\theta_{mi} \quad ; \quad ; \quad ; \quad (2.27)$$

Entonces las energías totales del sistema están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\mathcal{K}_T(\varphi_T, \dot{\varphi}_T) = \mathcal{K}_1(\varphi_1, \dot{\varphi}_1) + \mathcal{K}_2(\varphi_2, \dot{\varphi}_2) + \mathcal{K}_3(\varphi_3, \dot{\varphi}_3) \quad (2.28)$$

$$\mathcal{U}_T(\varphi_T) = \mathcal{U}_1(\varphi_1) + \mathcal{U}_2(\varphi_2) + \mathcal{U}_3(\varphi_3) \quad (2.29)$$

$$\mathcal{D}_T(\varphi_T, \dot{\varphi}_T) = \mathcal{D}_1(\varphi_1, \dot{\varphi}_1) + \mathcal{D}_2(\varphi_2, \dot{\varphi}_2) + \mathcal{D}_3(\varphi_3, \dot{\varphi}_3) \quad (2.30)$$

$$\delta\mathcal{W}_T(\varphi_T) = \delta\mathcal{W}_1(\varphi_1) + \delta\mathcal{W}_2(\varphi_2) + \delta\mathcal{W}_3(\varphi_3) \quad (2.31)$$

Por lo que los vectores φ_T y $\dot{\varphi}_T$ son:

$$\varphi_T = [\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3]^T \quad (2.32)$$

$$\dot{\varphi}_T = [\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \dot{\varphi}_3]^T \quad (2.33)$$

El modelo dinámico Generalizado queda de la siguiente manera:

$$J_{mi}\ddot{\theta}_{mi} + K_{mi}(\theta_{mi} - G_i\theta_{gi}) + b_{mi}(\dot{\theta}_{mi} - G_i\dot{\theta}_{gi}) = \tau_{mi} \quad (2.34)$$

$$J_{gi}\ddot{\theta}_{gi} + K_{mi}G_i(G_i\theta_{gi} - \theta_{mi}) + K_{gi}(\theta_{gi} - \theta_{ci}) + b_{mi}G_i(G_i\dot{\theta}_{gi} - \dot{\theta}_{mi}) + b_{gi}(\dot{\theta}_{gi} - \dot{\theta}_{ci}) = 0 \quad (2.35)$$

$$J_{ci}\ddot{\theta}_{ci} + K_{gi}(\theta_{ci} - \theta_{gi}) + K_{ci}(\theta_{ci} - \theta_{si}) + b_{gi}(\dot{\theta}_{ci} - \dot{\theta}_{gi}) + b_{ci}(\dot{\theta}_{ci} - \dot{\theta}_{si}) = 0 \quad (2.36)$$

$$J_{si}\ddot{\theta}_{si} + K_{ci}(\theta_{si} - \theta_{ci}) + K_{si}(\theta_{si} - R_{ni}X_{si}) + b_{ci}(\dot{\theta}_{si} - \dot{\theta}_{ci}) + b_{si}(\dot{\theta}_{si} - R_{ni}\dot{X}_{si}) = 0 \quad (2.37)$$

$$(m_{si})\ddot{X}_{si} + K_{si}R_{ni}(R_{ni}X_{si} - \theta_{si}) + K_{ri}X_{si} + K_{ti}(X_{si} - X_{ti}) + b_{si}R_{ni}(R_{ni}\dot{X}_{si} - \dot{\theta}_{si}) + b_{ri}\dot{X}_{si} + b_{ti}(\dot{X}_{si} - \dot{X}_{ti}) \quad (2.38)$$

$$(m_{ti})\ddot{X}_{ti} + K_{ti}(X_{ti} - X_{si}) + b_{ti}(\dot{X}_{si} - \dot{X}_{ti}) + b_{ti}(\dot{X}_{ti} - \dot{X}_{si}) + F_{si} = 0 \quad (2.39)$$

Incluyendo el modelo de fricción propuesto [13] el cual incluye la fricción de coulomb, la fricción viscosa y el efecto stribeck

$$F_{si} = \tau_{f_{si}} + k_c \text{signo}(\dot{X}_{ti}) + b_i \dot{X}_{ti} \quad (2.40)$$

Donde:

$$\tau_{f_{si}} = \frac{1}{4}S_{ti1} \left[\text{signo}(\dot{X}_{ti}) + 1 \right] \left[1 + \tanh(k_i(\dot{X}_{ti} + S_{hi2})) \right] - \frac{1}{4}S_{ti2} \left[1 - \text{signo}(\dot{X}_{ti}) \right] \left[1 - \tanh(k_i(\dot{X}_{ti} - S_{hi1})) \right] \quad (2.41)$$

Cada ecuación representa a un comportamiento en específico del robot, a continuación se describe cuál es el significado de cada uno:

- La ecuación 2.34, representa el comportamiento del eje del motor, la cual representa la entrada de energía del sistema, en el torque.
- La ecuación 2.35, representa el comportamiento del eje de la caja de engranes.
- La ecuación 2.36, el cople une la caja de engranes, entonces ésta describe el comportamiento que existe entre la caja de engranes y el tornillo embalado, para este caso se considera un fenómeno lineal.
- La ecuación 2.37, representa el movimiento rotacional del tornillo embalado, mientras que la ecuación 2.38 representa el movimiento axial es por eso que aparece el término R_{ni} , el cual es la transformación del movimiento rosca-tuerca del tornillo.
- Por último la ecuación 2.39 representa el movimiento de la mesa de trabajo, la cual se encuentra acoplada al tornillo embalado y la tuerca.

Con las ecuaciones generales de energía y aplicando la ecuación de Lagrange, se obtiene el sistema de ecuaciones que describe el comportamiento de cada uno de los componentes del robot para los tres grados de libertad que nos importan en el

sistema CNC. Estos se desarrollan en las ecuaciones escritas a continuación:

$$\tau_{m1} = J_{m1}\ddot{\theta}m1 + km1(\theta_{m1} - G_1\theta_{g1}) + b_{m1}(\dot{\theta}m1 - G_1\dot{\theta}_{g1}) \quad (2.42)$$

$$0 = J_{g1}\ddot{\theta}g1 + bm1G_1(G_1\dot{\theta}g1 - \dot{\theta}m1) + k_{m1}G_1(G_1\theta_{g1} - \theta_{m1}) + k_{g1}(\theta_{g1} - \theta_{c1}) \quad (2.43)$$

$$+ b_{g1}(\dot{\theta}g1 - \dot{\theta}c1)$$

$$0 = J_{c1}\ddot{\theta}c1 + kg1(\theta_{c1} - \theta_{g1}) + k_{c1}(\theta_{c1} - \theta_{s1}) + b_{g1}(\dot{\theta}c1 - \dot{\theta}g1) + b_{c1}(\dot{\theta}c1 - \dot{\theta}s1) \quad (2.44)$$

$$0 = J_{s1}\ddot{\theta}s1 + kc1(\theta_{s1} - \theta_{c1}) + k_{s1}(\theta_{s1} - R_{n1}X_{s1}) + b_{c1}(\dot{\theta}s1 - \dot{\theta}c1) + b_{s1}(\dot{\theta}s1 - R_{n1}\dot{X}_{s1}) \quad (2.45)$$

$$0 = (m_{s1} + m_{s2} + m_{s3})\ddot{X}s1 + ks1R_{n1}(R_{n1}X_{s2} - \theta_{s1}) + k_{r1}X_{s1} + k_{t1}(X_{s1} - X_{t1}) + b_{s1}R_{n1}(R_{n1}\dot{X}s1 - \dot{\theta}s1) + b_{r1}\dot{X}s1 + bt1(\dot{X}s1 - \dot{X}t1) \quad (2.46)$$

$$0 = (m_{t1} + m_{t2} + m_{t3})\ddot{X}t1 + Kt1(X_{t1} - X_{s1}) + b_{t1}(\dot{X}t1 - \dot{X}s1) + F_{s1} \quad (2.47)$$

Ecuaciones para el eje Y

$$\tau_{m2} = J_{m2}\ddot{\theta}m2 + km2(\theta_{m2} - G_2\theta_{g2}) + b_{m2}(\dot{\theta}m2 - G_2\dot{\theta}_{g2}) \quad (2.48)$$

$$0 = J_{g2}\ddot{\theta}g2 + bm2G_2(G_2\dot{\theta}g2 - \dot{\theta}m2) + k_{m2}G_2(G_2\theta_{g2} - \theta_{m2}) + k_{g2}(\theta_{g2} - \theta_{c2}) \quad (2.49)$$

$$+ b_{g2}(\dot{\theta}g2 - \dot{\theta}c2)$$

$$0 = J_{c2}\ddot{\theta}c2 + kg2(\theta_{c2} - \theta_{g2}) + k_{c2}(\theta_{c2} - \theta_{s2}) + b_{g2}(\dot{\theta}c2 - \dot{\theta}g2) + b_{c2}(\dot{\theta}c2 - \dot{\theta}s2) \quad (2.50)$$

$$0 = J_{s2}\ddot{\theta}s2 + kc2(\theta_{s2} - \theta_{c2}) + k_{s2}(\theta_{s2} - R_{n2}X_{s2}) + b_{c2}(\dot{\theta}s2 - \dot{\theta}c2) + b_{s2}(\dot{\theta}s2 - R_{n2}\dot{X}_{s2}) \quad (2.51)$$

$$0 = (m_{s2} + m_{s3})\ddot{X}s2 + ks2R_{n2}(R_{n2}X_{s2} - \theta_{s2}) + k_{r2}X_{s2} + k_{t2}(X_{s2} - X_{t2}) + b_{s2}R_{n2}(R_{n2}\dot{X}s2 - \dot{\theta}s2) + b_{r2}\dot{X}s2 + bt2(\dot{X}s2 - \dot{X}t2) \quad (2.52)$$

$$0 = (m_{t2} + m_{t3})\ddot{X}t2 + Kt2(X_{t2} - X_{s2}) + b_{t2}(\dot{X}t2 - \dot{X}s2) + F_{s2} \quad (2.53)$$

Ecuaciones para el eje Z

$$\tau_{m3} = J_{m3}\ddot{\theta}_{m3} + km3(\theta_{m3} - G_3\theta_{g3}) + b_{m3}(\dot{\theta}_{m3} - G_3\dot{\theta}_{g3}) \quad (2.54)$$

$$0 = J_{g3}\ddot{\theta}_{g3} + bm3G_3(G_3\dot{\theta}_{g3} - \dot{\theta}_{m3}) + k_{m3}G_3(G_3\theta_{g3} - \theta_{m3}) + k_{g3}(\theta_{g3} - \theta_{c3}) \quad (2.55)$$

$$+ b_{g3}(\dot{\theta}_{g3} - \dot{\theta}_{c3})$$

$$0 = J_{c3}\ddot{\theta}_{c3} + kg3(\theta_{c3} - \theta_{g3}) + k_{c3}(\theta_{c3} - \theta_{s3}) + b_{g3}(\dot{\theta}_{c3} - \dot{\theta}_{g3}) + b_{c3}(\dot{\theta}_{c3} - \dot{\theta}_{s3}) \quad (2.56)$$

$$0 = J_{s3}\ddot{\theta}_{s3} + kc3(\theta_{s3} - \theta_{c3}) + k_{s3}(\theta_{s3} - R_{n3}X_{s3}) + b_{c3}(\dot{\theta}_{s3} - \dot{\theta}_{c3}) + b_{s3}(\dot{\theta}_{s3} - R_{n3}\dot{X}_{s3}) \quad (2.57)$$

$$0 = (m_{s3})\ddot{X}_{s3} + ks3R_{n3}(R_{n3}X_{s3} - \theta_{s3}) + k_{r3}X_{s3} + k_{t3}(X_{s3} - X_{t3}) + b_{s3}R_{n3}(R_{n3}\dot{X}_{s3} - \dot{\theta}_{s3}) + b_{r3}\dot{X}_{s3} + bt3(\dot{X}_{s3} - \dot{X}_{t3}) \quad (2.58)$$

$$0 = (m_{t3})\ddot{X}_{t3} + Kt3(X_{t3} - X_{s3}) + b_{t3}(\dot{X}_{t3} - \dot{X}_{s3}) + F_{s3} \quad (2.59)$$

2.2.4. Representación en espacio de estados

Para hacer la representación se toman en consideración las ecuaciones 2.34, 2.35, 2.36, 2.37, 2.38, 2.39, al tener los ejes la misma composición se muestra para el eje X

Elemento	Variable de estado
Motor	$x_1 = \theta_{m1}$ Posición Eje motor. $x_2 = \dot{\theta}_{m1}$ Velocidad Eje motor
Caja de Engranajes	$x_3 = \theta_{g1}$ Posición Caja engranes. $x_4 = \dot{\theta}_{g1}$ Velocidad caja engranes
Cople	$x_5 = \theta_{c1}$ Posición Cople. $x_6 = \dot{\theta}_{c1}$ Velocidad Cople
Tornillo embalado	$x_7 = \theta_{s1}$ Posición Tornillo embalado. $x_8 = \dot{\theta}_{s1}$ Velocidad Tornillo embalado
Movimiento axial rosca Tuerca	$x_9 = X_{s1}$ Posición $x_{10} = \dot{X}_{s1}$ Velocidad Rosca Tuerca
Mesa de Trabajo	$x_{11} = X_{t1}$ Posición Mesa Trabajo. $x_{12} = \dot{X}_{t1}$ Velocidad Mesa de trabajo

Tabla 2.3: Variables de estado

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2.60)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{U(t)}{J_{m1}} - \frac{K_{m1}}{J_{m1}}x_1 + \frac{K_{m1}}{J_{m1}}x_3 - \frac{b_{m1}}{J_{m1}}x_2 + \frac{b_{m1}G_1}{J_{m1}}x_4 \quad (2.61)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \quad (2.62)$$

$$\dot{x}_4 = x_1 \frac{K_{m1}G_1}{J_{g1}} + x_2 \frac{b_{m1}G_1}{J_{g1}} - x_3 \frac{(+K_{m1}G_1^2 + K_{g1})}{J_{g1}} - x_4 \frac{(+b_{m1}G_1^2 + b_{g1})}{J_{g1}} + x_5 \frac{K_{g1}}{J_{g1}} + x_6 \frac{b_{g1}}{J_{g1}} \quad (2.63)$$

$$\dot{x}_5 = x_6 \quad (2.64)$$

$$\dot{x}_6 = x_3 \frac{K_{g1}}{J_{c1}} + x_4 \frac{b_{g1}}{J_{c1}} - x_5 \frac{(K_{g1} + K_{c1})}{J_{c1}} - x_6 \frac{(b_{g1} + b_{c1})}{J_{c1}} + x_7 \frac{K_{c1}}{J_{c1}} + x_8 \frac{b_{c1}}{J_{c1}} \quad (2.65)$$

$$\dot{x}_7 = x_8 \quad (2.66)$$

$$\dot{x}_8 = x_5 \frac{K_{c1}}{J_{s1}} + x_6 \frac{b_{c1}}{J_{s1}} - x_7 \frac{(+K_{c1} + K_{s1})}{J_{s1}} - x_8 \frac{(b_{c1}b_{s1})}{J_{s1}} + x_9 \frac{R_{n1}K_{s1}}{J_{s1}} + x_{10} \frac{R_{n1}b_{s1}}{J_{s1}} \quad (2.67)$$

$$\dot{x}_9 = x_{10} \quad (2.68)$$

$$\dot{x}_{10} = x_7 \frac{R_{n1}K_{s1}}{m_{s1}} + x_8 \frac{R_{n1}b_{s1}}{m_{s1}} - x_9 \frac{(K_{s1}R_{n1}^2 + K_{r1} + K_{t1})}{m_{s1}} - x_{10} \frac{(b_{s1}R_{n1}^2 + b_{r1} + b_{t1})}{m_{s1}} + x_{11} \frac{K_{t1}}{m_{s1}} \quad (2.69)$$

$$+ x_{12} \frac{b_{t1}}{m_{s1}} \quad (2.70)$$

$$\dot{x}_{12} = x_9 \frac{K_{t1}}{m_{t1}} - x_{11} \frac{K_{t1}}{m_{t1}} + x_{10} \frac{b_{t1}}{m_{t1}} - x_{12} \frac{b_{t1}}{m_{t1}} - \left[\frac{\frac{1}{4}S_{t11} [\text{signo}(X_{12}) + 1] [1 + \tanh(k_1(X_{12} + S_{h12}))]}{m_{t1}} \right] \quad (2.71)$$

$$+ \left[\frac{\frac{1}{4}S_{t12} [1 - \text{signo}(X_{12})] [1 - \tanh(k_1(X_{12} - S_{h11}))]}{m_{t1}} \right] - \frac{k_c \text{signo}(X_{12})}{m_{t1}} - \frac{b_1 X_{12}}{m_{t1}}$$

Realizando para eje Y y Z.

$$\begin{aligned} x_{13} &= \theta_{m2}, & x_{14} &= \dot{\theta}_{m2}, & x_{15} &= \theta_{g2}, & x_{16} &= \dot{\theta}_{g2}, & x_{17} &= \theta_{c2}, & x_{18} &= \dot{\theta}_{c2}, & x_{19} &= \theta_{s2}, \\ x_{20} &= \dot{\theta}_{s2}, & x_{21} &= X_{s2}, & x_{22} &= \dot{X}_{s2}, & x_{23} &= X_{t2}, & x_{24} &= \dot{X}_{t2}, & x_{25} &= \theta_{m3}, & x_{26} &= \dot{\theta}_{m3}, \\ x_{27} &= \theta_{g3}, & x_{28} &= \dot{\theta}_{g3}, & x_{29} &= \theta_{c3}, & x_{30} &= \dot{\theta}_{c3}, & x_{31} &= \theta_{s3}, & x_{32} &= \dot{\theta}_{s3}, & x_{33} &= X_{s3}, & x_{34} &= \dot{X}_{s3}, \\ x_{35} &= X_{t3}, & x_{36} &= \dot{X}_{t3} \end{aligned}$$

$$\dot{x}_{13} = x_{14} \quad (2.72)$$

$$\dot{x}_{14} = \frac{U(t)}{J_{m2}} - \frac{K_{m2}}{J_{m2}} x_{13} + \frac{K_{m2}}{J_{m2}} x_{15} - \frac{b_{m2}}{J_{m2}} x_{14} + \frac{b_{m2}G_2}{J_{m2}} x_{16} \quad (2.73)$$

$$\dot{x}_{15} = x_{16} \quad (2.74)$$

$$\dot{x}_{16} = x_{13} \frac{K_{m2}G_2}{J_{g2}} + x_{14} \frac{b_{m2}G_2}{J_{g2}} - x_{15} \frac{(+K_{m2}G_2^2 + K_{g2})}{J_{g2}} - x_{16} \frac{(+b_{m2}G_1^2 + b_{g2})}{J_{g2}} + x_{17} \frac{K_{g2}}{J_{g2}} + x_{18} \frac{b_{g1}}{J_{g1}} \quad (2.75)$$

$$\dot{x}_{17} = x_{18} \quad (2.76)$$

$$\dot{x}_{18} = x_{15} \frac{K_{g2}}{J_{c2}} + x_{16} \frac{b_{g2}}{J_{c2}} - x_{17} \frac{(K_{g2} + K_{c2})}{J_{c2}} - x_{18} \frac{(b_{g2} + b_{c2})}{J_{c2}} + x_{19} \frac{K_{c2}}{J_{c2}} + x_{20} \frac{b_{c2}}{J_{c2}} \quad (2.77)$$

$$\dot{x}_{19} = x_{20} \quad (2.78)$$

$$\dot{x}_{20} = x_{17} \frac{K_{c2}}{J_{s2}} + x_{18} \frac{b_{c2}}{J_{s2}} - x_{19} \frac{(+K_{c2} + K_{s2})}{J_{s2}} - x_{20} \frac{(b_{c2}b_{s2})}{J_{s2}} + x_{21} \frac{R_{n2}K_{s2}}{J_{s2}} + x_{22} \frac{R_{n2}b_{s2}}{J_{s2}} \quad (2.79)$$

$$\dot{x}_{21} = x_{22} \quad (2.80)$$

$$\dot{x}_{22} = x_{19} \frac{R_{n2}K_{s2}}{m_{s2}} + x_{20} \frac{R_{n2}b_{s2}}{m_{s2}} - x_{21} \frac{(K_{s2}R_{n2}^2 + K_{r2} + K_{t2})}{m_{s2}} - x_{22} \frac{(b_{s2}R_{n2}^2 + b_{r2} + b_{t2})}{m_{s2}} + x_{23} \frac{K_{t2}}{m_{s2}} \quad (2.81)$$

$$+ x_{24} \frac{b_{t2}}{m_{s2}} \quad (2.82)$$

$$\dot{x}_{23} = x_{24} \quad (2.83)$$

$$\dot{x}_{24} = x_{21} \frac{K_{t2}}{m_{t2}} - x_{23} \frac{K_{t2}}{m_{t2}} + x_{22} \frac{b_{t2}}{m_{t2}} - x_{24} \frac{b_{t2}}{m_{t2}} - \left[\frac{\frac{1}{4}S_{t21} [\text{signo}(X_{24}) + 1] [1 + \tanh(k_2(X_{24} + S_{h22}))]}{m_{t2}} \right]$$

$$+ \left[\frac{\frac{1}{4}S_{t22} [1 - \text{signo}(X_{24})] [1 - \tanh(k_2(X_{24} - S_{h21}))]}{m_{t2}} \right] - \frac{k_c \text{signo}(X_{24})}{m_{t2}} - \frac{b_2 X_{24}}{m_{t2}}$$

$$\dot{x}_{25} = x_{26} \quad (2.84)$$

$$\dot{x}_{26} = \frac{U(t)}{J_{m3}} - \frac{K_{m3}}{J_{m3}} x_{25} + \frac{K_{m3}}{J_{m3}} x_{27} - \frac{b_{m3}}{J_{m3}} x_{26} + \frac{b_{m3}G_3}{J_{m3}} x_{28} \quad (2.85)$$

$$\dot{x}_{27} = x_{28} \quad (2.86)$$

$$\dot{x}_{28} = x_{25} \frac{K_{m3}G_3}{J_{g3}} + x_{26} \frac{b_{m3}G_3}{J_{g3}} - x_{27} \frac{(+K_{m3}G_3^2 + K_{g3})}{J_{g3}} - x_{28} \frac{(+b_{m3}G_3^2 + b_{g3})}{J_{g3}} + x_{29} \frac{K_{g3}}{J_{g3}} + x_{30} \frac{b_{g3}}{J_{g3}} \quad (2.87)$$

$$\dot{x}_{29} = x_{30} \quad (2.88)$$

$$\dot{x}_{30} = x_{27} \frac{K_{g3}}{J_{c3}} + x_{28} \frac{b_{g3}}{J_{c3}} - x_{29} \frac{(K_{g3} + K_{c3})}{J_{c3}} - x_{30} \frac{(b_{g3} + b_{c3})}{J_{c3}} + x_{31} \frac{K_{c3}}{J_{c3}} + x_{32} \frac{b_{c3}}{J_{c3}} \quad (2.89)$$

$$\dot{x}_{31} = x_{32} \quad (2.90)$$

$$\dot{x}_{32} = x_{29} \frac{K_{c3}}{J_{s3}} + x_{30} \frac{b_{c3}}{J_{s3}} - x_{31} \frac{(+K_{c3} + K_{s3})}{J_{s3}} - x_{32} \frac{(b_{c3}b_{s3})}{J_{s3}} + x_{33} \frac{R_{n3}K_{s3}}{J_{s3}} + x_{34} \frac{R_{n3}b_{s3}}{J_{s3}} \quad (2.91)$$

$$\dot{x}_{33} = x_{34} \quad (2.92)$$

$$\dot{x}_{34} = x_{31} \frac{R_{n3} K_{s3}}{m_{s3}} + x_{32} \frac{R_{n3} b_{s3}}{m_{s3}} - x_{33} \frac{(K_{s3} R_{n3}^2 + K_{r3} + K_{t3})}{m_{s3}} - x_{34} \frac{(b_{s3} R_{n3}^2 + b_{r3} + b_{t3})}{m_{s3}} + x_{35} \frac{K_{t3}}{m_{s3}} + x_{36} \frac{b_{t3}}{m_{s3}} \quad (2.93)$$

$$\dot{x}_{35} = x_{36} \quad (2.94)$$

$$\dot{x}_{36} = x_{33} \frac{K_{t3}}{m_{t3}} - x_{35} \frac{K_{t3}}{m_{t3}} + x_{34} \frac{b_{t3}}{m_{t3}} - x_{36} \frac{b_{t3}}{m_{t3}} - \left[\frac{\frac{1}{4} S_{t31} [\text{signo}(X_{36}) + 1] [1 + \tanh(k_3(X_{36} + S_{h32}))]}{m_{t3}} \right] + \left[\frac{\frac{1}{4} S_{t32} [1 - \text{signo}(X_{36})] [1 - \tanh(k_3(X_{36} - S_{h31}))]}{m_{t3}} - \frac{k_c \text{signo}(X_{36})}{m_{t3}} - \frac{b_3 X_{36}}{m_{t3}} \right] \quad (2.95)$$

Otro punto para tomar en cuenta en la obtención del modelo dinámico es que con las ecuaciones obtenidas del mismo es posible implementar simulaciones en diversos software matemáticos, siendo el de elección para el proyecto el software de MATLAB, el cual permite, con el uso de programación, obtener gráficas de respuesta del sistema ante diversos tipos de entrada, lo que resulta útil en el análisis del sistema. Esto se realiza planteando las ecuaciones como una ODE y resolviéndola con el método numérico de Runge-Kutta 4/5. Con la solución numérica, se obtiene el comportamiento de cualquiera de las variables que resulte de interés, lo que implica que podemos graficar, compararlas o incluso procesarlas para obtener el comportamiento de otras variables. Se debe recordar que la entrada de nuestros motores será un PWM de periodo variable, por lo que resulta conveniente analizar la respuesta del sistema ante una entrada tipo escalón y comparar los resultados con el comportamiento de las señales obtenidas en los experimentos. Con esto es posible comparar las respuestas (simulada y real) y determinar si el planteamiento del modelo es adecuado para el tipo de estudio que se lleva a cabo. Para poder llevar a cabo las simulaciones es necesario darle valores a cada uno de los parámetros estos se consultaron en [10] con los siguientes valores.

Símbolo	Valor	Símbolo	Valor
K_{m1}	1500 Nm/rad	b_{s2}	$5.1e^{-3}$ Nms/rad
K_{g1}	1318.76 Nm/rad	b_{n2}	$2.3e^{-1}$ Nm/s
K_{c1}	1162.45 Nm/rad	b_{r2}	$2.1e^{-1}$ Nm/s
K_{s1}	8028.13 Nm/rad	J_{m2}	$1.4562e^{-6}$ kgm ²
K_{r1}	9500.84 Nm/rad	J_{g2}	$0.9586e^{-6}$ kgm ²
K_{n1}	95500.51 Nm/rad	J_{c2}	$1.8694e^{-6}$ kgm ²
b_{m1}	$1.8e^{-3}$ Nms/rad	J_{s2}	$4.9521e^{-6}$ kgm ²
b_{g1}	$2.5e^{-3}$ Nms/rad	m_{s2}	0.25 kg
b_{c1}	$5.4e^{-3}$ Nms/rad	m_{t2}	26 kg
b_{s1}	$5.1e^{-3}$ Nms/rad	K_{m1}	1300 Nm/rad
b_{n1}	$2.3e^{-1}$ Nm/s	K_{g2}	1127.49 Nm/rad
b_{r1}	$2.1e^{-1}$ Nm/s	K_{c2}	5228.87 Nm/rad
J_{m1}	$1.9655e^{-3}$ kgm ²	K_{s2}	80282.13 Nm/rad
J_{g1}	$1.3514e^{-3}$ kgm ²	K_{r2}	1242.65 Nm/rad
J_{c1}	$2.0255e^{-3}$ kgm ²	K_{n2}	95176.5184 Nm/rad
J_{s1}	$5.5576e^{-3}$ kgm ²	b_{m2}	$2.3e^{-3}$ Nms/rad
m_{s1}	0.3 kg	b_{g2}	$2.8e^{-3}$ Nms/rad
m_{t1}	48 kg	b_{c2}	$5.4e^{-3}$ Nms/rad
K_{m2}	1500 Nm/rad	b_{s2}	$5.1e^{-3}$ Nms/rad
K_{g2}	1320.48 Nm/rad	b_{n2}	$2.3e^{-3}$ Nm/s
K_{c2}	1543.15 Nm/rad	b_{r2}	$2.1e^{-3}$ Nm/s
K_{s2}	8191.62 Nm/rad	J_{m2}	$1.1263e^{-6}$ kgm ²
K_{r2}	9360.13 Nm/rad	J_{g2}	$0.8569e^{-6}$ kgm ²
K_{n2}	94260.18 Nm/rad	J_{c2}	$1.4598e^{-6}$ kgm ²
b_{m2}	$5.4e^{-3}$ Nms/rad	J_{s2}	$3.8954e^{-6}$ kgm ²
b_{g2}	$1.9e^{-3}$ Nms/rad	m_{s2}	0.3 kg
b_{c2}	$5.4e^{-3}$ Nms/rad	m_{t2}	2.5 kg

Figura 2.11: Parámetros dinámicos.

Capítulo 3

Hardware

3.1. Componente sistema Palpador

Un palpador es la parte del sistema de medida que hace contacto con el objeto a medir, haciendo que se desplace el mecanismo de la sonda. La señal generada permite que se tome la medida. El tipo y el tamaño del palpador se determinan en función de la característica a medir. No obstante, en todos los casos, es vital que el palpador tenga una rigidez máxima y una esfericidad perfecta. Una medición correcta depende en gran parte de la capacidad del palpador de la sonda para acceder a la pieza y, posteriormente, de la forma en que mantiene la precisión en el punto de contacto. [14]. Los palpadores son sensores muy empleados en la industria, estos miden la distancia, posición lineal, desplazamiento lineal con una gran resolución, se fabrican en diferentes tecnologías, que ofrecen formato, rangos y tipos de señal diferente bien sea analógico o digital, El sistema palpador es el centro de la máquina de medición y el resultado de las mediciones que se toman dependen en gran parte de las características metrológicas del tipo de palpador que se utiliza. Una medición correcta depende en gran parte de la capacidad del palpador y posteriormente en la forma que mantiene la posición en el punto de contacto.

Los palpadores se pueden clasificar en su tipo de funcionamiento

- Pasivos: Constituidos por elementos rígidos que se pueden deformar, este tipo de palpador se tiene que llevar para que tenga contacto con la pieza en el punto que se quiere medir.
- Trigger: Dan una señal eléctrica on/off al entrar en contacto con la pieza, genera una señal eléctrica que sirve para memorizar las coordenadas.
- Proporcional: tiene una salida analógica proporcional al desplazamiento que se tiene.
- Sin contacto: Funcionan con luz.

También pueden ser clasificados acuerdo a su configuración:

- Palpador articulado: este tipo de palpador además de la herramienta cuenta con una rótula que se puede orientar en diferentes posiciones

- **Palpador múltiple:** cuenta con múltiples palpadores para realizar escaneado de piezas más sofisticadas.

Independientemente de la tecnología, lo que comparten los palpadores es su forma física.

- **Cuerpo:** se introduce un vástago el cual está sometido a la fuerza de retorno de un muelle. Con este tipo de mecánico el palpador tiene al vástago siempre extendido y hay que presionar el vástago para romper la fuerza de retorno del muelle.
- **Aguja del palpador:** normalmente fabricada en acero, cerámica o carbono. Permite realizar el movimiento del vástago
- **Punta:** es la parte del palpador que se encarga tocar a la pieza.

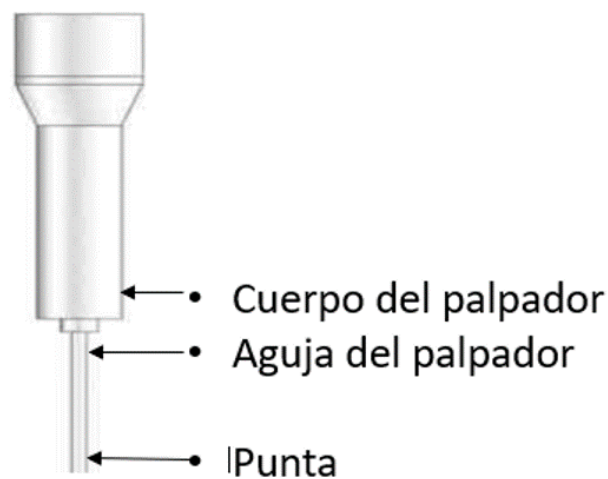


Figura 3.1: Partes de un palpador.

El movimiento que va a realizar el robot cartesiano en conjunto, con el palpador se muestra en la Figura 3.2, consiste en ir moviéndose a lo largo del eje X,Y, para posicionar nuestro palpador, el movimiento se realiza hasta cada $100\mu m$ en estos ejes, una vez posicionado, el eje z debe bajar hasta tener contacto con la pieza a analizar, como se va a analizar en muchos puntos se va a tener muchos datos con la posición donde se realizó la medición. Podemos observar en la figura que avanza, realiza la medición con el palpador y guarda la información.

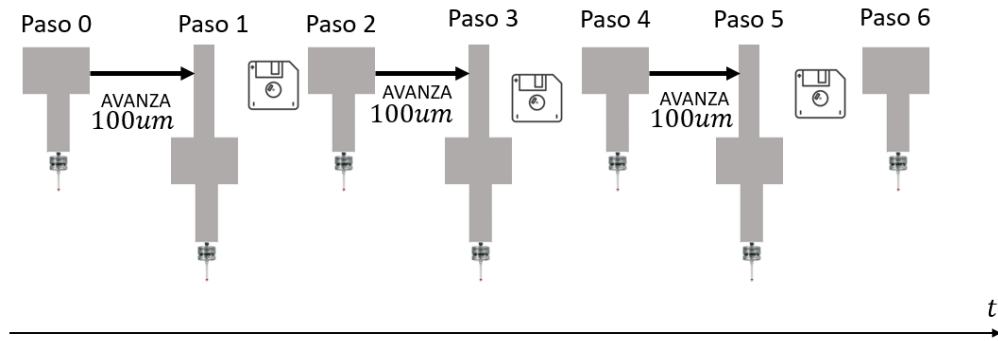


Figura 3.2: Movimiento del Robot Cartesiano.

Al poder avanzar hasta $100\mu\text{m}$, el número de muestras es bastante, si tomamos una recta de 1 cm , tenemos 100 muestras tomadas con una resolución de $100\text{ }\mu\text{m}$ por muestra. Teniendo en cuenta esta relación, si colocamos una superficie, para poder calcular el número de muestras, que se van a obtener al escanear, está dada por la siguiente ecuación.

$$N_{muestras} = \frac{\Delta x}{R} \frac{\Delta y}{R} \quad (3.1)$$

Donde R es la resolución o el paso en el que va a ir avanzando el sistema palpador, por ejemplo en la Figura 3.3, si tomamos $\Delta x = 20\text{ cm}$ y $\Delta y = 25\text{ cm}$. utilizando la ecuación 3.1, tenemos que:

$$N_{muestras} = \left(\frac{200\text{ mm}}{0.1\text{ m}} \right) \left(\frac{250\text{ mm}}{0.1\text{ m}} \right) = 5000000 \quad (3.2)$$

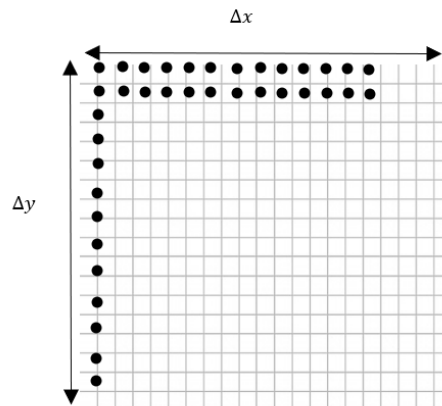


Figura 3.3: Dimensiones de un cuadro tallado en madera.

Debido a que el número de muestras es demasiado alto, es necesario guardar y transmitir bien la información al PC, es por eso que se va a tratar de implementar un protocolo de comunicación distinto al wifi, para no tener pérdidas de información.

Algoritmo de Control

Para que el sistema palpador funcione de una manera eficiente, es necesario tener un buen controlador, así que primero se harán pruebas para corregir el efecto de cuantificación, ya que realizar esta corrección podemos obtener la velocidad de una manera más precisa, es necesario, ya que el sistema va a estar en reposo y después debe avanzar $100\mu m$, al ser una distancia demasiado pequeña se debe vencer la fricción estática, es por eso que también se deben realizar pruebas para compensar la fricción, ya se tienen datos para compensar fricción así que se deben estudiar y hacer pruebas en el sistema palpador. El robot ya cuenta con un controlador, sin embargo, se debe mejorar o cambiarlo, sintonizando un nuevo algoritmo de control que permita avanzar hasta $100\mu m$ partiendo de un estado de reposo.

Tipos de palpadores

De acuerdo a la pieza que se vaya a realizar su escaneado se tienen distintas puntas de palpado, entre las más importantes del mercado son las siguientes:

- Palpadores rectos: es el palpador utilizado con más frecuencia, estos palpadores son adecuados para la mayoría de las aplicaciones de inspección. Figura 3.11



Figura 3.4: Palpador Recto.

- Palpadores de Punta: No deben utilizarse para inspecciones XY convencionales, ya que han sido diseñados para medir formas roscadas, puntos específicos y líneas trazadas (a precisión inferior). Figura 3.74



Figura 3.5: Palpador de punta.

- Palpador Cilíndrico: Se utilizan para inspeccionar láminas metálicas, componentes prensados y piezas de trabajo delgadas cuyo punto de contacto correcto no puede garantizarse con palpadores de bola. Además, es posible palpar diversos elementos roscados y determinar los centros de sus agujeros. Mediante el palpador cilíndrico terminado en bola es posible indicar el plano de referencia completo y palpar en las direcciones X, Y y Z, permitiendo, de este modo, realizar una inspección de la superficie.



Figura 3.6: Palpador Cilíndrico.

3.1.1. Elección de palpador

Como primera vista se eligió un palpador recto, al ser necesario escanear una superficie con precisión y no dañar la pieza a escanear. Figura 3.15, es un palpador comercial, el cual al tocar la superficie cierra un circuito interno y manda una señal en alto. Existen muchos palpadores comerciales, muchas empresas se dedican a vender este tipo de herramientas, como lo es la empresa TESA la cual vende herramientas Industriales, entre las herramientas que se vende son los palpadores, esta herramienta tiene dos características principales el tamaño de la punta que significa cuanta área va a sensor y la distancia que este recorre para activar y detectar el sensado, entre más pequeño sea esa distancia y el tamaño de la varilla de medición, el precio aumenta considerablemente. En la Figura 3.7 vemos un palpador vendido por la empresa TESA, este tiene una precisión de 0.2 mm y $\Delta L = 4mm$, el precio en México aproximado es de 15000 pesos.



Figura 3.7: Palpador Comercial de Precisión.



Figura 3.8: Vista preliminar Palpador.

El palpador comercial funciona y manda una señal en alto, cuando es presionado, este es un poco rígido al palpar, además de que se mueve en otras direcciones como se muestra en la figura 3.9, que no es un movimiento recto.



Figura 3.9: Movimiento de la punta en el palpador.

3.1.2. Prototipo palpador

Una solución para evitar el movimiento que hace el mecanismo del palpador comercial, es diseñar uno tal que solo se mueva en un solo sentido, el diseño se muestra en la figura 3.10

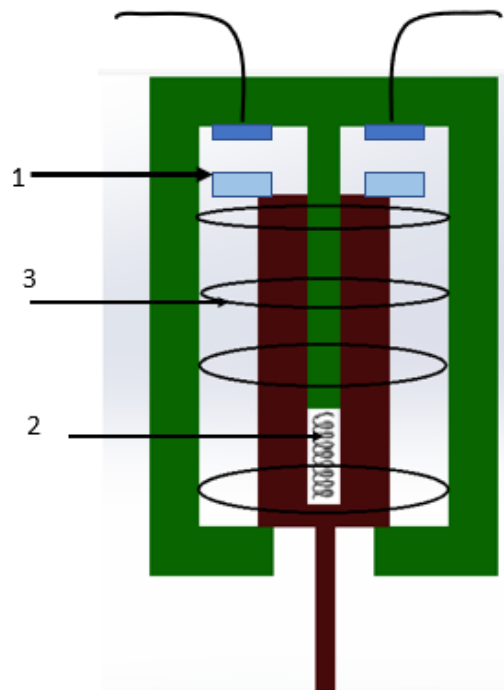


Figura 3.10: Dibujo del palpador.

Podemos ver en el dibujo del diseño que cuenta con 3 partes importantes para que funcione como palpador.

1. Esta parte consiste en dos placas, cuando el sistema sube, esta se tocan cerrando el sistema, se basa en un interruptor Normalmente abierto.

2. Es un resorte el cual sirve para subir y bajar la pieza de color café, y accionar las placas metálicas.
3. Son rodamientos lineales, para que la pieza en color café pueda subir y bajar, sin ningún problema.

3.1.3. Diseño del palpador

Para que el palpador funcione de la mejor manera se deben tener en consideración los siguientes elementos para que funcione de la mejor manera.

- Carcasa para meter todo el mecanismo
- Flecha: es la pieza principal, ya que esta se mueve de forma vertical.
- Seguro: delimita el movimiento del buje
- Balero lineal: para permitir el movimiento del buje, y este se mueve de forma lineal.
- Resorte: el cual hace que el palpador regrese a su posición inicial una vez realizado la medición

Para realizar todo el diseño se empleó un software CAD. El tamaño del palpador parte del tamaño de los baleros a implementar, en este caso son 2 baleros, con matrícula LM8UU



Figura 3.11: Rodamiento Lineal.

La siguiente pieza es la "carcasa", esta requiere de 3 características principales.

- Debe ajustar al tamaño del balero 15 mm
- Una ranura para colocar el seguro omega y los baleros no sobrepasen esa área,
- Una pequeña saliente para hacer regresar el buje con el resorte.

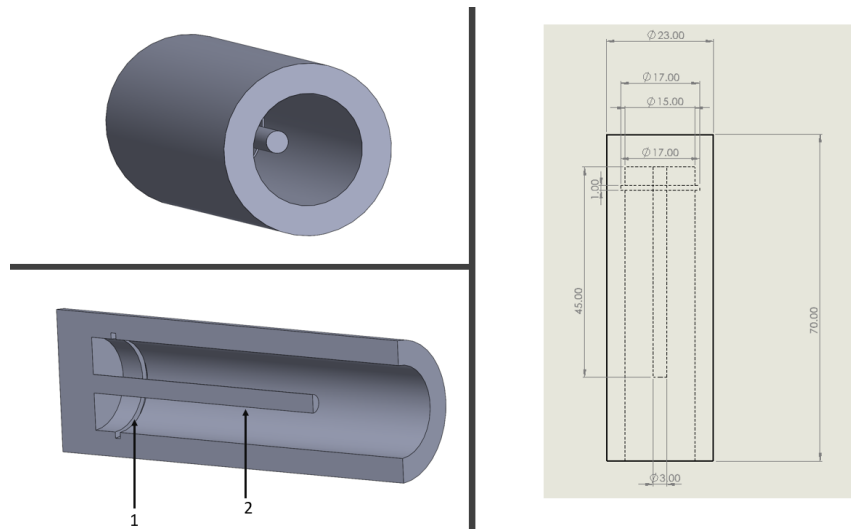


Figura 3.12: Pieza base herramienta palpador.



Figura 3.13: Seguro Omega.

En la figura 3.74 el elemento uno sirve para introducir el seguro, este seguro es de tipo omega comercial (Figura 3.13), en cuanto al elemento dos ese se encarga de regresar al buje con el resorte

La pieza 2 es la flecha, este se encarga de subir y bajar por todos los baleros. El número 3 entra la parte 2 de la pieza base del palpador, mientras que el número 4, es la punta que se encarga de tocar la pieza. Se debe tener en cuenta que debe haber un espacio para que el resorte puede moverse.

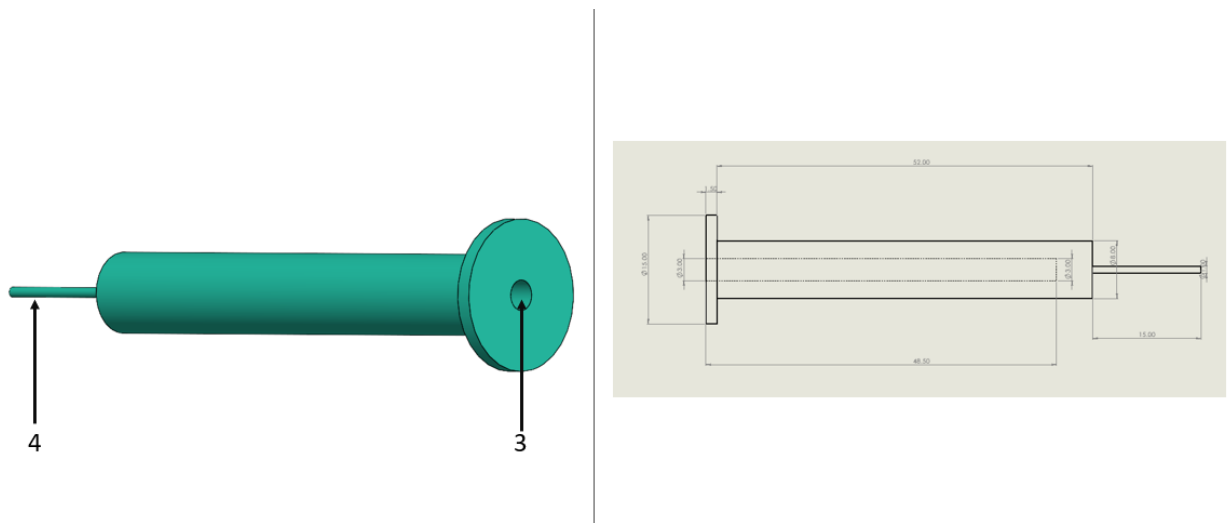


Figura 3.14: Flecha para palpador.

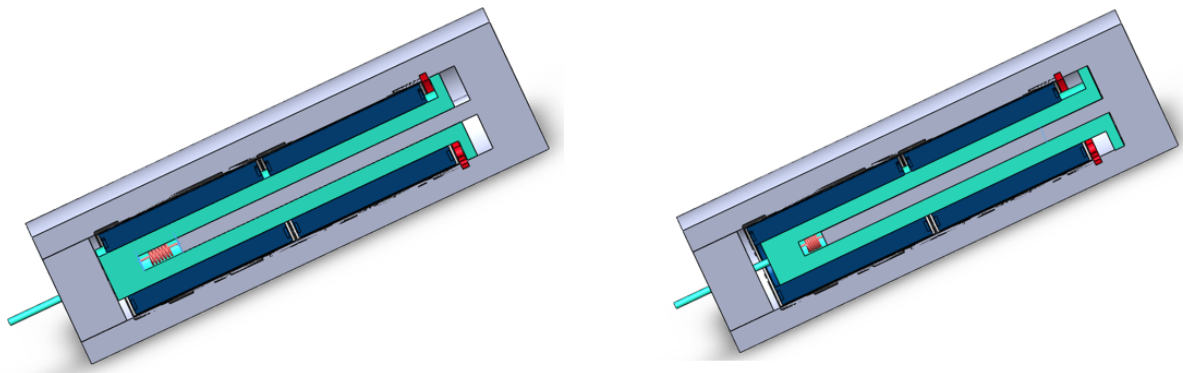
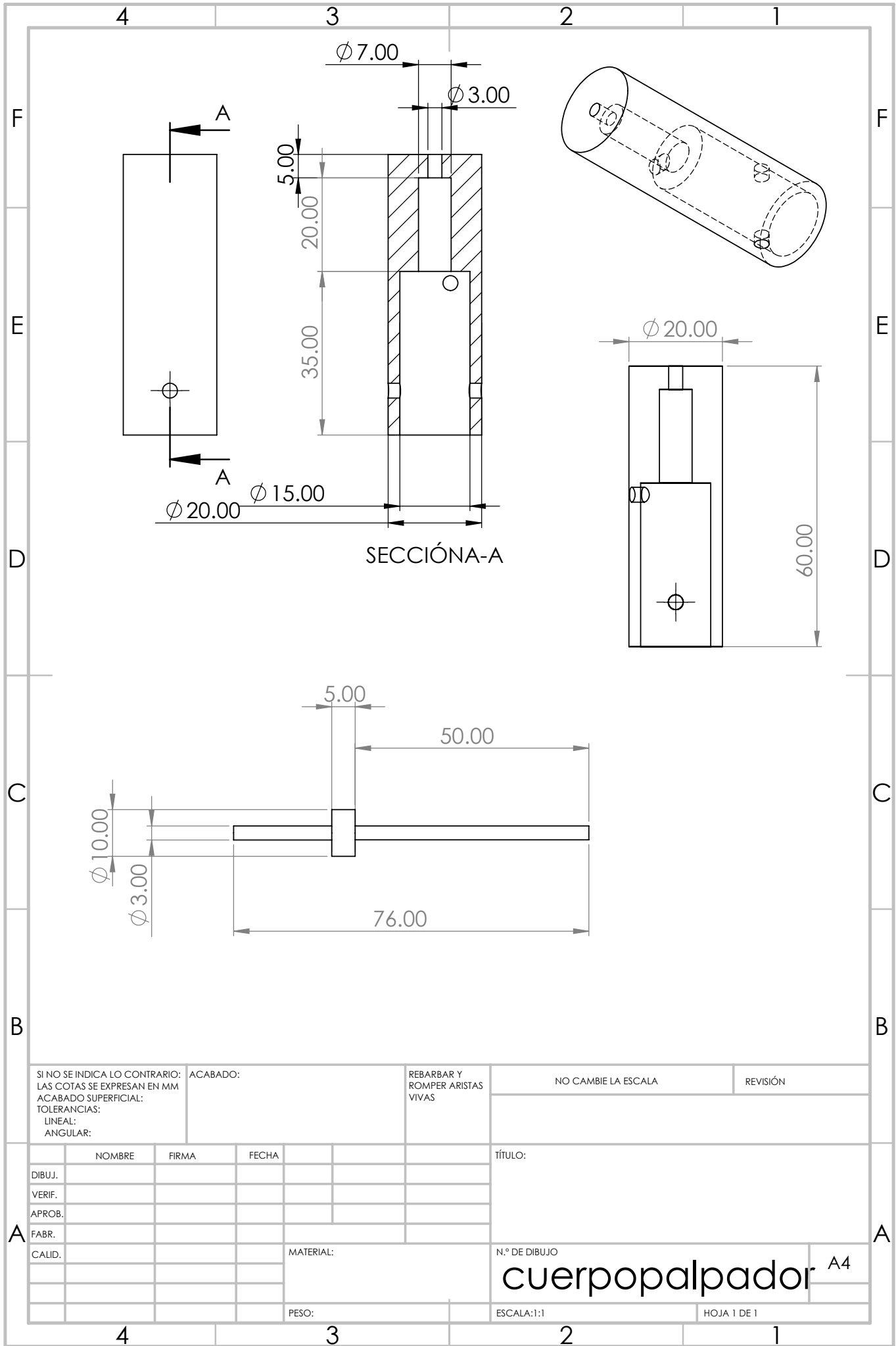


Figura 3.15: Palpador Completo.

Por último, es necesario realizar simulaciones antes de mandarlo a fabricar, se realiza el ensamble correspondiente.

3.1.4. Construcción del sistema Palpador

Una vez realizado el diseño, obtenemos el plano y procedemos a construir el palpador, el material se eligió fue bronce debido a la maleabilidad que se tiene.



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
DIBUJ.		VERIF.		APROB.		N.º DE DIBUJO			
FABR.		CALID.		MATERIAL:		cuerpopalpador A4			
PESO:		ESCALA: 1:1		HOJA 1 DE 1					

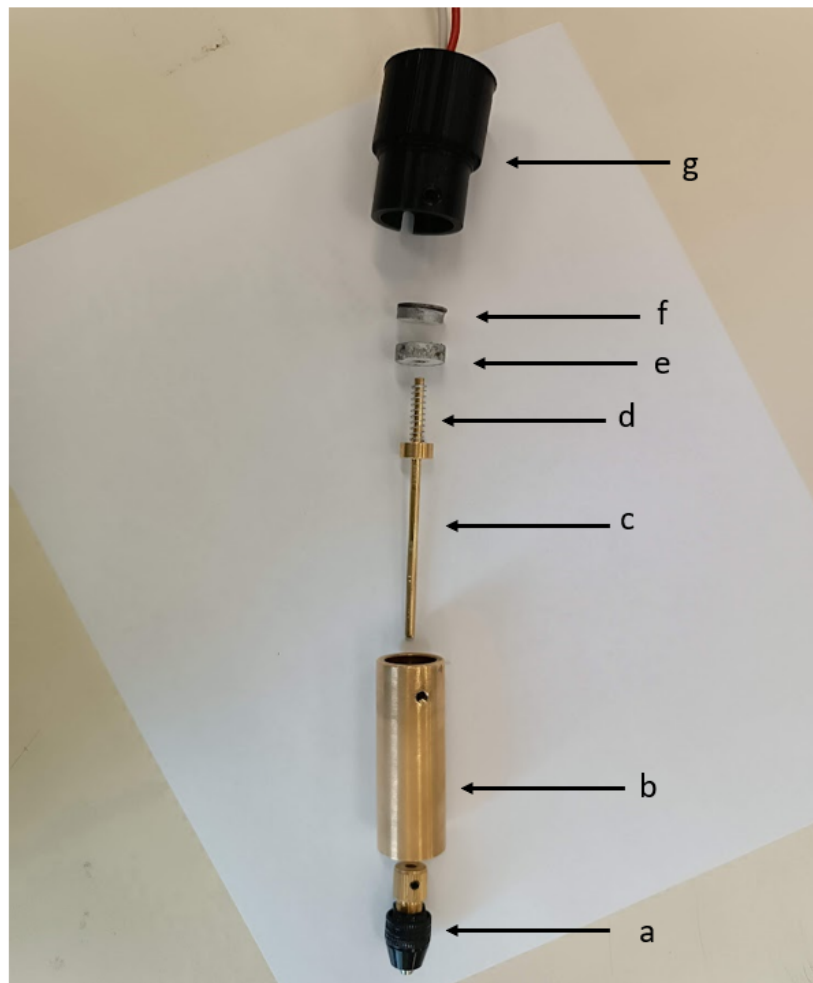


Figura 3.16: Piezas fabricadas palpador.

En la figure 3.16 podemos ver cada una de las partes que lo componen:

- (a): La parte a es un broquero con la capacidad de sostener puntas de 0.100 mm hasta 5 mm de diámetro, este con el objetivo de poder cambiar las puntas cuando se requiera.
- La pieza (b) es el cuerpo del palpador esta se encarga de contener todos los elementos mecánicos presentes. En este caso ya contiene dentro los rodamientos lineales.
- La flecha (pieza(c)) es la que se encarga de moverse, la cual "sube" y "baja" a través de los rodamientos lineales ademas de que se encarga de sujetar al resorte.
- El resorte (d) tiene la tarea de "empujar" a la flecha a su posición original, y así poder realizar la tarea de palpador.
- El "tope" (e) se encarga de que el resorte no se salga de su posición.

- La pieza metálica (f) se encarga de hacer contacto con unas laminas que se encuentran dentro de (g) para que funcione como un palpador del tipo Trigger, además la pieza (g) es una tapa roscada para poder armar y desarmar el palpador.

Todo el conjunto de piezas hacen que el sistema funcione de manera correcta, las piezas están echas a la medida, de tal manera que el sistema funcione de manera óptima. La ventaja de tener este palpador fabricado es que puede armarse y desarmarse, al ser elementos mecánicos estos siempre van a presentar desgaste, los elementos que mayor desgaste presentan son el resorte y los baleros lineales, es por eso que pueden cambiarse cuando estos ya no tengan un buen funcionamiento.

3.1.5. Punta Palpador

Una parte fundamental en el diseño del palpador es la punta que ira tocando a la pieza, se quiere que el movimiento sea de 100 micras, así qu se debe para realizar el escaneado la punta debe ser pequeña, los palpadores industriales utilizan puntas pequeñas, así que para realizar la parte de tocar la pieza se utiliza lo que es una aguja, las agujas son utilizadas en la industria textil, sin embargo para este tema de tesis se le dará otro uso, las partes principales de una aguja se muestran en la figura 3.17. Las principales características por la cual se elige una aguan son las siguientes.

- Sistema: El sistema de un aguja define las dimensiones de un aguja para ajustar el tipo de máquina. Dependiendo de la máquina y su tipo de puntada, la aguja está diseñada con variaciones en la longitud del asta, grosor de tronco, tipo de ojo, etc. Es recomendable consultar con el fabricante de la máquina el sistema de agujas para máquina ideal.
- La punta de una aguja es generalmente clasificada en dos tipos:
 - Redonda
 - Cortante
- Tamaño: El tamaño de la aguja es generalmente representado en una de dos formas (hay otras). Uno de los métodos es por un número métrico (Nm). Este representa el diámetro del asta de la aguja en un promedio de centésimas de milímetros por encima de la abertura pero no en cualquier parte reforzada del asta. Por ejemplo, una aguja Nm 110 es 1.1 milímetro de diámetro, mientras que una aguja Nm 50 es la mitad de un milímetro.

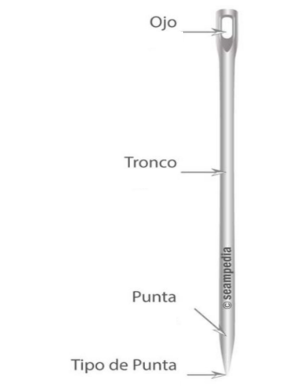


Figura 3.17: partes de una aguja.

Como la punta tiene que tocar el material y no dañarlo es necesario que tenga punta redonda o punta de bola, existen distintos tamaños, pero se eligió, la que es de tamaño medio.



Figura 3.18: Tipos de punta redonda.

Para medir la punta resulta difícil, sin embargo los calibradores o vernier tienen la resolución necesaria que permite verificar si en realidad la punta mide 100 μ m. El calibrador como se muestra en la Figura 3.19 se puede ver que mide 0.1 mm lo que equivale a 100 μ m, esto para realizar un escaneado de calidad.

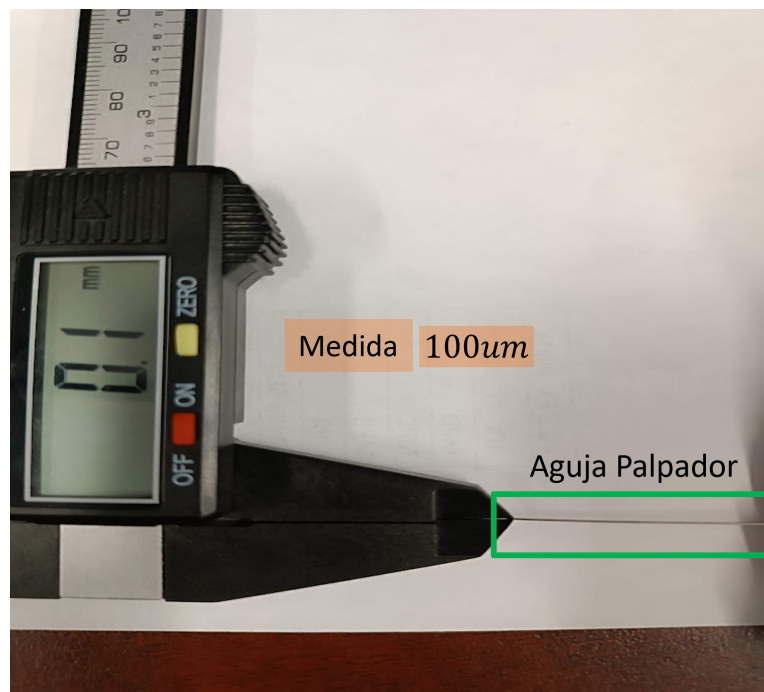


Figura 3.19: Medición punta palpador.

3.1.6. Montaje en eje Z

El palpador para poder fijarse al robot se diseñaron dos piezas para que pueda fijarse a la estructura.

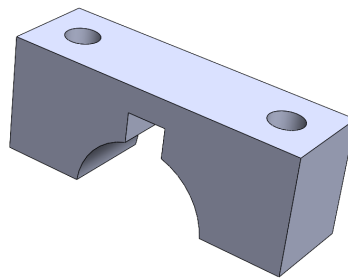


Figura 3.20: Pieza para montaje en eje Z.

El eje Z tenia anteriormente el extrusor como herramienta para hacer funcionar como impresora 3D

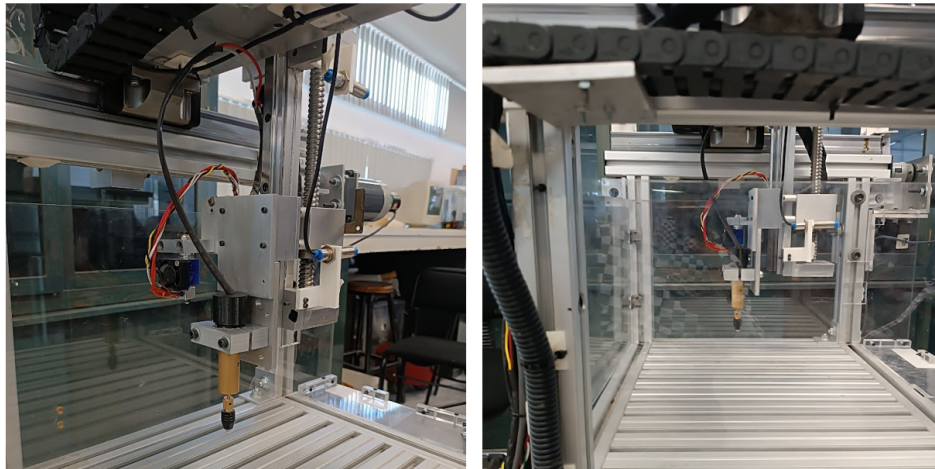


Figura 3.21: Palpador montado en eje Z.

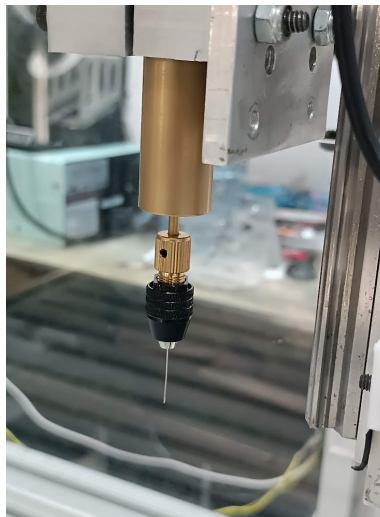


Figura 3.22: Punta en palpador.

3.1.7. Electrónica Palpador

Por si solo el palpador es un switch mecánico, por lo que es necesario diseñar un circuito que permita mandar alguna señal eléctrica al FPGA, y este pueda realizar alguna tarea en específica, en este caso hacer que cuando el palpador toque la pieza que se está escaneando este regrese rápidamente a la posición de casa y espera la siguiente información para seguir palpando.

Un switch mecánico siempre tiene oscilaciones cuando hace contacto, así que para evitar que el FPGA lea varias veces 0 o 1, que es el objetivo del palpador cerrar o abrir un circuito externo, se propone el circuito generador de pulso único, este circuito puede ser implementado de diversas maneras, en este caso se usa el Temporizador NE555, este circuito tiene la función principal de generar pulsos con una precisión alta, entre sus funciones secundarias están la de oscilador, divisor de frecuencia, modulador o generador.

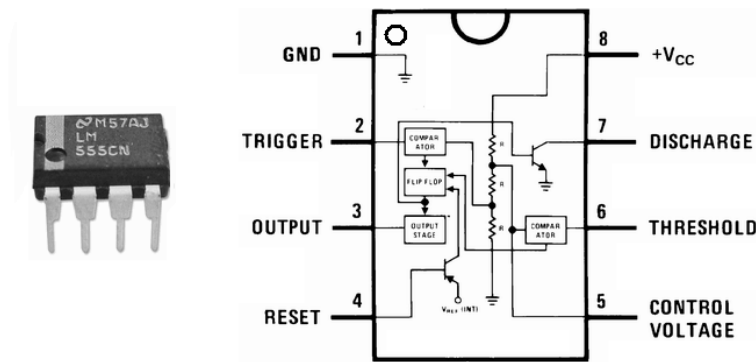


Figura 3.23: Circuito NE555.

Existen tres configuraciones importantes con la cual se puede implementar el Temporizador 555. [15]

- **Astable:** es un circuito generador de pulsos que produce una señal cuadrada o rectangular. Este tipo de configuración también se le conoce como *free-running* debido a que genera gran variedad de pulsos continuos. (Figura 3.24).
- **Biestable:** también llamado Latch o FLIP-FLOP, la idea básica de funcionamiento es que está siempre en uno de los dos estados posibles ya sea set o reset, donde los pulsos de entrada disparan un cambio en la salida de baja a alta. (Figura 3.24)
- **Monoestable:** También llamado *one-shot* genera en la salida un voltaje en forma de pulso de duración Fija cada vez que su entrada es sometida a un disparo, normalmente normalmente de corta duración

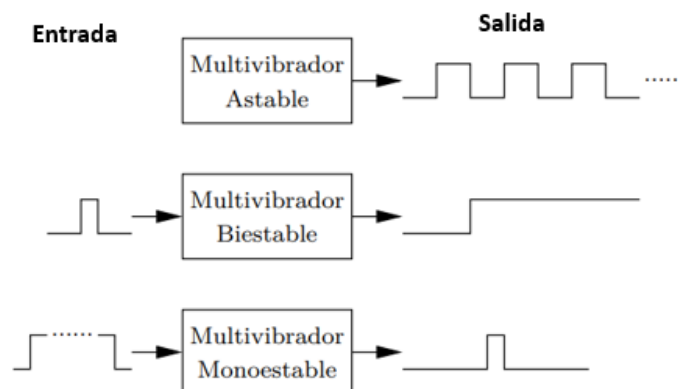


Figura 3.24: Salida astable, biestable y monoestable.

De las tres configuraciones en la cual puede ser implementado un 555, la cual se encarga de generar un pulso único, de acuerdo a la entrada es en la configuración

monoestable, la entrada puede ser disparada por un pulso negativo o positivo dependiendo del monoestable proporcionando una salida formada por un pulso positivo o negativo. Entendiendo que la tensión no puede ser inferior a 0V el pulso negativo es referido respecto a la tensión de alimentación ($V_{CC} = 5\text{ V}$). El circuito que genera el pulso de salida se encuentra en en la Figura 3.25, el corto pulso negativo produce un pulso mucho más largo, el tiempo t que dura el pulso positivo de salida viene dado por la fórmula:

$$t = 1.1R_A C \quad (3.3)$$

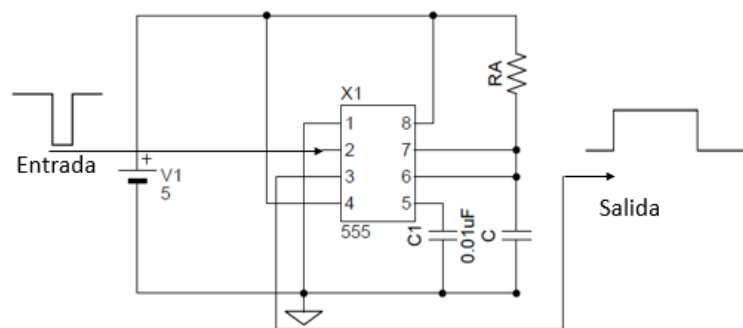


Figura 3.25: Circuito monoestable formado por un 555.

Realizando los cálculos para tener un pulso adecuado para que el FPGA pueda interpretarlo como un cambio de nivel de bajo a alto se propone un tiempo de 50 ms tenemos un los siguientes valores : $R_A = 1\text{ M}\Omega$ y $C = 1\text{ nF}$. Podemos ver ne la Figura 3.25, en la entrada 2 del 555, lleva una señal de disparo que es el Trigger, así que es necesario realizar un circuito que vaya de alto a bajo para generar un único pulso, así que se llevara a acabo un circuito pull-down antirrebote, aquí es donde entra el switch del palpador, este se encargará de cerrar el circuito y mandar un pulso negativo al generador de pulso único.

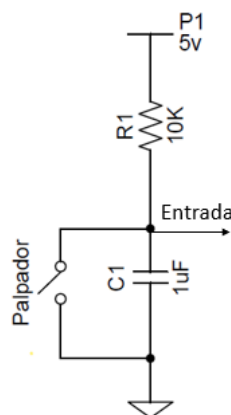


Figura 3.26: Circuito antirrebote.

En la figura 3.26 podemos ver que se esta incluyendo el switch del palpador mandando una señal para activar el pulso del circuito monoestable, la salida de este circuito GPU se manda a la entrada del FPGA, para que este pueda realizar la tarea asignada. sin embargo es necesario realizar un circuito que sea capaz de detener al eje Z cuando el palpador sea activado, así que se identificó cual es la señal PWM que se activa en este caso es la señal que lleva el nombre PWM5IZ , este PWM se activa cual eje Z va en dirección negativa es decir hacía "abajo", el circuito que se va a implementar es del tipo combinacional, en la tabla 3.10 se muestra las condiciones que debe cumplir para que en la salida se obtenga el PWM cuando la señal GPU se encuentre en bajo, cuando se realice un cambio de estado en GPU de bajo a alto, el PWM se vaya a cero, esta señal se conecta al puente H, para que este desactive y detenga el movimiento del eje.

GPU	PWM	\overline{GPU}	\overline{PWMGPU}	$PWMGPU$
0	0	1	1	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	1	0	1	0

Tabla 3.1: Tabla de Verdad Circuito

Existen diversas formas de implementar ese circuito, la más popular es utilizando tecnología TTL sin embargo existe un problema, al utilizar compuertas TTL en la salida tendremos un voltaje alto de 5 volts, pero el FPGA solo soporta un voltaje máximo de 3.3 volts, así que se usa un circuito CMOS con compuertas NAND que puedan realizar la tabla de verdad, el circuito es el integrado CMOS CD4011BE , está compuesta por 8 entradas y 4 salidas (Figura 3.27), el voltaje de operación va de los 3 volts a 15 volts, este integrado detecta un estado alto a partir de los 2 Volts.

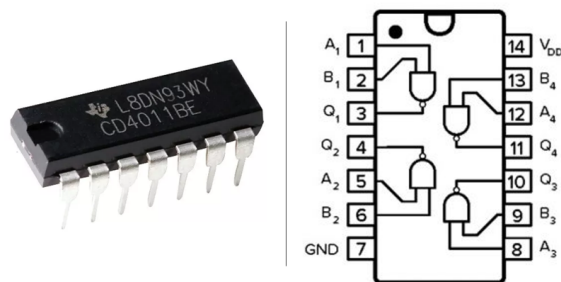


Figura 3.27: Compuerta NAND 4011BE.

El circuito de la figura 3.28, muestra la conexión que se debe realizar para poder implementar el circuito completo combinacional para seguir la lógica de la tabla de verdad.

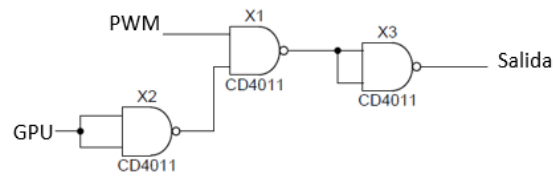


Figura 3.28: Compuerta NAND 4011BE.

En la Figura 3.29, podemos ver que uniendo cada una de las partes tenemos el circuito para hacer que el palpador genere un pulso único con 3.3 volts de amplitud (Figura 3.30).

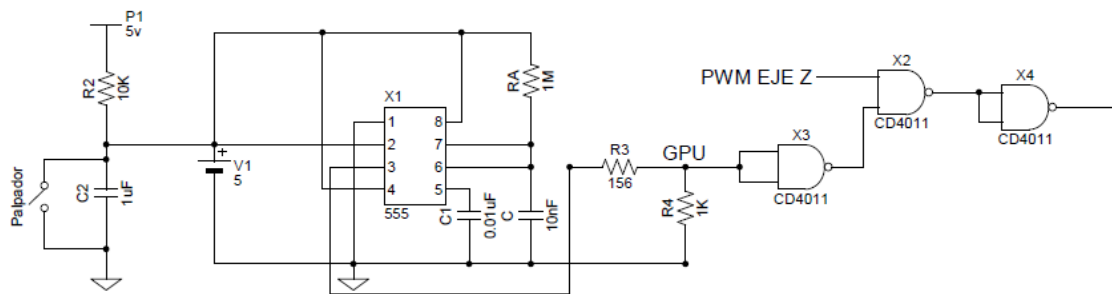


Figura 3.29: Circuito de acoplamiento al palpador.



Figura 3.30: Pulso generado por el circuito.

El Hardware completo del palpador es funcional, cada una de las partes diseñadas es de suma importancia ya que aporta al sistema y así ésta pueda funcionar como un escáner 3D.

3.2. Robot Cartesiano (Estado inicial)

El robot al ser un prototipo cuenta con ciertos mecanismos que no funcionan de la mejor manera, y hacen que este tenga algunos fallos cuando está operando

de manera prolongada. Uno de los principales problemas que se encuentran es la electrónica, este cuenta con muchas tarjetas para poder hacer su función que es la parte de acoplamiento de señal, lectura de datos, etapas de potencia. La forma que está interconectado es con cables Jumpers, provocando que con algún movimiento se llegue a desconectar, lo que se debe hacer es identificar que hace cada una de las tarjetas, identificar si es entrada o salida, direccionar algún puerto de entrada o salida del FPGA. Lo que debe hacerse es ir retirando cada una de las tarjetas y verificar que es lo que hace cada una, además de ir etiquetando cada uno de los cables, para saber cómo debe ir interconectando. En la figura 3.31 se puede ver a simple vista como se encuentra la electrónica, es complicado ver dentro del espacio de conexiones que es lo que hace cada cable, si es algún tipo de señal proveniente de un sensor, si es alimentación para las tarjetas, en algunas partes tiene etiquetas, pero se pierden con tanto cable, y algunos de estos ya se han desconectado.

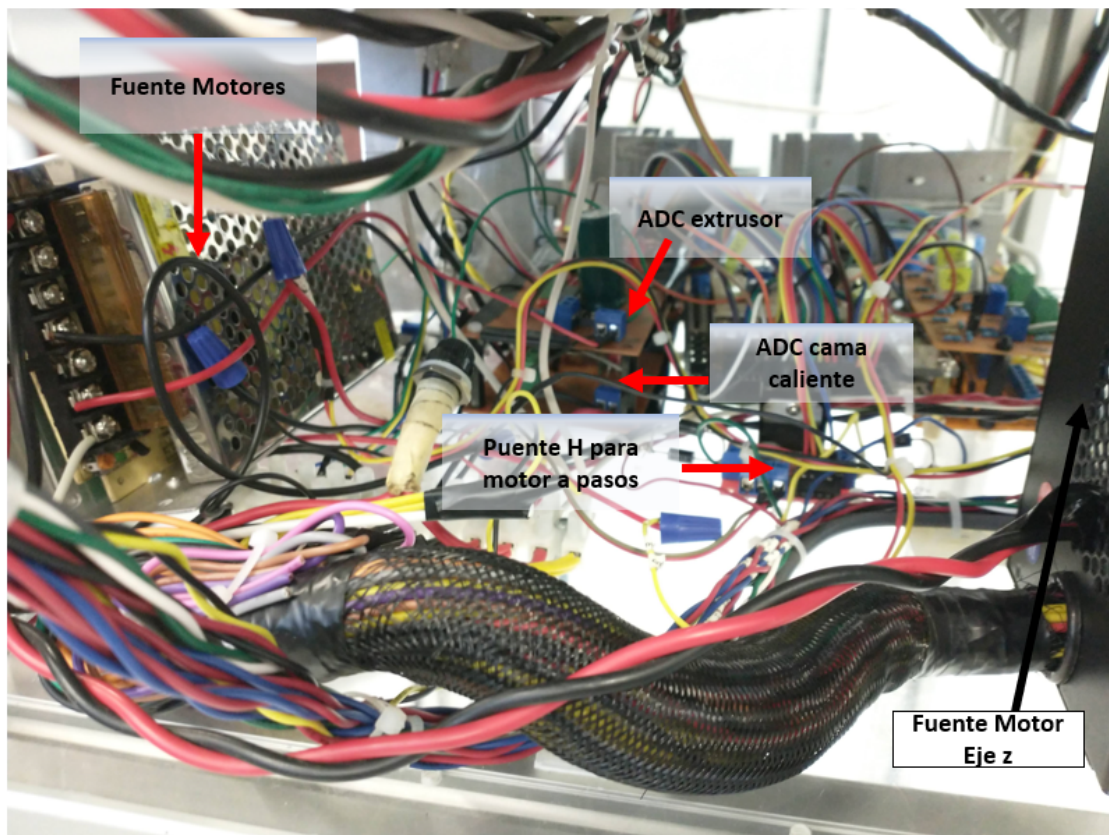


Figura 3.31: Cableado del robot.

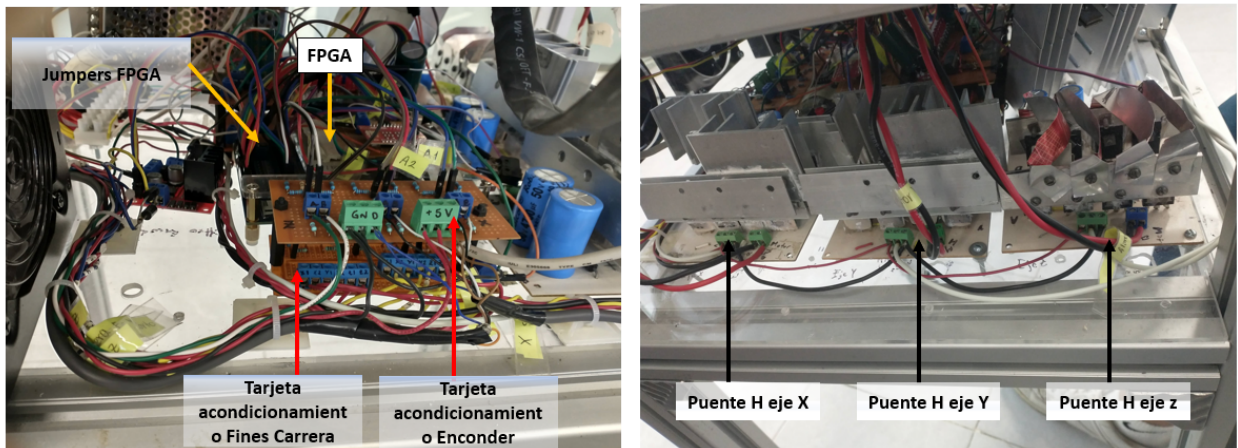


Figura 3.32: Componentes y FPGA del robot.

Uno de los cambios importantes que se debe realizar es cambiar todos los Jumpers que entran al FPGA por cables que no se desconecten de una forma fácil, actualmente como se puede ver en la figura 3.33 entran todas las señales al FPGA con Jumpers, además que el wifi se encuentra conectado de la misma manera.

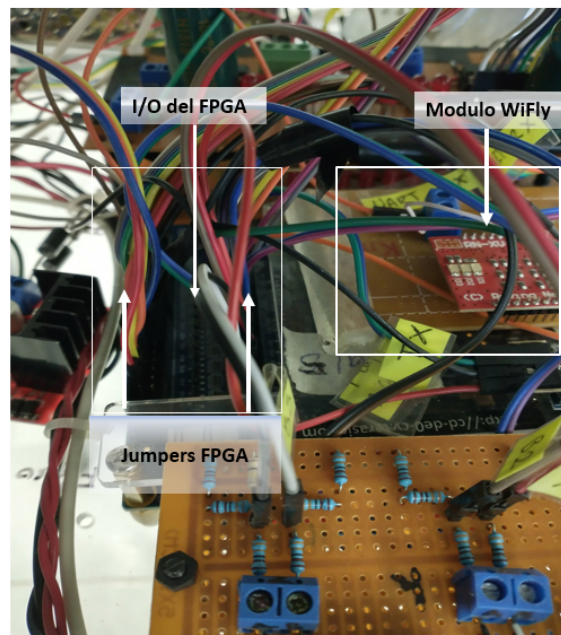


Figura 3.33: Cables de conexión al FPGA.

Al no tener un diagrama de cómo va conectado se debe realizar todo nuevamente, respetando cada una de las tarjetas que están dentro, así como las entradas y salidas.

En la Figura 1.1 se tiene un sistema de adquisición de datos basado en FPGA, un sistema típico utiliza sensores, transductores, amplificadores, convertidor analógico digital (A/D) y digital analógico (D/A), para procesar información acerca de un sistema físico de forma digitalizada. Para procesar este tipo de información es necesario una etapa de acoplamiento de señales. Las cuales son las siguientes.

- Amplificación
- Excitación
- Filtrado
- Multiplexado
- Aislamiento

Es por eso que en la parte de Hardware son necesarios ciertos circuitos que ayudan al acoplamiento de señales, se necesitan varias tarjetas para poder acoplar la señal. En el robot podemos ver que se tienen muchas tarjetas, así que se debe desconectar cada una e identificar que hacen y que tipo de señal es si es una entrada o salida El robot cuenta con las siguientes tarjetas que ayudan a procesar la información ya sea entrada o salida y hacer funcionar el robot

- Tarjeta de Lectura encoder
- Tarjeta de lectura de Fines de carrera
- Tarjetas para lectura de temperatura ADC
- Puentes H para cada motor en cada eje
- Etapa de Potencia para extrusor
- Etapa de Potencia para cama caliente
- Puente H para alimentador de material

Cada una de esas tarjetas debe revisarse, cuál es el voltaje de alimentación para cada uno, las salidas a que entrada del FPGA se direcciona así como las entradas.

3.2.1. Alimentación del sistema

Para alimentar todos los circuitos se tienen tres fuentes, una fuente de computadora, la cual tiene voltajes de 5 volts, 12 volts, que son los que se usan, dos fuentes conmutadas de 12 volts a 10 amperes para hacer funcionar Los motores del eje X y Y, alimentando los Puentes H, la fuente de computadora además de alimentar todas las tarjetas del robot, alimenta un puente H el cual es para el eje Z este al ser más pequeño tiene un menor consumo de corriente.

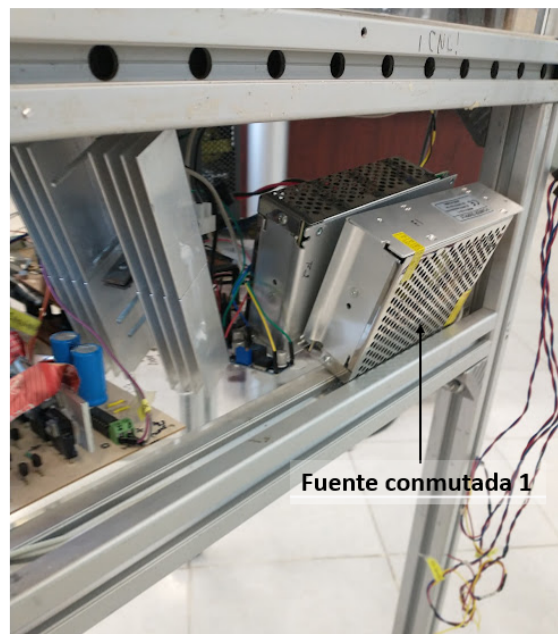


Figura 3.34: Fuente Conmutada para alimentar Puente H del eje X.

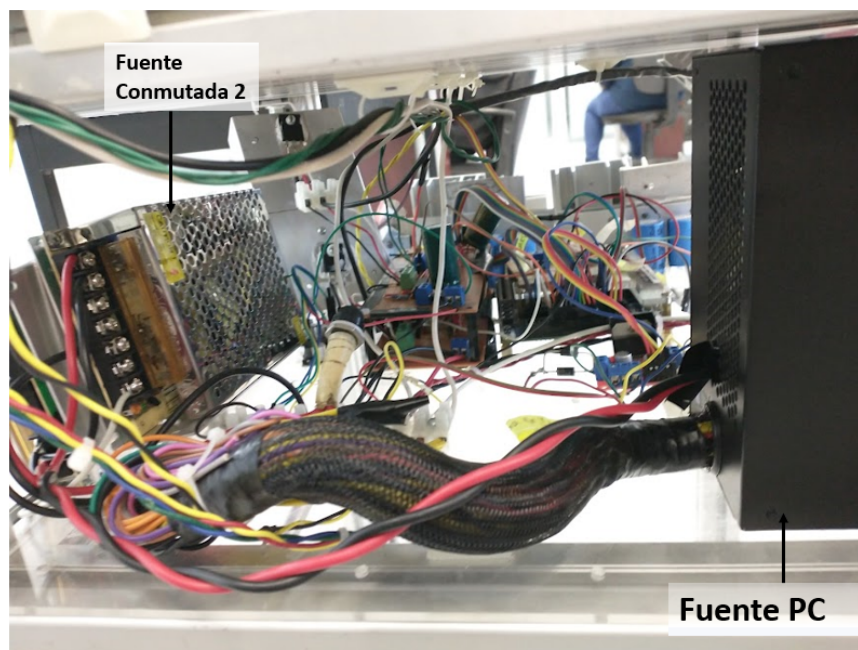


Figura 3.35: Fuente conmutada eje Y y Fuente de alimentación para las tarjetas.

3.2.2. Fines de Carrera

Dentro de la automatización industrial, existen multitud de dispositivos electrónicos que facilitan los procesos de producción. En este caso, vamos a adentrarnos en los finales de carrera que, hoy en día, son imprescindibles en muchos de los mecanismos empleados en cualquier tipo de industria. La salida de los finales de carrera es binaria

y la única información que nos da, es si el objeto está en una posición determinada o no. [16]

El robot tiene instalado en cada uno de los ejes switch de fin de carrera, se instalaron para delimitar el área de trabajo, y no tenga un daño en el robot. En pocas palabras se utilizan como un “paro de emergencia” en caso de que el control llegue a fallar, se activan los switch y detienen el movimiento del robot. Los fines de carrera que están montados en el robot son mecánicos, es decir, presentan un desgaste con el paso del tiempo. Cada eje tiene 2 finales de carrera como se muestra en las siguientes Figuras.

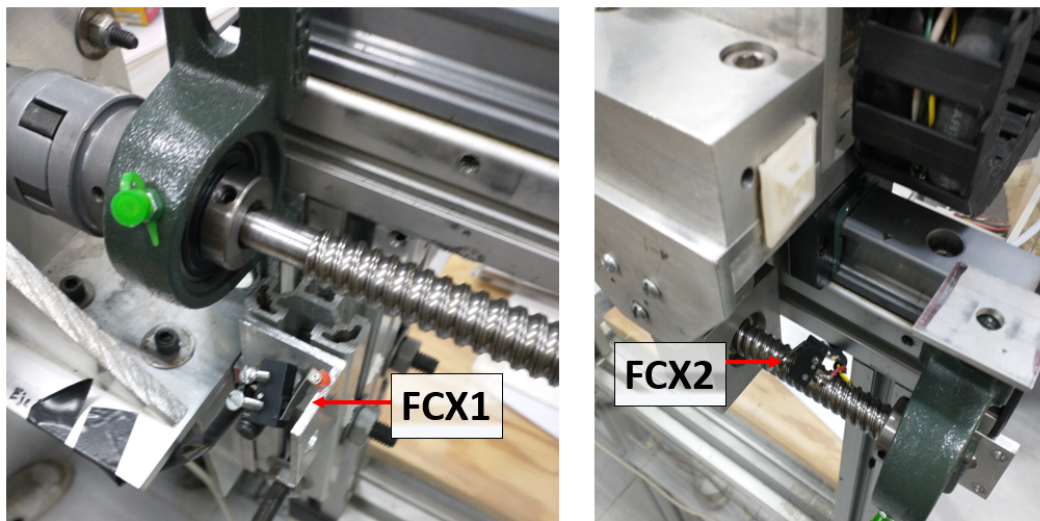


Figura 3.36: Fines de Carrera eje X.

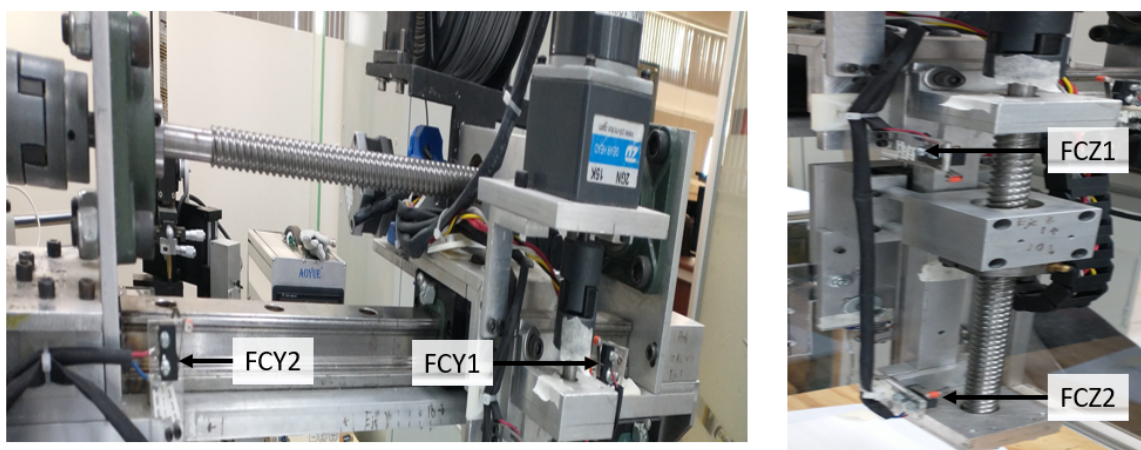


Figura 3.37: Fines de Carrera eje Y y eje Z.

En la Figura 3.36 y 3.37 se puede apreciar que este tipo de fines de carrera se desgastan mucho con el uso, ya que se rompen muy seguido, y se le debe hacer mantenimiento constantemente. Así que se debe realizar el cambio de fines de carrera a otro tipo. Para leer las señales provenientes de los encoder se utiliza una tarjeta la

cual acopla la señal al FPGA. Los fines de carrera lo que hacen es cerrar un switch este va alimentado con 5 volts, así que lo que hace esta tarjeta es bajar el voltaje 3.3 volts. Se va realizando la etiqueta para cada tarjeta. y se va retirando las tarjetas,

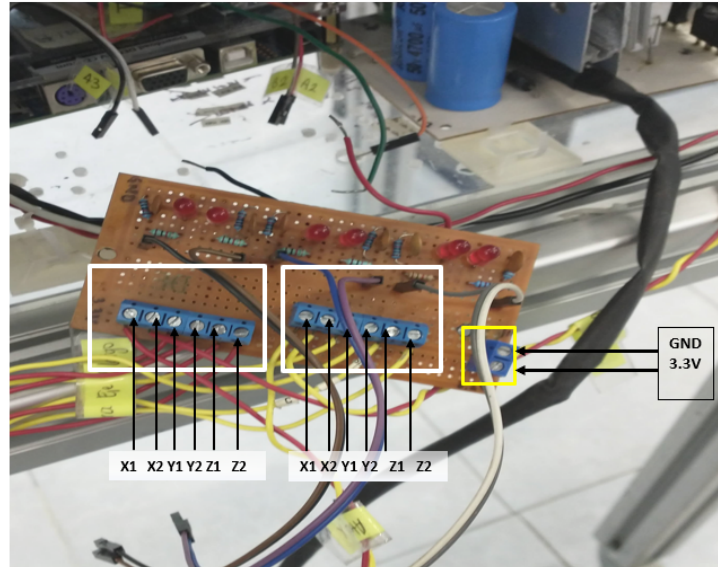


Figura 3.38: Conexión de fines de carrera.

mostrando las correspondientes entradas del FPGA.

Entrada	Número entrada FPGA
F. Carrera eje Z 1	N20
F. Carrera eje Z 2	N19
F. Carrera eje Y 1	R21
F. Carrera eje Y 2	N19
F. Carrera eje X 1	N21
F. Carrera eje X 2	T22

Tabla 3.2: Entradas de los Fines de Carrera

3.2.3. Encoders

El encoder que se utiliza es el modelo E6B2-CWZ6C, provee 1000 pulsos por revolución, el rango de alimentación es de 5-24 V con un consumo de corriente que puede que llegar hasta 80 mA. Este tipo de encoders de cuadratura proporciona 2 señales de salida denominadas A, B con el propósito de brindar la posición y la velocidad, a demás con una buena interpretación de la señal es posible verificar en que sentido gira el motor. Para acoplar dichas señales se tiene una tarjeta electrónica, el encoder se alimenta con 5 volts, lo que significa que en la salida, tendremos una señal de 5 volts; sin embargo, la entrada del FPGA soporta como un máximo de 3,3

volts, así que la tarjeta se encarga de hacer un divisor de voltaje para obtener a su salida el voltaje adecuado para no dañar el FPGA.

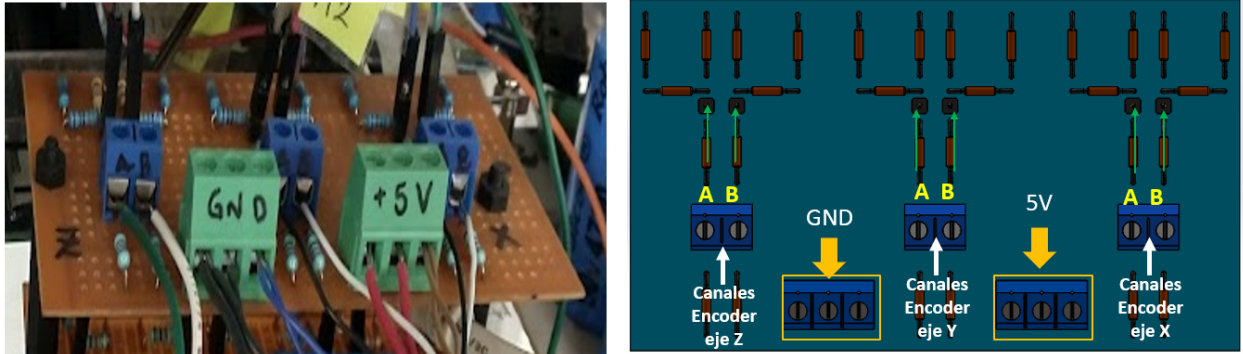


Figura 3.39: Etiquetas de los puertos de la tarjeta.

Con esto en cuenta se pueden retirar los encoder sin antes identificar las 6 entradas al FPGA, ya que esta detecta los dos canales provenientes del FPGA. La siguiente tabla muestra la conexión correspondiente a cada pin.

Encoder	Número entrada FPGA
Encoder eje Z (A)	D17
Encoder eje Z (B)	K20
Encoder eje Y (A)	K21
Encoder eje Y (B)	K22
Encoder eje X (A)	M20
Encoder eje X (B)	M21

Tabla 3.3: Entradas de los Encoder al FPGA

3.2.4. ADC

Este robot había sido implementado como una impresora 3D así que dentro de toda la electrónica se encuentran unas tarjetas la cuales se encargan de hacer la conversión analógica digital, proveniente de un extrusor y la cama caliente, estos convertidores tienen una resolución de 8 bits. Es decir, se tiene un total de 16 entradas que se conectan al FPGA. En la Figura 3.40 Puede verse que se tienen 2 tarjetas una sobre otra, la que se encuentra en la parte superior se encarga de controlar al extrusor.

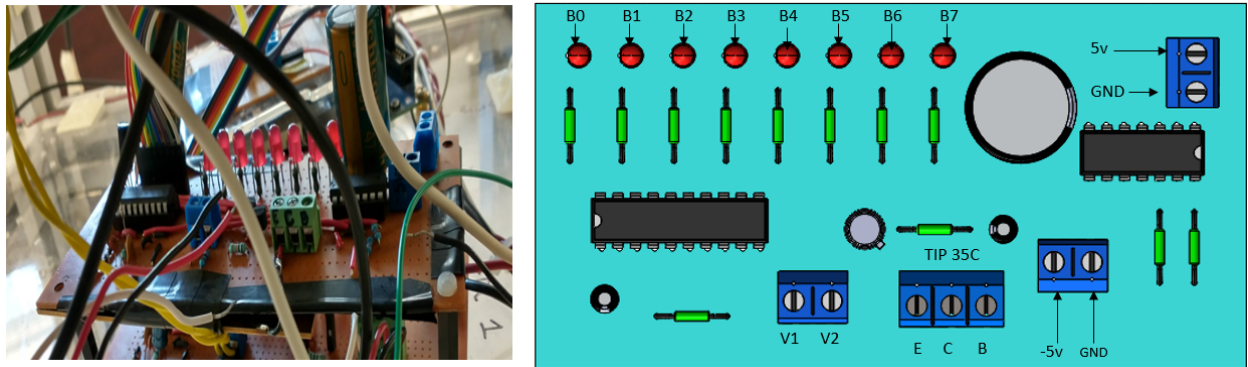


Figura 3.40: Etiquetas de Conexión ADC B Extrusor.

Las correspondientes entradas al FPGA son las siguientes:

Entrada	Número entrada FPGA
B0	J18
B1	G11
B2	J11
B3	A15
B4	L8
B5	B15
B6	E14
B7	E16

Tabla 3.4: Mapeo de entradas ADC extrusor

Podemos Ver que la anterior tarjeta tiene Voltajes de alimentación de 5 y -5 volts, ya que los buffers que tiene el ADC así lo requiere, es por eso que se colocan dos reguladores LM2596.

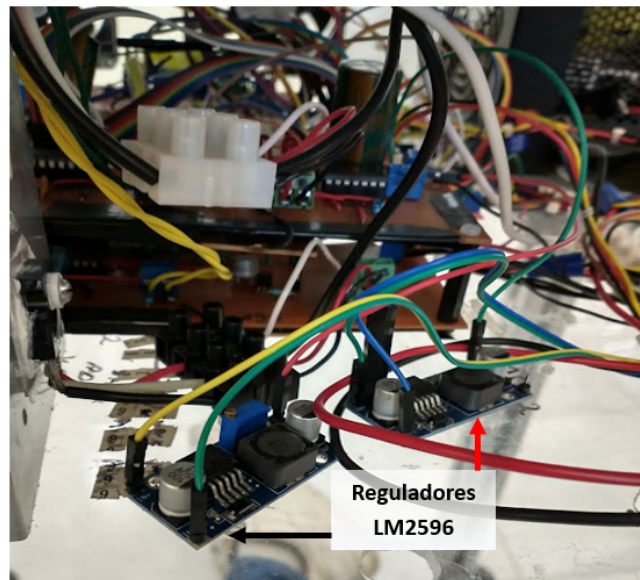


Figura 3.41: Conexión de los reguladores.

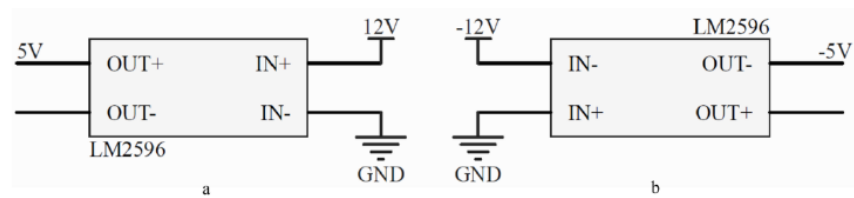


Figura 3.42: Conexión de los reguladores.

Cuando se retira la tarjeta de la parte superior se tiene un ADC para procesar la señal de la parte de la cama caliente. Tiene la misma configuración en cuanto al número de bits

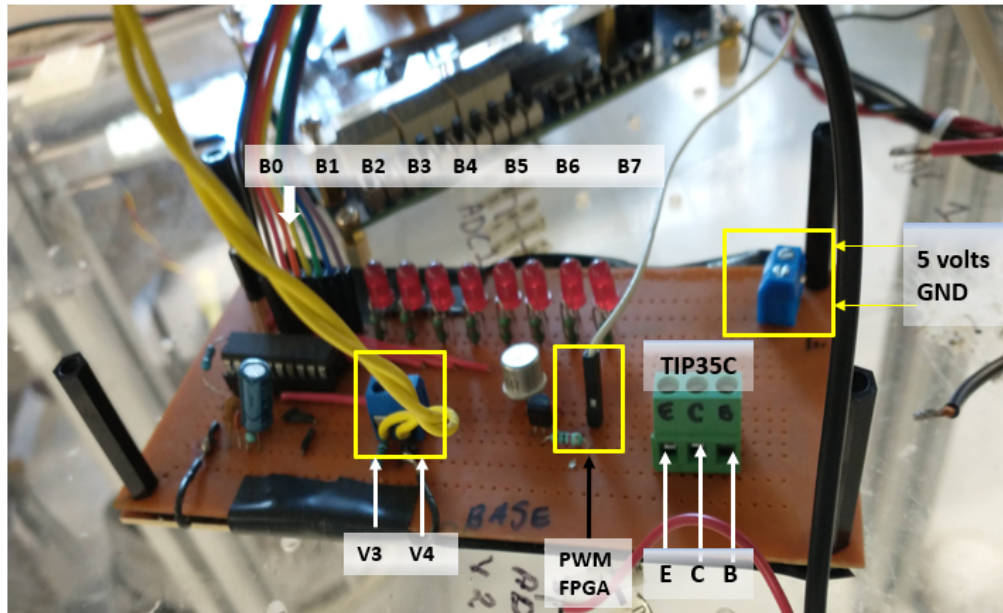


Figura 3.43: Conexión de los convertidores Analógico Digital de la cama caliente.

Tiene una entrada que proviene del FPGA el cual es un PWM, el pin es el F13

Entrada	Número entrada FPGA
B0	H18
B1	J19
B2	H10
B3	H14
B4	J13
B5	A14
B6	C15
B7	E15

Tabla 3.5: Mapeo de entradas ADC Cama caliente

3.2.5. Puente H motores

Para activar los motorreductores se implementaron puentes H en configuración Darlington, debido a que los motores consumen hasta 15 amperes, se tienen como transistores principales un Tip35C (NPN) y Tip36C (PNP) cada uno de estos puede drenar hasta 25 Amperes, el diagrama esquemático se encuentra a continuación (Figura 3.44). [17] Estos puentes H están realizados en un PCB; sin embargo, tienen un inconveniente, al estar consumiendo bastante corriente estos tienden a calentarse, sin embargo, la disipación con la que cuenta no es la adecuada (Figura 3.45), al retirarlos es posible ver más a detalle las condiciones en las que se encuentran, además de tener latas de refresco, tiene pedazos de riel delgados para poder disipar.

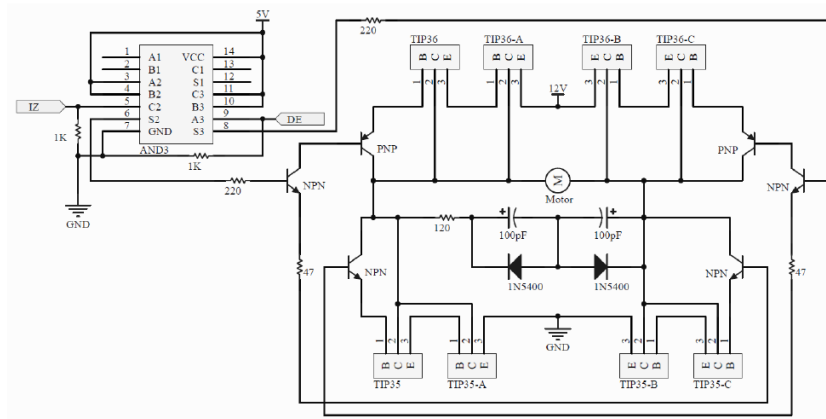


Figura 3.44: Diagrama Puente H.

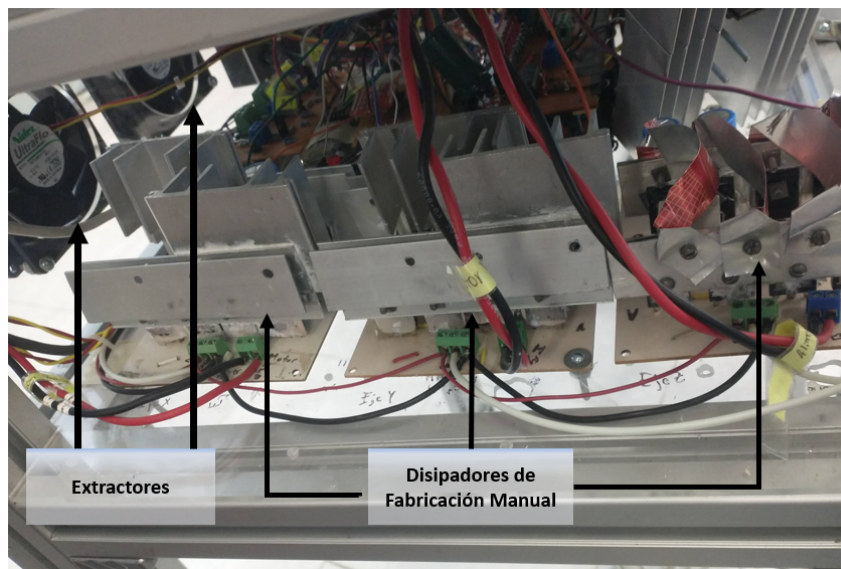


Figura 3.45: Puentes H.

Los tres puentes H están realizados de la misma manera, así que la conexión es la misma respetando las señales de habilitación correspondiente del FPGA, para activar el eje que sea de interés.

Salida	Número entrada FPGA
X PWM3 Izquierda	P16
X PWM3 Derecha	M18
Y PWM4 Izquierda	L18
Y PWM4 Derecha	L17
Y PWM5 Izquierda	L10
Y PWM5 Derecha	K17

Tabla 3.6: Salidas para los Puentes H

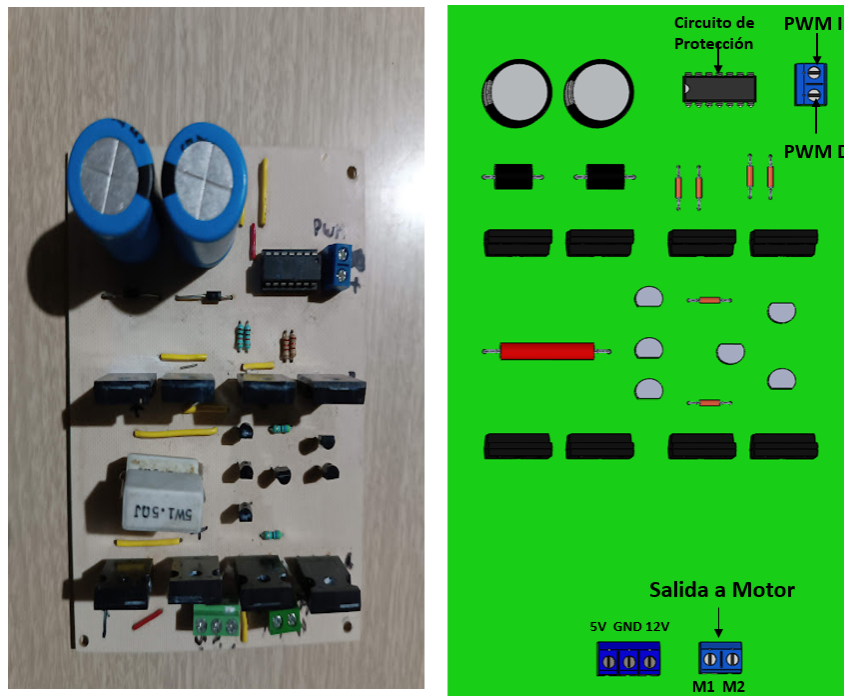


Figura 3.46: Conexión del Puente H.

3.2.6. Puente H Alimentador de Material

El robot tiene un motor a pasos, este es para jalar el material y hacer las impresiones 3D, usa un puente H L298N para poder controlarlo, para hacer funcionar el alimentador de material.

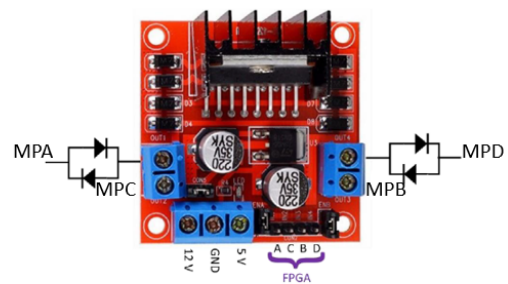


Figura 3.47: a) Puente H para alimentador de material. b) Esquema de conexión para Puente H.

Salida	Número entrada FPGA
Motor a Pasos A	B12
Motor a Pasos B	B13
Motor a Pasos C	D13
Motor a Pasos D	G17

Tabla 3.7: Salidas para los Puentes H

3.2.7. Etapa de potencia extrusor y cama caliente

Se tienen dos PWM extra, uno es para controlar la temperatura del extrusor y otro para controlar la temperatura de la cama caliente, este se conecta a 2 puentes H en configuración Darlington.

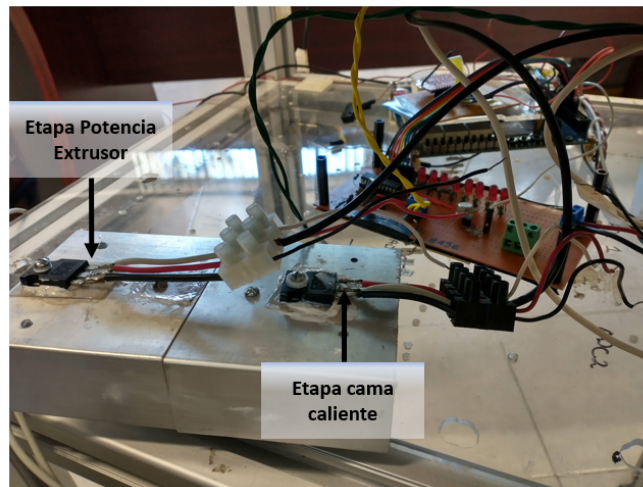


Figura 3.48: Etapa de potencia extrusor y cama caliente.

Salida	Número entrada FPGA
PWM Extrusor A	F12
PWM Cama caliente	F13

Tabla 3.8: Salidas PWM Extrusor y cama caliente

3.2.8. Cableado externo

Todos los cables que se encargan de llevar las señales de los encoder, fines de carrera, alimentación de los motores, etc. Esto es un problema, ya que viajan los cables juntos en una misma línea, estas van sobre una cadena porta cables o comúnmente llamadas orugas, los motores consumen hasta 15 amperes entonces estos cables generan un campo magnético y por Ley de inducción de Faraday induce a los elementos

que llevan pequeña señal. En la Figura 3.49 se muestra como todos los cables viajan juntos. Esto provoca al final ruido en las señales, lo que hace que el robot pierda en ciertos momentos la posición cuando está leyendo los datos del encoder.



Figura 3.49: Cadena Porta cables.

3.2.9. Tarjeta FPGA y módulo wifi

En cuanto al FPGA y su módulo Wifi, el cual se encarga de comunicarse con el computador, se encuentra en las siguientes condiciones, se puede apreciar que los cables trozados, algunos ya se encontraban así, entonces no se tenía un buen contacto. El conteo aproximado de cables se muestra en la siguiente tabla.

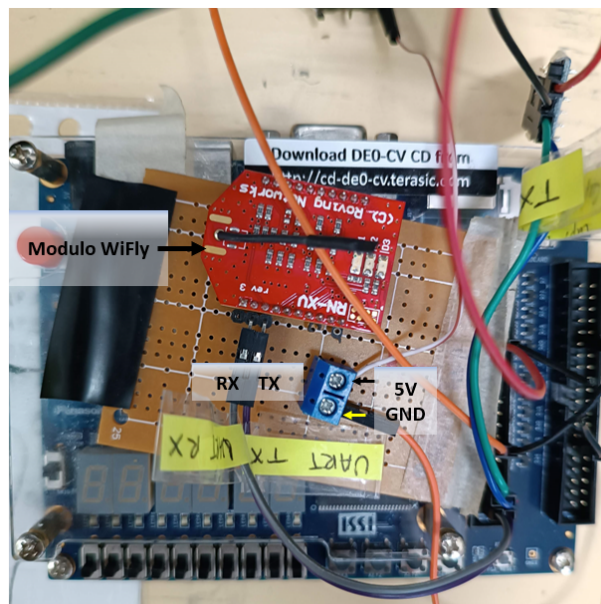


Figura 3.50: FPGA con módulo Wifi.

Todo lo anterior mencionado es parte del Hardware que hacen funcionar al robot, se deben realizar ciertas modificaciones para que quede un sistema robusto.

Elemento	Etiquetas	Número de cables
Fuente Conmutada 1	línea, Neutro, GND, 12 volts PH X	6
Fuente Conmutada 2	Línea, Neutro, GND, 12 volts PH Y	4
Fuente PC,	GND1,GND2, GND3, 12 volts PH Z, 12 volts regulador, -12 regulador, 5 volts Encoder, 5 volts FC,5 volts encoder, 5 volts PH (XYZ), 12 volts MP, 5 volts MP, 12 volts (2 ventiladores),	16
Fines de Carrera	X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2 (Rojos),X1,X2,Y1,Y2,Z1,Z2 (Amarillos),3.3 FPGA, GND.	14
Entrada FPGA Fines C.	FCX1,FCX2,FCY1,FCY2,FCZ1, FCZ2.	6
Encoder	Encoder Z(VCC, A, B, GND.), Encoder Y(VCC, A, B, GND.), Encoder X(VCC, A, B, GND.)	12
Entradas FPGA Encoder	EZA, EZB, EYA, EYB, EXA, EXB	6
ADCB (Extrusor)	5 volts, -5 volts, V1 (señal extrusor), V2 (señal extrusor), GND1,GND1. TIP 35 C (EBC).	9
Entradas FPGA ADCB (Extrusor)	B0,B1,B2,B3,B4,B5,B6,B7.	8
Reguladores LM2596	12 VOLTS, -12 VOLTS, GND1, Out 5 V, Out 1 -5 V.	6
ADCA (Cama caliente)	5 volts, V3 (señal Cama caliente), V4 (señal cama caliente), GND1, TIP 35 C (EBC).	7
Entradas FPGA ADCA (Cama caliente)	B0,B1,B2,B3,B4,B5,B6,B7.	8
Puente H eje X	5 volts, 12 volts, GND2, PWM3I, PWM3D, MX1, MX2	7
Puente H eje Y	5 volts, 12 volts, GND2, PWM4I, PWM4D, MY1, MY2	7
Puente H eje Z	5 volts, 12 volts, GND2, PWM5I, PWM5D, MZ1, MZ2	7
Salidas FPGA PWM motores	PWM3I, PWM3D, PWM4I, PWM4D, PWM5I, PWM5D	6
Alimentador Material (Motor pasos)	12 volts, GND3, 5 volts, MPA, MPB, MPC, MPD, B1A, B1C, B2B, B2D.	11
Salidas FPGA (Motor pasos)	MPA, MPB, MPC, MPD.	4
TIP 35 C Extrusor	Emisor, Base, Colector	3
TIP 35 C Cama caliente	Emisor, Base, Colector	3
Salidas FPGA PWM extrusor-cama caliente	PWME, PWMCC.	2
Modulo Wify	RX,TX,VCC 5 VOLTS,GND.	4
	Total	156

Tabla 3.9: Número de cables

3.3. Actualización de la electrónica

Se le deben realizar ciertos cambios al robot para tener un mejor desempeño y este pueda trabajar de manera continua. Se presentan los cambios realizados.

3.3.1. Tarjeta para acoplar puertos y wifi al FPGA

Para Hacer Funcionar al robot y evitar que se utilicen Jumpers, se va a utilizar una tarjeta de expansión de puertos [18], en la Figura 3.51 se muestra la tarjeta a utilizar, como se puede ver en número de pines que tiene corresponde al número de entradas del FPGA además de que el módulo wifi ya va fijo a la placa para no estar Jumpers y evitar que se desconecte.

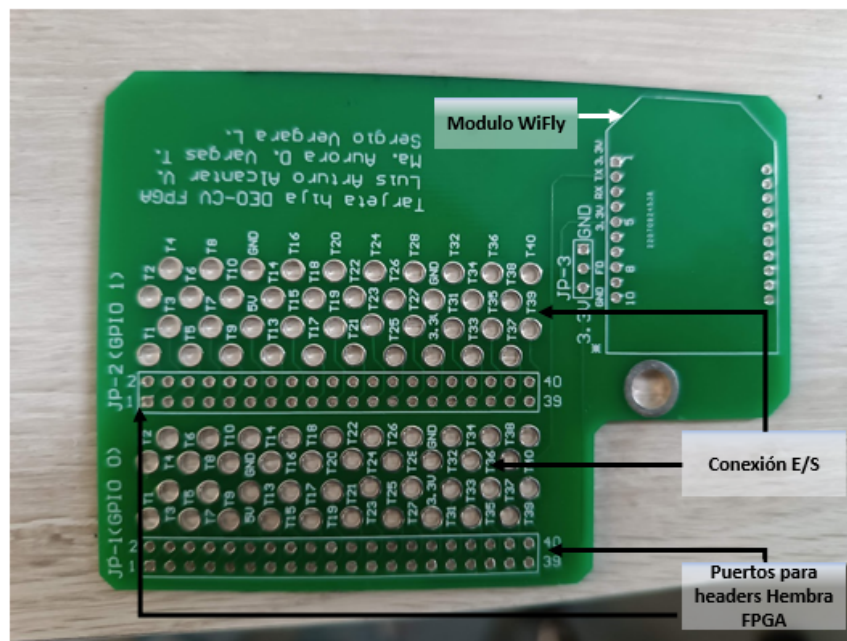


Figura 3.51: Tarjetas de expansión para entradas/salidas correspondientes.

Posteriormente, siguiendo el número de entradas y salidas pertenecientes al FPGA se deben soldar los cables de acuerdo a las entradas y salidas del robot, colocando el módulo wifi, con headers hembra.

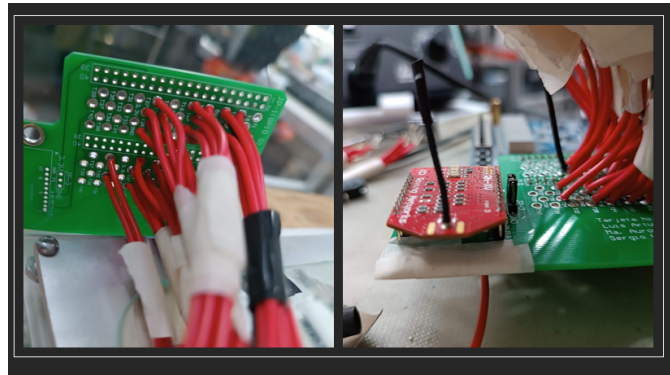


Figura 3.52: Cables para tarjeta Wifi.

El siguiente paso es colocar una pequeña película de cobre, esto para evitar interferencias en el módulo wifi, este al estar trabajando rodeado de muchos proyectos, las ondas electromagnéticas.

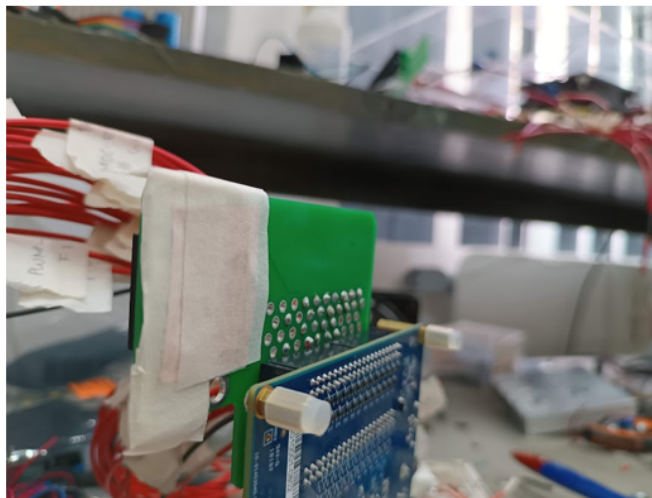


Figura 3.53: Aislamiento de módulo wifi.

Una vez terminada la placa de expansión es necesario colocarla en el FPGA cuidando muy bien no dañarla, ya que es muy sensible, así que con cuando se coloca dentro del FPGA.

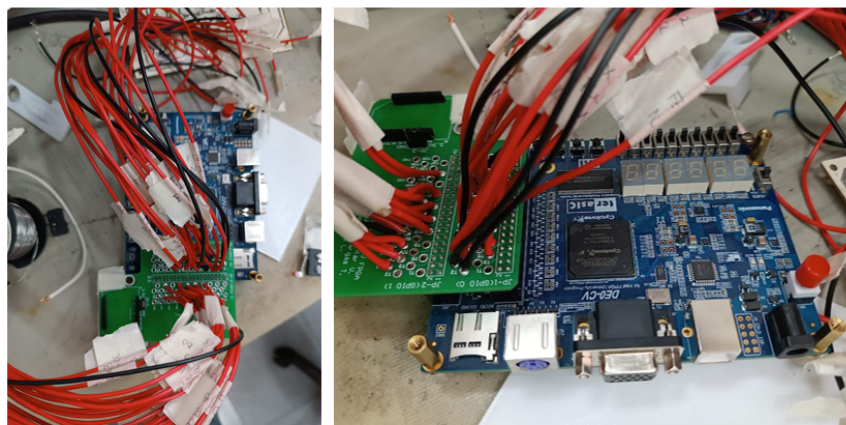


Figura 3.54: Aislamiento de módulo wifi.

3.3.2. Cambio de Fines de Carrera

Existen muchos tipos de sensores que pueden suplir a los fines de carrera mecánicos, un ejemplo claro son los sensores de proximidad, son componentes de mando electrónico que se diferencian básicamente de un interruptor de carrera mecánica por el hecho de operar electrónicamente, por aproximación, es decir, sin contacto físico. Los sensores inductivos se utilizan en procesos de automatización industrial para detectar materiales metálicos. Ya los sensores capacitivos pueden detectar cualquier tipo de material, inclusive a través de algunos objetos, siempre que estos no sean metálicos. [19] En este caso se va a implementar un sensor de tipo inductivo, para suplir a los mecánicos, este muestra en la Figura 3.55. Dentro de esta configuración



Figura 3.55: Sensores inductivos.

de sensores existen otras categorías, hay sensores de proximidad de 2 y 3 cables, y los sensores de proximidad de 3 cables son más populares. Hay dos tipos principales de sensores de proximidad según su tipo de salida: NPN y PNP. La diferencia de entre estos tipos de sensores se muestran a continuación. [20]

- Los sensores de proximidad NPN proporcionan una salida BAJA activa. Esto significa que cuando un objeto entra en el rango de detección del sensor, la

salida del sensor se conecta a tierra. Este tipo de sensor también se conoce como “hundimiento” sensor.

- Los sensores de proximidad PNP proporcionan una salida ALTA activa. Cuando un objeto entra en el rango de detección del sensor, la salida del sensor se conecta con + 24 V. Cuando se conecta a una entrada de PLC, lo detecta como una señal lógica ALTA. Los sensores de proximidad PNP también se conocen como “sourcing” sensores.

Teniendo en consideración lo antes mencionado se eligió el sensor del tipo PNP de 3 hilos, Es decir 2 hilos son para la alimentación, el voltaje puede ir de 5 a 36 volts, el tercer cable es para la señal la cual es Alto o bajo. La conexión del sensor se muestra en la Figura 3.56

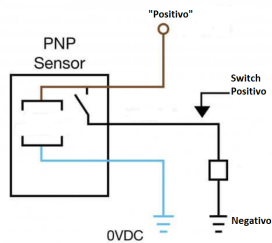


Figura 3.56: Fines de carrera inductivos.

El cable café es la alimentación, el cable azul se manda a tierra y el negro es la señal. Para Poder montar este tipo de sensores es necesario una estructura que vaya fija a alguna parte del robot, para realizar los soportes se realizó el diseño en 3D utilizando un software CAD, y se montaron al robot.

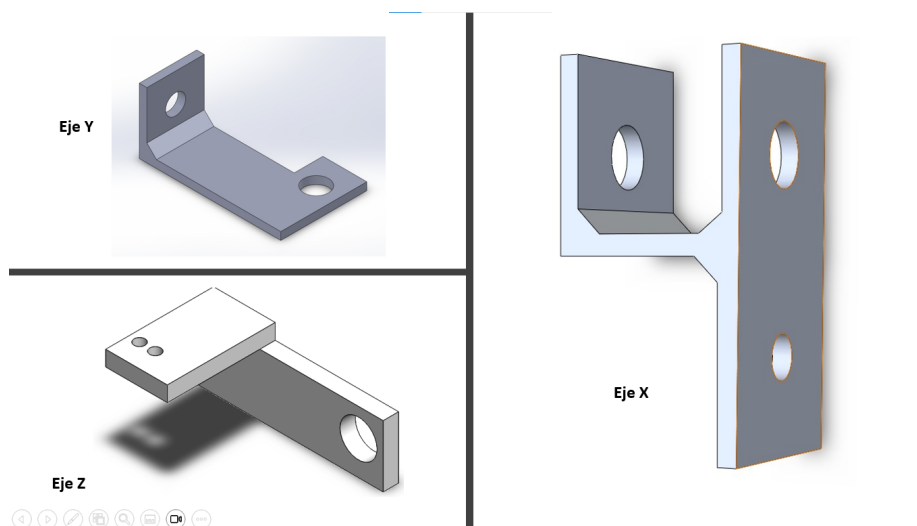


Figura 3.57: Diseño de Los soportes.

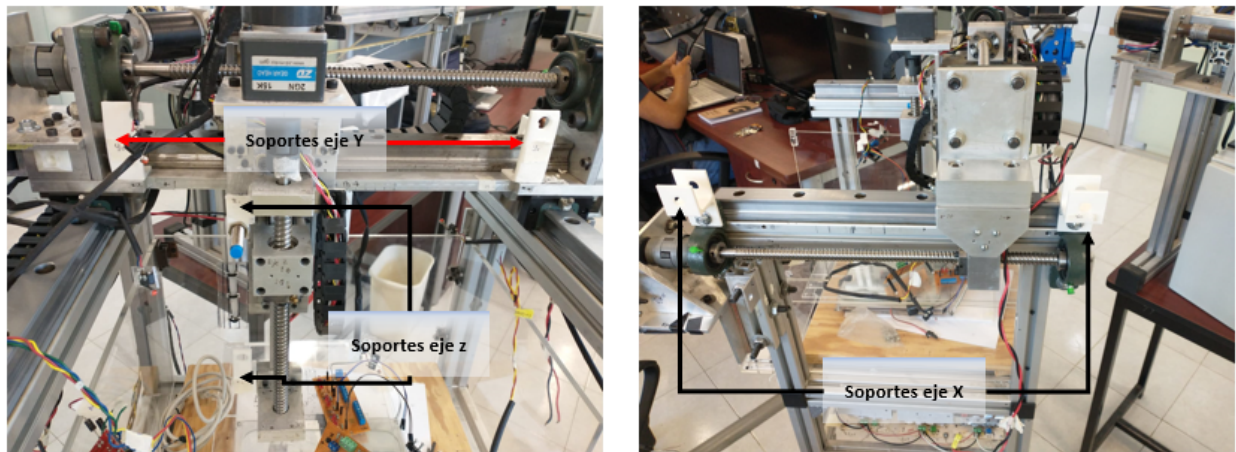


Figura 3.58: Montaje de Soportes.

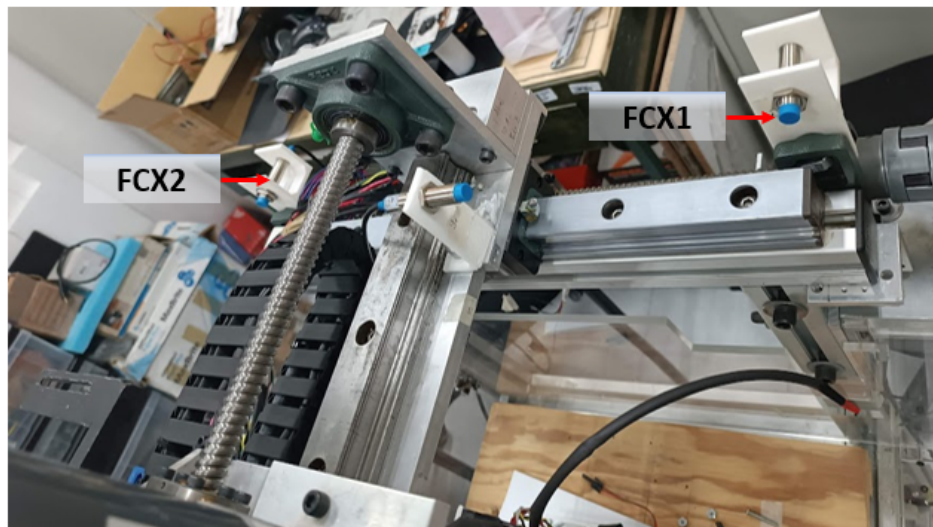


Figura 3.59: Sensores montados eje X.

3.3.3. Tarjeta Fines de carrera

Al realizar el cambio de fines de carrera es necesario acoplar las señales de una manera distinta a como se venía haciendo, fue necesario realizar una tarjeta nueva para permitir que el FPGA detecte las señales, para poder realizar esa tarea se aplicaron divisores de voltaje para que a la salida se tenga un voltaje de 3.3 Volts.

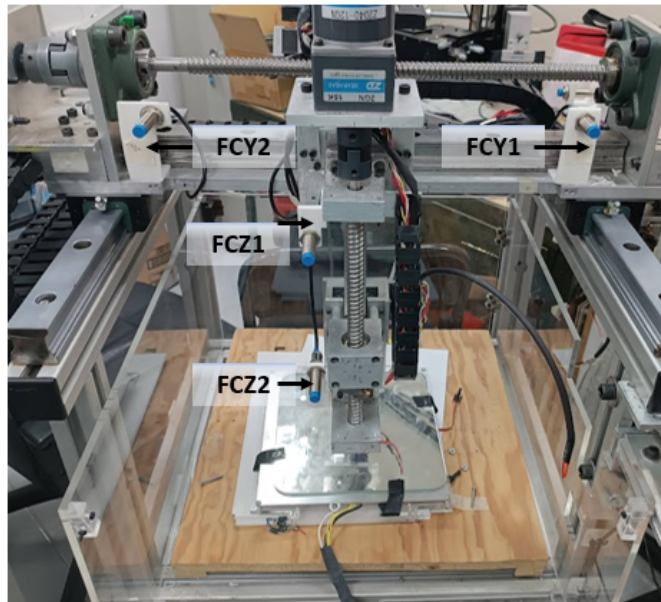


Figura 3.60: Sensores montados eje Y y Z .

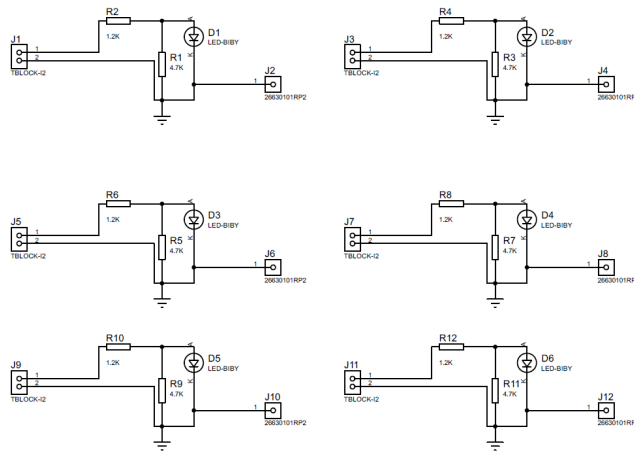


Figura 3.61: Conexión de fines de carrera.

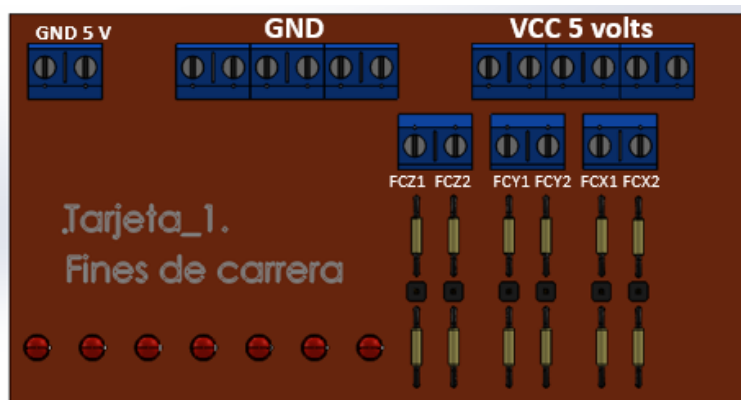


Figura 3.62: Diseño de la tarjeta.

3.3.4. Aislamiento de señales

Como se mencionó anteriormente, todos los cables van juntos, provocando interferencia a las señales que llevan poca corriente, es por eso que se separaron todos los cables, y aislando cada uno de ellos. se colocaron cadenas nuevas para transportar los cables que llevan la parte de potencia.

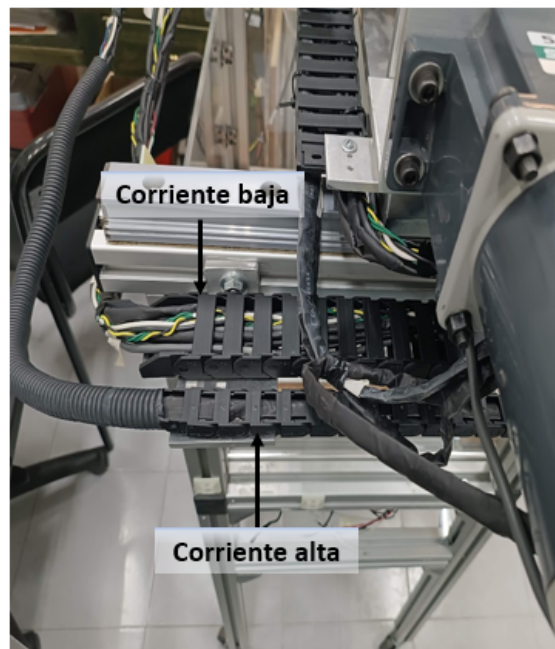


Figura 3.63: Separación de cables de alto y bajo consumo de corriente.

3.3.5. Armado de electrónica

Para llevar un orden cuando se conecten todas las tarjetas, el tamaño para introducir todos los componentes se muestra a continuación

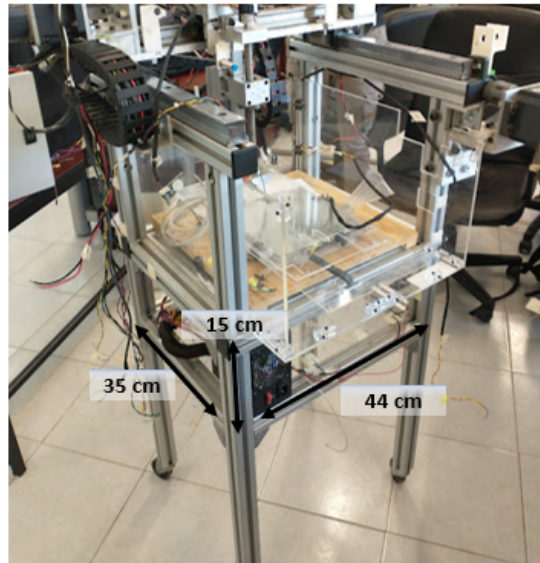


Figura 3.64: Medidas del espacio para interconectar tarjetas.

Podemos observar que el espacio es muy reducido; sin embargo, para optimizar mejor el espacio que se va a utilizar, se realizó un diagrama para acomodar todas las tarjetas lo mejor posible, y dejar espacio para que pasen los cables.

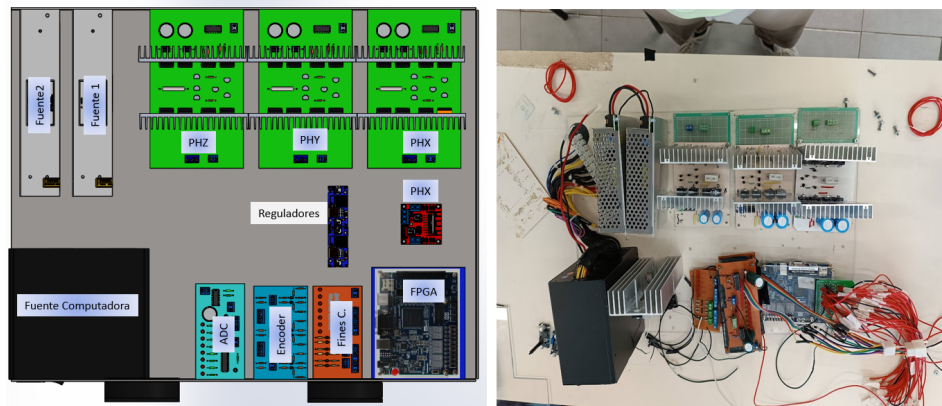


Figura 3.65: Esquema para acomodar circuitos.

Teniendo ya las dimensiones de cómo debe quedar acomodado todas las tarjetas electrónicas, es necesario hacer pruebas de la electrónica, los pasos son:

- Prueba de Comunicación con módulo Wifi
- Lectura de encoder

- Lectura de Fines de Carrera
- Prueba de PWM con puente H

Todas las pruebas se deben hacer fuera del área donde se debe conectar la electrónica para verificar su correcto funcionamiento, siguiendo los pasos mencionados anteriormente, una vez que cada elemento funcione de la manera correcta se procede a acomodar la electrónica.

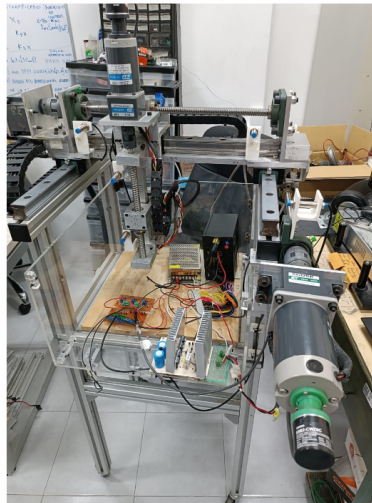


Figura 3.66: Esquema para acomodar circuitos.

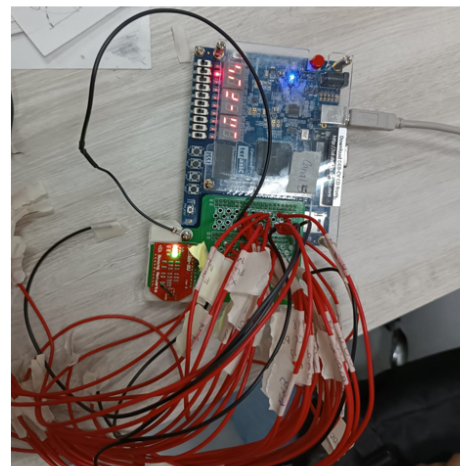
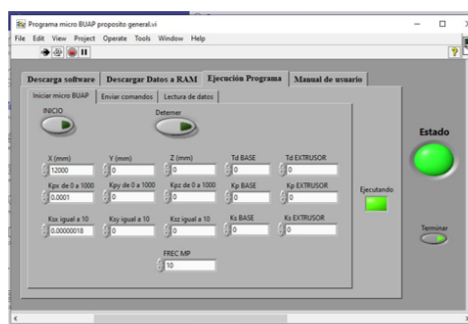


Figura 3.67: Comunicación PC con FPGA.

Ademas los pines de entrada y salida del FPGA están completamente marcados.

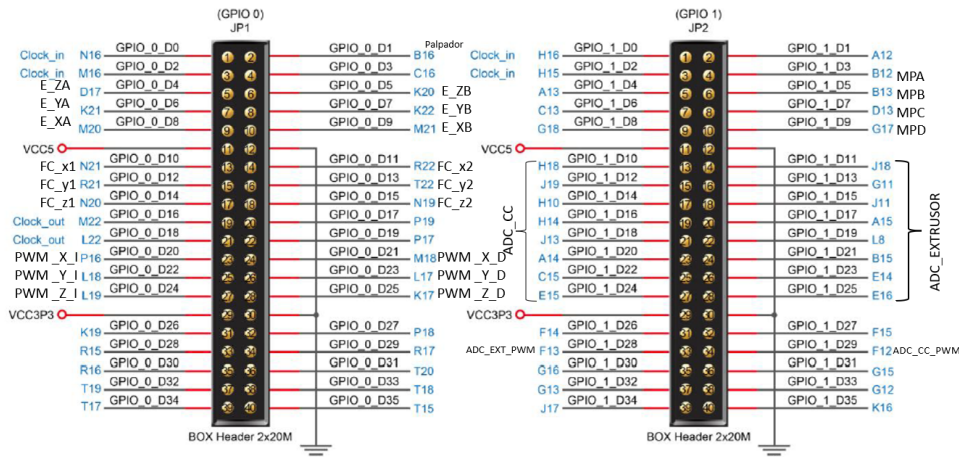


Figura 3.68: PINES FPGA.

Teniendo la información adecuada de los pines de entrada y salida, se comenzó a conectar cada uno de los elementos, la alimentación de cada una de las tarjetas es de suma importancia, los voltajes se muestran en la siguiente tabla:

Fuente	Tarjeta
Fuente PC. 5 volts	Puente H 3 ejes, Tarjeta fines Carrera, encoder, ADC, tarjeta palpador.
Fuente 1	Alimentación puente H eje X
Fuente 1	Alimentación puente H eje Y
Fuente PC 12 volts	Puente H eje X

Tabla 3.10: Tabla de Verdad Circuito

Para evitar que las tarjetas se muevan, se fijaron al acrílico, todas las tarjetas, y se comenzaron a conectar dentro del espacio designado. Todo soldado y atornillado con las clemas evitando usar Jumpers.

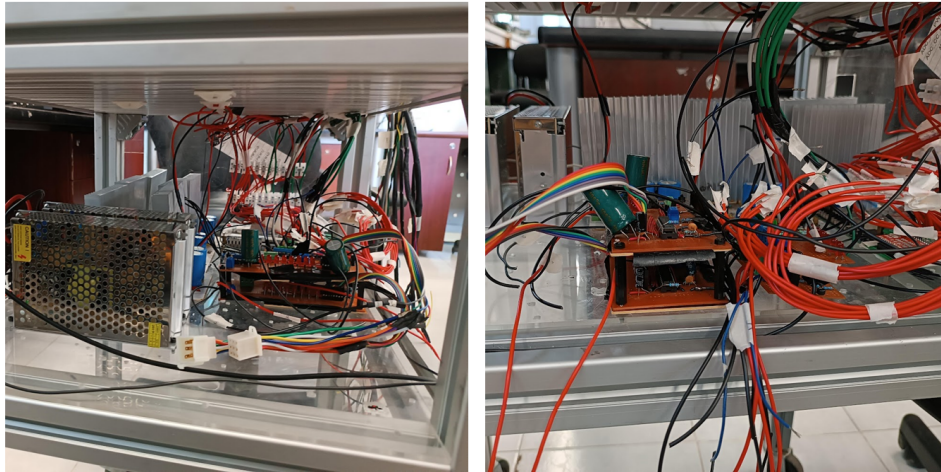


Figura 3.69: Proceso de Conexión.

Lo primero en conectar fue los puentes H, con sus respectivas fuentes, recordando que los motores al consumir 10 amperes el calibre del cable para la alimentación de los puentes H en los 12 volts debe ser 12AWG ya que si no, no aguantaría. Además de cablear la tarjeta diseñada

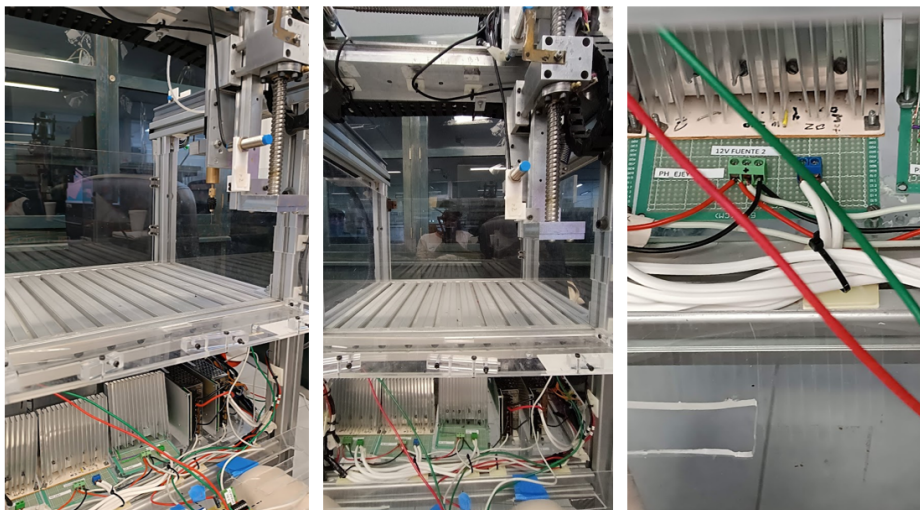


Figura 3.70: Interconexión de etapa de potencia.

Todas las señales que van del FPGA hacia las tarjetas, están conectadas a clemas, esto por si se requiere dar mantenimiento sea posible desconectar de manera rápida además de que están marcadas de tal manera que sea fácil identificar cada una de las señales, y hacia que tarjeta va, además de conectar

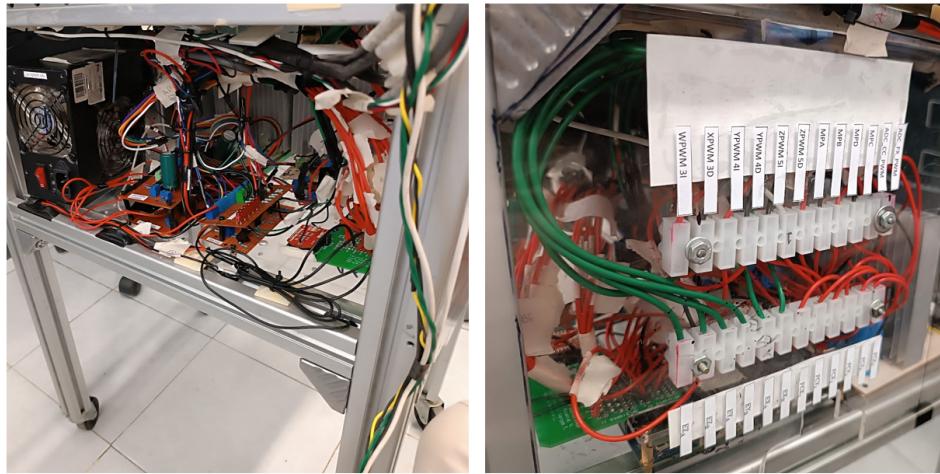


Figura 3.71: Conexión de señales dentro del robot.

Después de realizar la conexión de cada uno de los elementos del robot, en cuanto a la electrónica se realizaron pruebas de funcionamiento.

3.3.6. Elementos mecánicos

Para tener un buen desempeño en el robot es indispensable que la parte mecánica funcione de manera correcta, todo sistema mecánico tiene un desgaste con el tiempo, se realizó la revisión para cada eje, el único eje que presentaba problemas era el eje X, así que se alineó ya que presentaba algunos problemas en el movimiento. Se engrasó la parte de la tuerca del tornillo embalado.

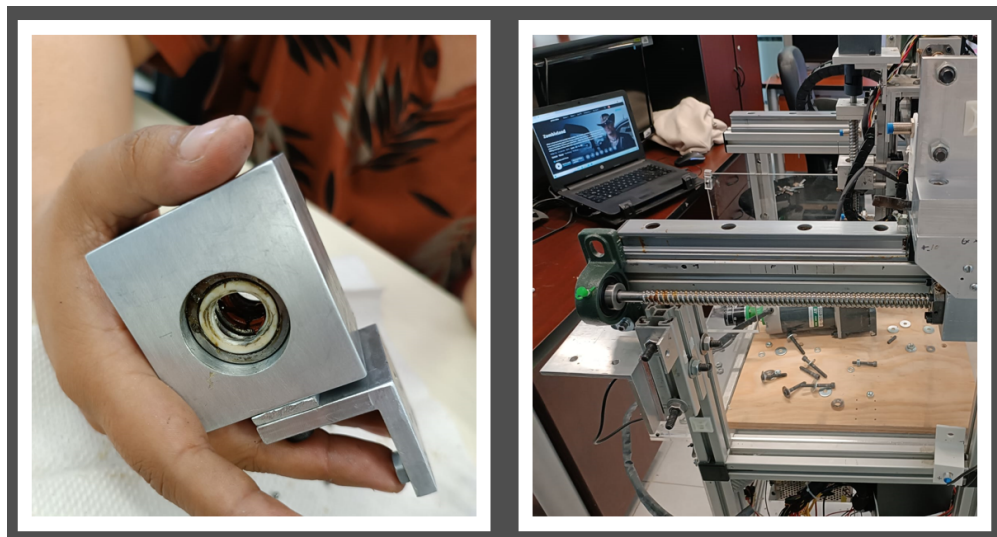


Figura 3.72: Alineación y mantenimiento Tuerca.

Dentro del sistema se tienen coples los cuales se encargan de conectar el eje del motor y el tornillo, esto para realizar un movimiento más suave.



Figura 3.73: Cople.

Dentro del cople se encuentra una goma, la cual lleva el nombre de estrella de Neopreno , en este caso es del numero 0.5, la que tenia originalmente se encontraba en malas condiciones ya que no quedaba a la medida debido al uso, asi que se cambi6 para tener un mejor movimiento.



Figura 3.74: Estrella de Neopreno.

3.4. Conclusiones

El dejar una electr6nica robusta y andar cambiando todos los cables es necesario, ya que se requiere que el robot pueda estar trabajando por bastantes horas y no tenga ning6n inconveniente, as6 que es necesario dejar una electr6nica robusta capaz de soportar el trabajo. Construir el Hardware del palpador hace que el robot pueda comenzar a realizar el escaneado, adem6s de que darle mantenimiento resulta f6cil ya que puede desarmarse.

Capítulo 4

Metodología para mejorar el rendimiento del robot

Para hacer que el robot tenga un buen desempeño se tiene una metodología desarrollada en la Maestría Ciencias de la Electrónica opción Automatización (MCEA) que se puede consultar en [18], se deben seguir una serie de pasos, los cuales se muestran en el siguiente diagrama.

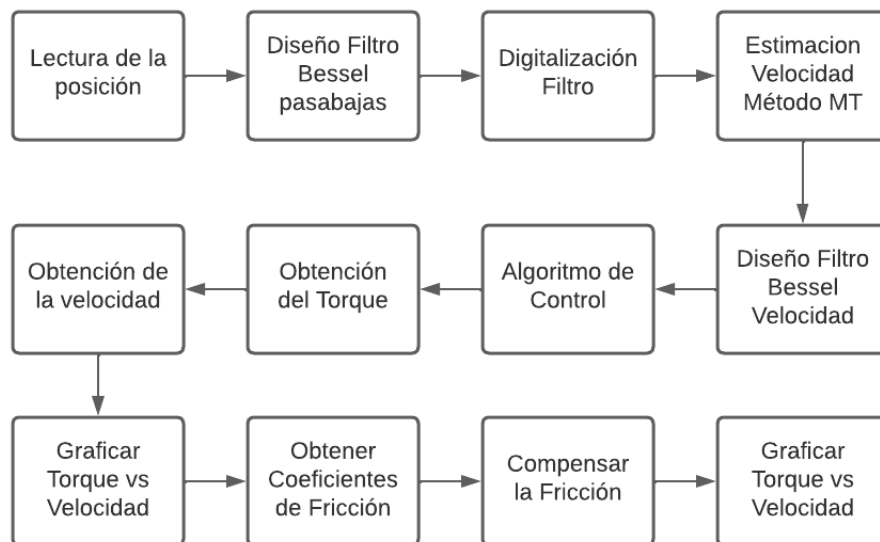


Figura 4.1: Metodología para el robot.

4.0.1. Método MT usada para eliminar error de cuantificación de velocidad

Cuando se realiza el proceso de muestreo de una señal y la cuantificación, se produce una pérdida de información en términos de la cantidad de datos, sino que también existe la posibilidad de perder el instante exacto en el cual se produce un cambio en la señal en tiempo real. Este aspecto se vuelve especialmente relevante cuando se necesita conocer con precisión el valor del tiempo en el cual ocurrió el cambio. Un ejemplo práctico es cuando se requiere utilizar el valor de posición interpretado por un sistema digital. En situaciones donde el sensor no opera con el mismo reloj que el sistema digital, se puede observar el desafío ilustrado en la Figura 4.2

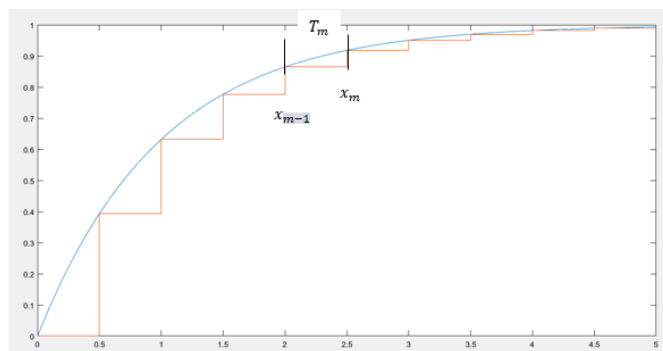


Figura 4.2: Muestreo de Posición

Se puede observar que si tomamos los datos de la posición y el muestreo para calcular la velocidad se obtendrán errores, esto debido a que cuando se guarda el valor de la posición puede recién haber cambiado o estar punto de volver a cambiar, ese desfase afectara la estimación de la velocidad, también en casos donde la posición no cambia entre lecturas no por haberse detenido sino porque el movimiento es muy lento, por lo que se generan ceros indeseado, para poder corregir esto se propone emplear el método MT. La velocidad se estima comúnmente mediante el método M, el cual involucra calcular la diferencia entre los valores medidos en el encoder durante intervalos de tiempo de muestreo. El nombre "M" proviene de "medición". Además, existe otro método conocido como método T, en el cual se mide el valor deseado utilizando el inverso del reloj auxiliar. Su nombre proviene de "tiempo". La combinación de estos dos métodos se conoce como el método MT, que empleamos con el propósito de reducir el error de cuantificación en la velocidad.

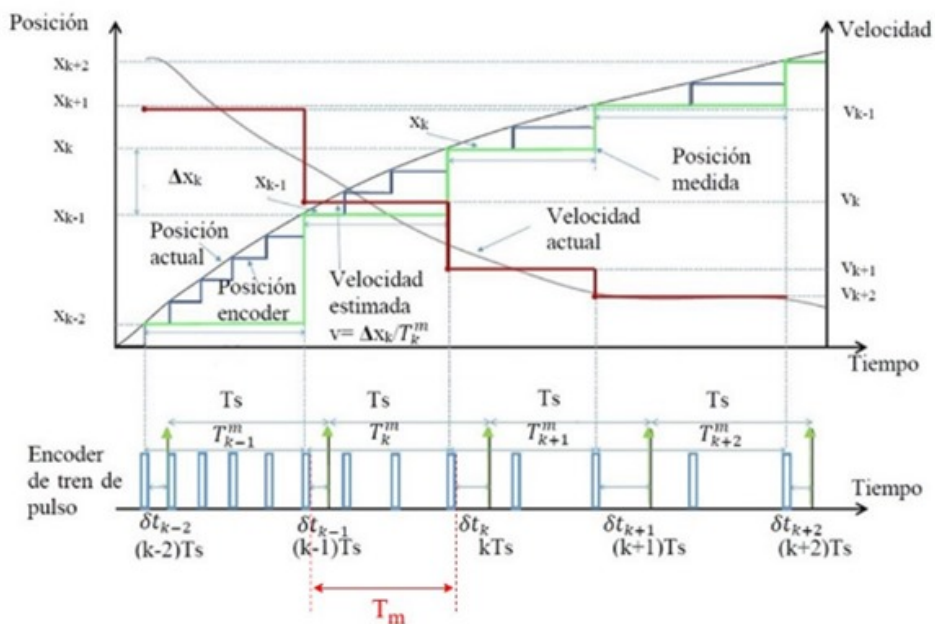


Figura 4.3: Método MT calculo de la velocidad

La siguiente ecuación permite estimar la posición al considerar los desfases que resultan de la diferencia de tiempo entre el cambio registrado en el encoder y el momento de la lectura de la posición según el método MT.

$$V_m^{MT} = \frac{x_k - x_{k-1}}{T_s + \delta t_{k-1} - \delta t_k} \quad (4.1)$$

donde x_k es la posición actual, x_{k-1} es la posición pasada y T_m es el intervalo de muestreo δt_{k-1} es la diferencia entre el cambio de la posición previo al anterior ciclo de muestreo y δt_k . El obtener la velocidad a la que se están moviendo los motores, es muy importante, ya que se pueden controlar de una mejor manera, así que implementando este método podemos obtener la velocidad acertada.

4.0.2. Control de lazo cerrado del sistema CNC

A continuación, se realiza un breve desarrollo del control de robot original del robot, el cual resulta ser un control de posición basado en una tangente hiperbólica, lo que permite tener una acción de control acotada a manera de evitar que sobrepase los límites físicos de los motores al proporcionar el par adecuado. Adicionalmente, este tipo de controles tienen un sustento científico bien definido, desarrollado y justificado en la literatura que se basa en su capacidad de operar un actuador en la parte lineal de la gráfica de caracterización de este, lejos de los límites de saturación que podrían generar otro tipo de fenómenos físicos que tienden a alterar la precisión de los sistemas. Se tiene el siguiente diagrama a bloques, en la cual se ve la lógica empleada para cerrar los lazos de control del sistema, obteniendo de esta forma lo que anteriormente denominamos control de posición.

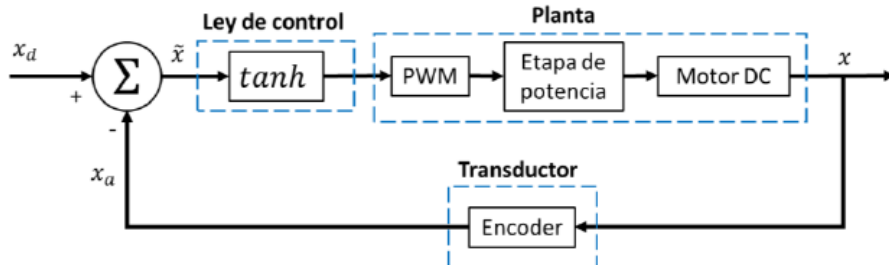


Figura 4.4: Lazo de Control con retroalimentación en Posición.

En este diagrama a bloques es posible observar también que la retroalimentación de la posición ocurre por medio del sensor del robot (en este caso el encoder del motor), lo que permite obtener la variable denominada como error, la cual constituye la base de nuestra ley de control y del atractor correspondiente a su punto de equilibrio. Sin embargo, esto por sí solo no es suficiente para el tipo de control que se maneja (Proporcional-Derivativo modificado con tangente hiperbólica) por lo que es necesario agregar una acción al control para realimentar no solo la posición, sino también la velocidad del sistema. Es importante notar que, al involucrar la velocidad, se obtiene un control más complejo donde se empieza a generar una regulación basada en dos variables de entrada en contraste con un control más simple, como lo sería en control proporcional el cual solo posee una variable de entrada. Esto genera que el control desarrollado sea más robusto, dado que, a pesar de la complejidad, permite mejorar sus características y su eficiencia. [?]

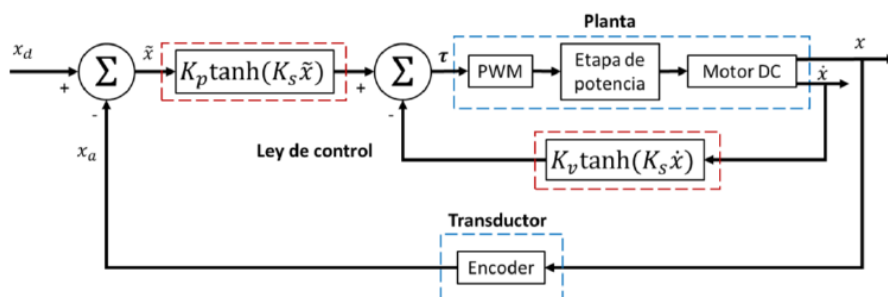


Figura 4.5: Lazo de Control con retroalimentación en Posición y Velocidad.

Como podemos ver es necesario Obtener la velocidad, para esto es necesario seguir un procedimiento para obtenerlo. En la Figura 14 se observa que se tiene la retroalimentación de la posición y la velocidad del robot, con lo que obtenemos una ley de control más compleja dada por la ecuación:

$$\tau = K_p tanh(K_s \tilde{X}) - K_v tanh(K_s \dot{X}) \quad (4.2)$$

Donde:

- K_p es la ganancia proporcional y es definida positiva.

- K_v es la ganancia derivativa y es definida positiva.
- K_s es la pendiente del control tangente hiperbólica $\tanh(K_s \tilde{X})$ y de la acción derivativa $\tanh(K_s \dot{X})$ y es definida positiva.
- \tilde{X} es el error de posición, definido como la diferencia entre la posición deseada y la posición actual, es decir $\tilde{X} = X_d - X_a$

Para implementar esta ley de control en el sistema, se tiene que implementar una metodología conjunta con el Firmware del sistema, que permita obtener las mediciones requeridas para procesar la ley de control y dar una entrada de energía al sistema. Esto se logra mediante una lógica bien definida consistente en obtener la posición actual del motor por medio de la lectura del encoder y de esta forma obtener el error por medio de una resta con la posición deseada. De esta forma se puede procesar la primera parte de la ley de control. Para la siguiente parte es necesario obtener la posición actual y la posición anterior, lo que permite calcular de manera numérica la velocidad del sistema y de esta forma procesar la segunda parte del modelo de control. De esta forma, la ley de control es capaz de dar una cantidad de torque en base a las dos entradas y de esta forma regular el sistema en lazo cerrado y que forma la base del control del robot sobre el que se trabajará para diseñar una mejora que incluya la compensación de la fricción.

Control de Trayectoria

Cuando se habla de pasar de un control de posición a un control de movimiento, el tema se considera como uno de los más importantes de la robótica. Un control de trayectoria, se puede decir que representa el problema más general de control en robots y su aporte a la robótica consiste en la capacidad de realizar movimientos de alta velocidad y con alto grado de exactitud que a menudo no son posibles de lograr con un control de posición. Un control de movimiento se encarga de manipular al robot para que se mueva libremente en su espacio de trabajo siguiendo una trayectoria deseada en posición y velocidad sin necesidad de interactuar con su medio ambiente. Una diferencia fundamental entre un control de posición y un control de trayectoria o de movimiento, es que este último incluye la dinámica completa del robot manipulador en la estructura matemática del controlador, es decir, se basa en el modelo dinámico del robot. Es por esto, que el diseño y realización de uno de estos controladores es mucho más complejo y es por esto también por lo que la nueva ley de control adquiere una exactitud, desempeño y robustez que dependen del grado de precisión con que se conozcan los parámetros dinámicos que se involucran en la descripción matemática del modelo dinámico del robot.

Una propuesta ya estudiada de control de trayectoria consiste en el control PD+. Este tipo de control representa un algoritmo que incluye un control proporcional del error de posición, un control proporcional del error de velocidad y la dinámica completa del robot [22]. La ecuación de control PD+ esta dada por la ecuación:

$$\tau_{pd} = K_p \tilde{q} + K_v \dot{\tilde{q}} + M(q) \ddot{q}_d + C(q, \dot{q}) \dot{q}_d + B \dot{q}_d + g(q) \quad (4.3)$$

Como es observable en la ecuación, para poder aplicar este tipo de control a un mecanismo, es necesario conocer el modelo dinámico del robot con el que se está trabajando, lo que implica conocer el valor numérico de sus parámetros dinámicos. La ecuación a lazo cerrado involucra el modelo dinámico y el esquema de control PD+. Generalizando para el robot Cartesiano.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + B\dot{q} + g(q) \quad (4.4)$$

donde:

- q es el vector de posiciones del robot.
- \dot{q} corresponde al vector de velocidades del robot.
- \ddot{q} es el vector de aceleraciones del robot.
- $M(q)$ es la matriz de masas e Inercias del Robot
- B corresponde a la matriz de coeficientes de fricción viscosa del mecanismo.
- $g(q)$ es el vector de pares gravitatorios del robot.

Adicionalmente se, se establece que $q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$ son funciones vectoriales que representan la posición, velocidad y aceleración deseadas de manera respectiva, por lo que el problema de control de movimiento se puede expresar como la capacidad de hallar una función vectorial τ tal que las posiciones y velocidades asociadas al robot sigan con exactitud a las posiciones y velocidades deseadas respectivamente. La ecuación de trayectoria propuesto es :

$$\tau_{pd} = K_p \tanh(K_s \tilde{q}) + K_v \tanh(K_s \dot{\tilde{q}}) + M(q)\ddot{q}_d + C(q, \dot{q})\dot{q}_d + B\dot{q}_d + g(q) \quad (4.5)$$

4.0.3. Efecto del muestreo

La transformada de Fourier es una transformación integral de $f(t)$ de dominio temporal al dominio de frecuencia. [23]

$$\mathbf{F}(w) = \mathbf{F}(w)[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (4.6)$$

En general, $\mathbf{F}(w)$ es una función compleja, su magnitud es el espectro de amplitud, mientras que su fase se llama espectro de fase, entonces $\mathbf{F}(w)$ es el espectro.

En los sistemas analógicos, las señales se procesan en su totalidad, sin embargo, cuando se habla de sistemas digitales se requieren de muestreo de señales para procesar. Esto es posible gracias al teorema de muestreo que realiza con un tren de pulsos. Considerando una señal continua $g(t)$, se puede multiplicar por un tren de pulsos $\delta(t - nT_s)$, siendo T_s el *intervalo de muestreo*, donde $f_s = 1/T_s$ es la tasa de muestreo, la señal muestreada es por consiguiente:

$$g_s(t) = g(t) \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(nT_s)\delta(t - nT_s) \quad (4.7)$$

Obteniendo su transformada de Fourier:

$$G_s(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(nT_s) \mathbf{F}[\delta(t - nT_s)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(nT_s) e^{jn\omega T_s} \quad (4.8)$$

La validez del teorema de muestreo puede demostrarse por medio de la propiedad de modulación o de la propiedad de convolución en las frecuencias de la transformada de Fourier, teniendo en cuenta que $\omega_s = 2\pi/T_s$.

$$G_s(\omega) = \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} G(\omega - n\omega_s) \quad (4.9)$$

Se concluye entonces que la densidad espectral (Transformada de Fourier) de la señal muestreada $g_s(t)$ es, dentro de un factor constante, exactamente la misma que la de $g(t)$ dentro del ancho de banda original. Además, se repite periódicamente cada ω_s , radianes por segundo. Las réplicas de la densidad espectral original son marcadas por las amplitudes de los coeficientes de la serie de Fourier, como se puede observar en la Figura 4.7

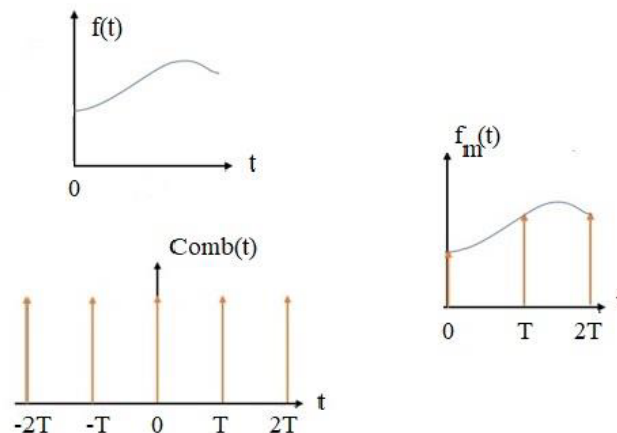


Figura 4.6: Muestreo de una señal en el tiempo

Entonces se tiene que, Una señal limitada de ancho de banda, sin componentes de frecuencia mayores que W Hertz, puede recuperarse completamente a partir de muestras tomadas con una frecuencia al menos dos veces superior que $2W$ muestras por segundo: (Sadiku pp 839)

Si se modifica el muestreo, al aumentarla, entonces ω_s aumenta, por lo tanto, T disminuye y todas las réplicas de $\mathbf{F}(\omega)$ se alejan. Por otra parte, si se reduce la razón de muestreo w_s disminuye, por lo que T crece y todas las réplicas se acercan. Esto provoca que a partir de cierto punto cierta reducción provocará el solape de densidades espectrales.

$$\frac{2\pi}{T} = 2W$$

Remplazando $W = 2\pi B$ se tiene que:

$$T = \frac{1}{2B} \quad (4.10)$$

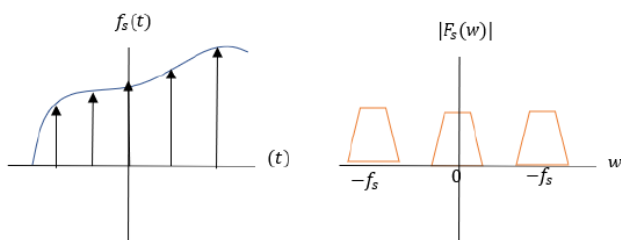


Figura 4.7: Espectros de las señales en el proceso de muestreo

En este punto todas las réplicas de la densidad espectral original son tangentes entre sí y puede usarse un filtro pasa-bajas ideal para poder recuperar la señal original. Por lo tanto:

$$\frac{1}{T_s} = f_s \geq 2W \quad (4.11)$$

La frecuencia de Muestreo $f_s = 2W$ se conoce como *Frecuencia o razón de Nyquist* y $1/f_s$ es el *intervalo de Nyquist*

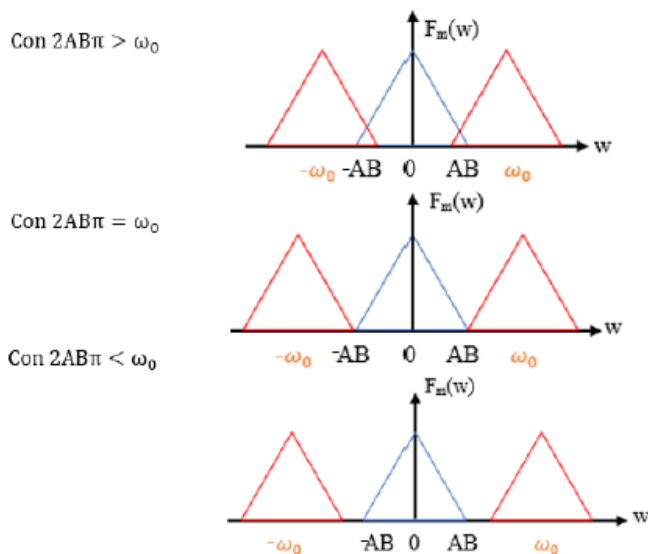


Figura 4.8: Diferentes Frecuencias de muestreo

4.0.4. Filtro Pasa-bajas

Los filtros son dispositivos, los cuales se diseñan para dejar pasar una señal con alguna frecuencia deseada. Como un dispositivo selectivo de frecuencia, es posible utilizar un filtro para limitar el espectro de frecuencias de una señal en cierta banda de frecuencias específica. Los filtros son los circuitos que se utilizan en los receptores de radio y de televisión que permiten sintonizar una señal deseada entre una multitud de señales de transmisión.

Existen distintos tipos de filtros, en este caso en particular se necesita emplear un filtro pasa-bajas, este se encarga de pasar frecuencias bajas, y atenúa frecuencias altas, la respuesta de un filtro ideal pasa-bajas se muestra en la Figura ??

En la figura 2.7, se puede ver que el efecto de muestreo, en el dominio de la frecuencia, se tienen la repetición del espectro, el objetivo del filtro pasa-bajas es recuperar la señal, como se muestra en la Figura 4.9.

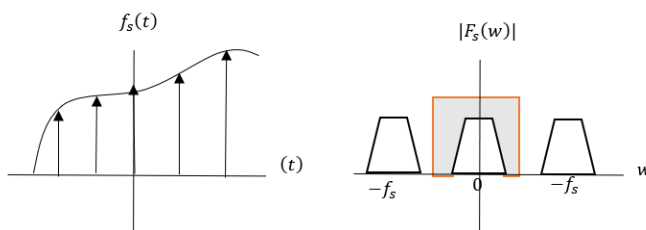


Figura 4.9: Filtro Pasa-bajas

Dentro de la literatura existen gran variedad de filtros que pueden ser implementados sin embargo en [18] se demuestra que el mejor filtro para la aplicación que se está realizando es el de tipo Bessel

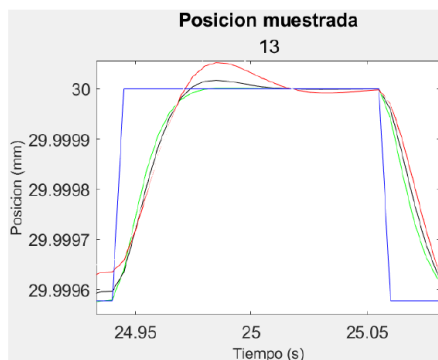


Figura 4.10: Filtro Pasa-bajas tipo Bessel

En la Figura 4.10 tenemos la respuesta de tres filtros para la posición muestreada (línea azul), la respuesta verde es la del filtro Bessel, Tchebyshev rizo 1 hz(Rojo), Butterworth (Negro). Como se puede ver solo el Bessel no presenta un Rizo lo cual lo deja como el filtro más útil de los revisados para recuperar la señal, a cambio se requerirá una frecuencia de corte alejada de la función pues su retardo de fase será mayor, pero debido a que trabajamos a altas frecuencias de lectura en comparación a la frecuencia a muestrear no es un problema. La función de transferencia que tiene un filtro Bessel viene dada por la siguiente expresión :

$$H(s) = \frac{1}{B_n(s)}, B_n(s) = \sum_{k=0}^N a_k s^k \quad (4.12)$$

Donde $B_n(s)$ es el polinomio de Bessel cuyos coeficientes son:

$$a_k = \frac{(2N - k)!}{2^{N-k} * k!(N - k)!} \quad (4.13)$$

Para realizar el filtro se utilizan tablas, ya predeterminadas, que nos entregue la función de transferencia, en la siguiente ecuación encontramos la función de transferencia.

$$\frac{1}{(1 + a_{1,1}s + a_{1,2}s^2) * (1 + a_{2,1}s + a_{2,2}s^2) * \dots * (1 + a_{n,1}s + a_{n,2}s^2)} \quad (4.14)$$

Podemos representar el filtro en forma de variable de estado, y pasarlo a su expresión digital, debido a que se requiere que el filtro sea digital.

$$x((k + 1)T) = e^{AT}x(kT) + \left(\int_0^T e^{A\tau} d\tau \right) Bu(kT) \quad (4.15)$$

De esta forma podemos Obtener 2 matrices G y H, las cuales calculamos y metemos dentro del Software para poder Filtrar los datos obtenidos en este caso serían los datos de posición, velocidad, aceleración.

4.1. Distribución Normal o Gaussiana

La función de probabilidad normal, la cual también lleva el nombre de función de Gauss, es una función de probabilidad para variables aleatorias, este tipo de distribución es importante por tres grandes razones [24]:

- Existen muchos fenómenos continuos que parecen seguirla o se pueden aproximar mediante ello.
- Se puede utilizar para aproximar distribuciones discretas de probabilidad y de esta forma evitar cálculos engorrosos.
- Por su relación con el teorema central del límite, es la base de l inferencia estadística clásica.

La distribución normal dio inicios con Carl Friedrich Gauss a principios del siglo XIX, al estudiar los errores de medida en los movimientos de los cuerpos celestes, sin embargo se considera también el crédito del descubrimiento por el Francés Abraham de Moivre (1667-1754) [25] . Este tipo de análisis también es conocido como la campana de Gauss. La distribución de una variable normal está completamente determinada por dos parámetros, su media y su desviación estándar. denotadas generalmente como μ y σ , tomando en consideración que $F_k = \frac{n_k}{N}$, el cálculo de la media y la desviación estándar se realizan con las siguientes dos ecuaciones:

$$\mu = \sum_{k=1}^N F_k x_k; \sigma_k^2 = \sum_{k=1}^N \frac{n_k}{N} (x_k - \mu)^2 \quad (4.16)$$

La función de densidad de una distribución normal tiene varios rasgos importantes, la distribución tiene una forma de campana, es simétrica y puede tomar valores entre menos infinito a infinito. Esto quiere decir que los valores centrales de la variable se presentan con más frecuencia que los valores extremos, así por ejemplo en el caso

de los errores de medida, los errores por defecto o por exceso pequeños en valor absoluto se presentan frecuentemente, mientras que los errores grandes, tanto los positivos como los negativos, se observan menos veces.

La expresión matemática que representa una función de densidad con éstas características es la siguiente:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.17)$$

El resultado de la ecuación lo podemos ver en la siguiente Figura:

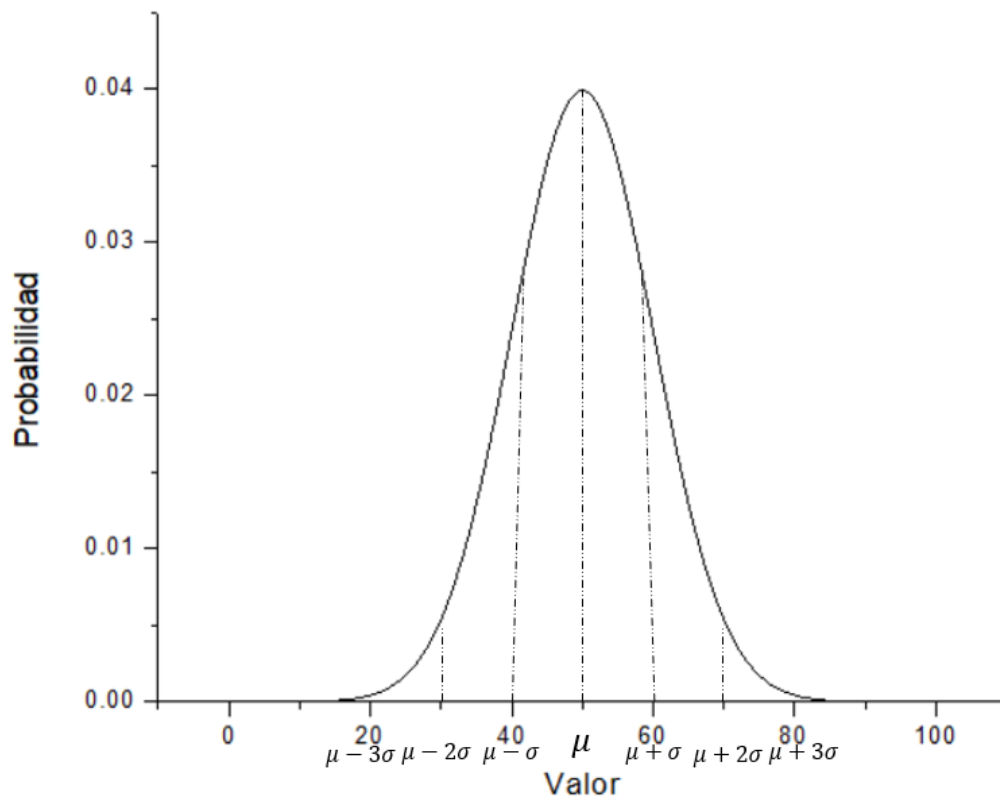


Figura 4.11: Curva de Distribución Normal.

El área total por debajo de la gráfica o curva de Gauss es igual a la unidad (1), además de que existe una relación entre μ y σ

- El área encerrada que esta entre $\mu - \sigma$ y $\mu + \sigma$ equivale al 68 %
- El área encerrada que esta entre $\mu - 2\sigma$ y $\mu + 2\sigma$ equivale al 95 %
- El área encerrada que esta entre $\mu - \sigma$ y $\mu + \sigma$ equivale al 99.7 %

4.2. Rutina de escaneo

Para poder realizar el escaneo de la pieza este se realizo en código D, siguiendo los pasos del diagrama a bloques.

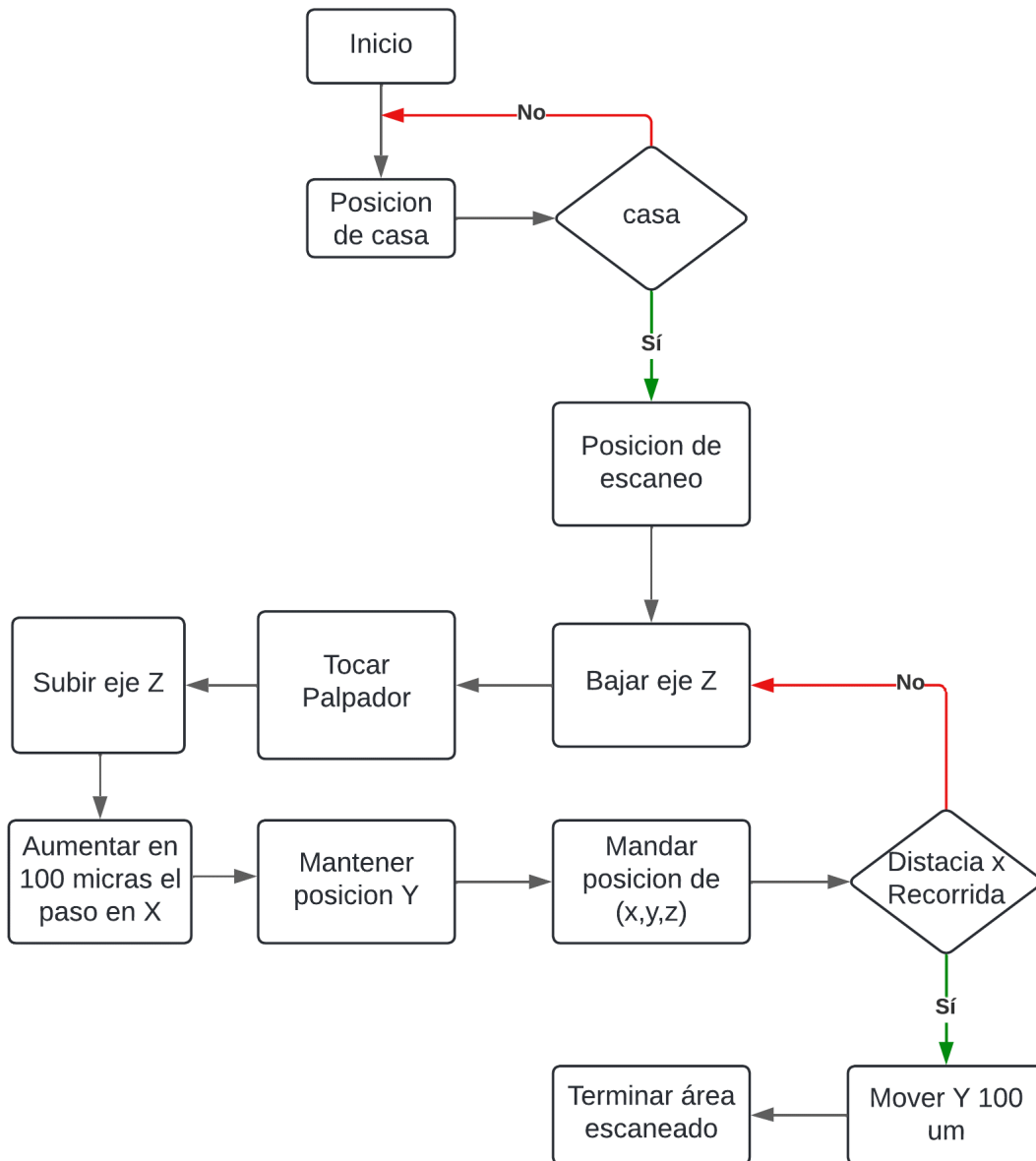


Figura 4.12: Diagrama a bloques para escanear.

Capítulo 5

Resultados experimentales

A continuación se muestran los resultados experimentales para cada eje presente en el robot.

5.1. Eje X

El primer resultado abarca el control sin realizar una compensación de fricción, es decir solo el control de velocidad, posición.

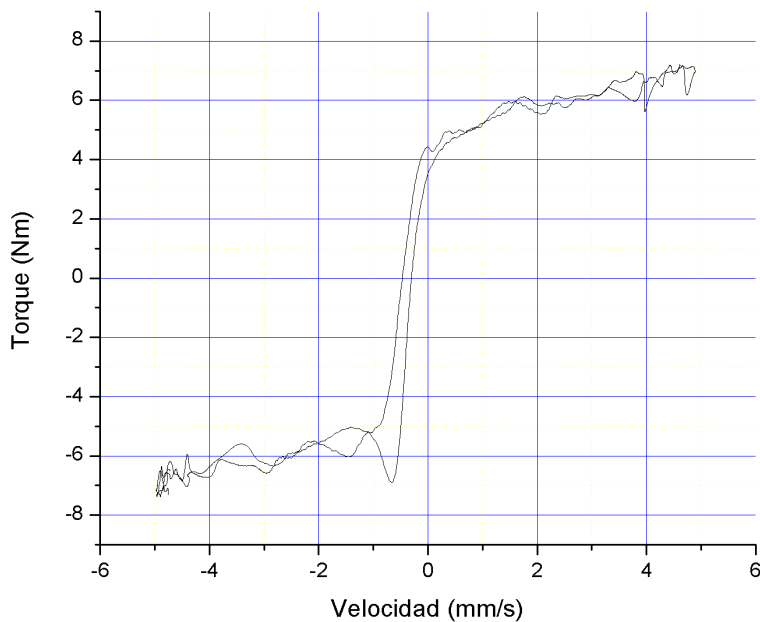


Figura 5.1: Gráfica Torque contra velocidad Eje X sin compensación Fricción.

Se puede apreciar que se tienen los fenómenos de fricción presentes en el sistema lo cual lo hace un sistema no lineal, así que es indispensable compensar esas fricciones presentes.

Después de realizar varias pruebas experimentales, se va ajustando el control de manera que pueda compensarse fricción de coulomb, viscosa y efecto stribek. A continuación podemos observar los datos de Posición velocidad, aceleración y torque, después de compensar los fenómenos de fricción.

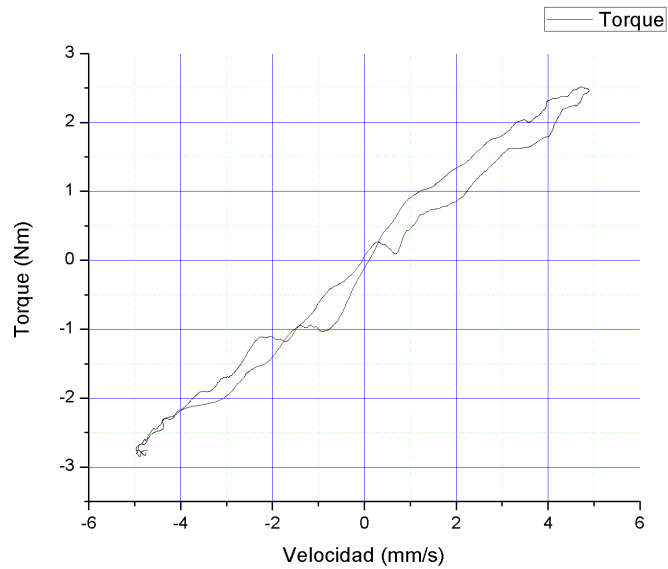


Figura 5.2: Gráfica Torque contra velocidad Eje X, con compensación Fricción.

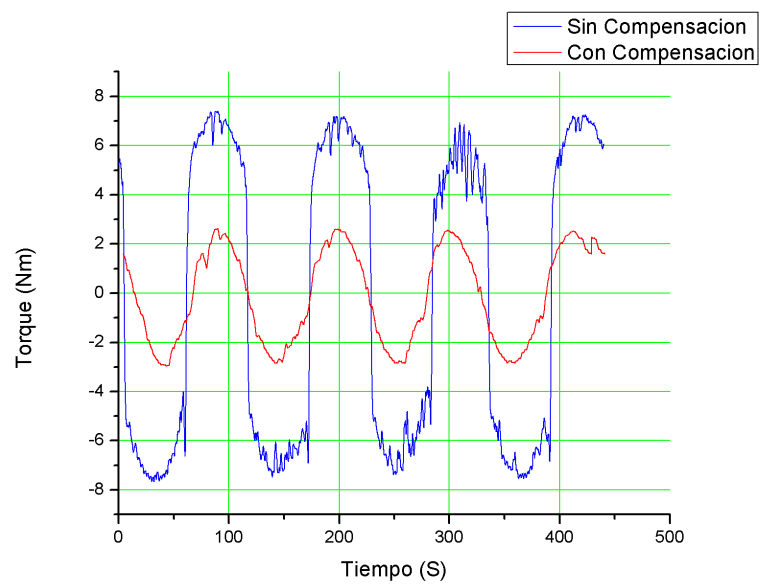


Figura 5.3: Torque eje X sin compensación y con compensación de Fricción.

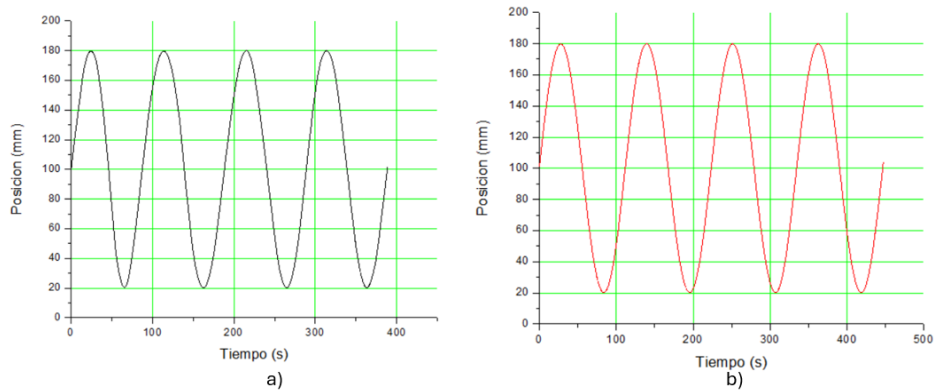


Figura 5.4: a) Posición del robot sin compensación fricción. b) Posición del robot con compensación fricción.

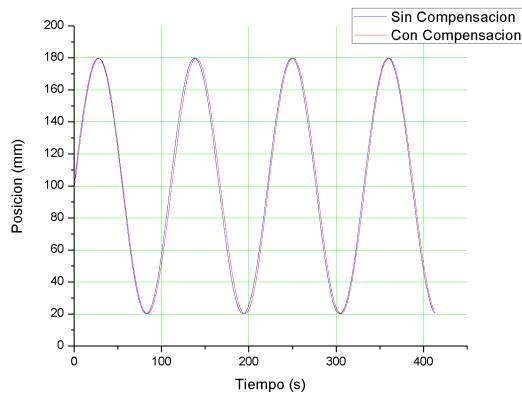


Figura 5.5: Posición Robot.

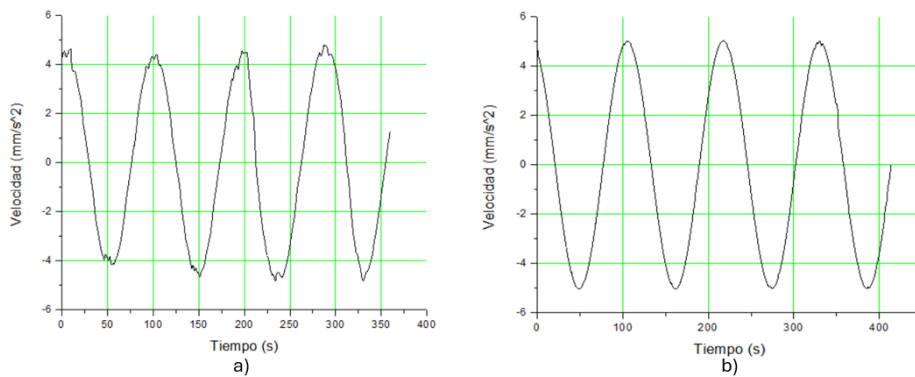


Figura 5.6: a) Velocidad sin compensar. b) Velocidad con compensación.

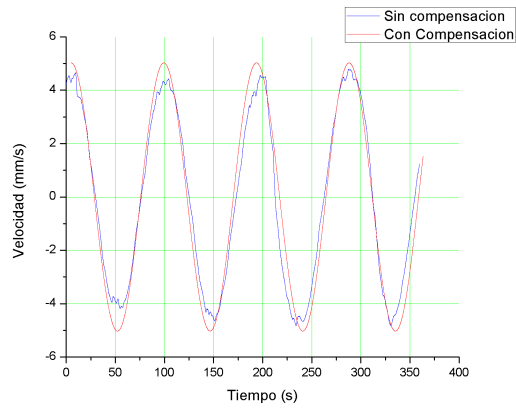


Figura 5.7: Velocidad Robot.

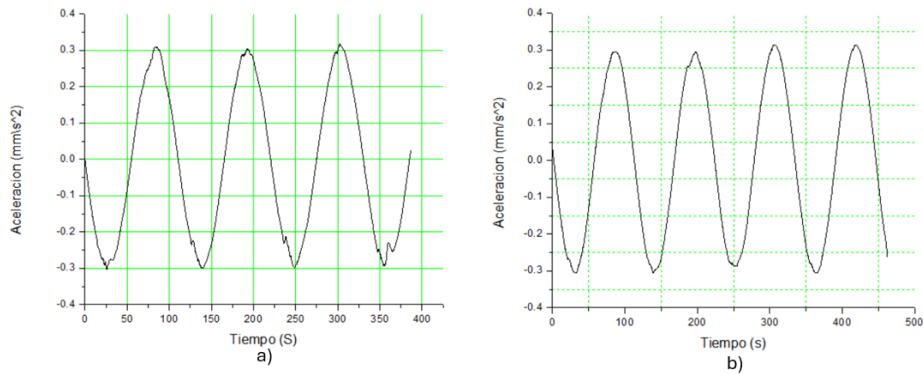


Figura 5.8: a) Aceleración sin compensar. b) Aceleración con compensación.

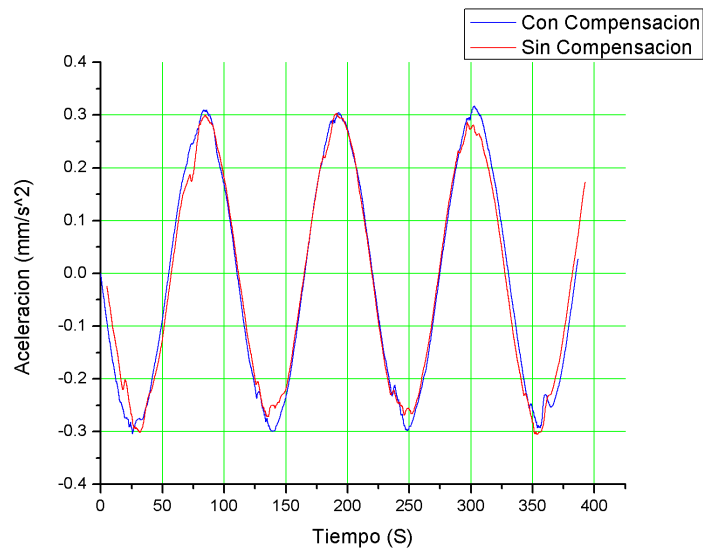


Figura 5.9: Aceleración sin compensación y con compensación de Fricción

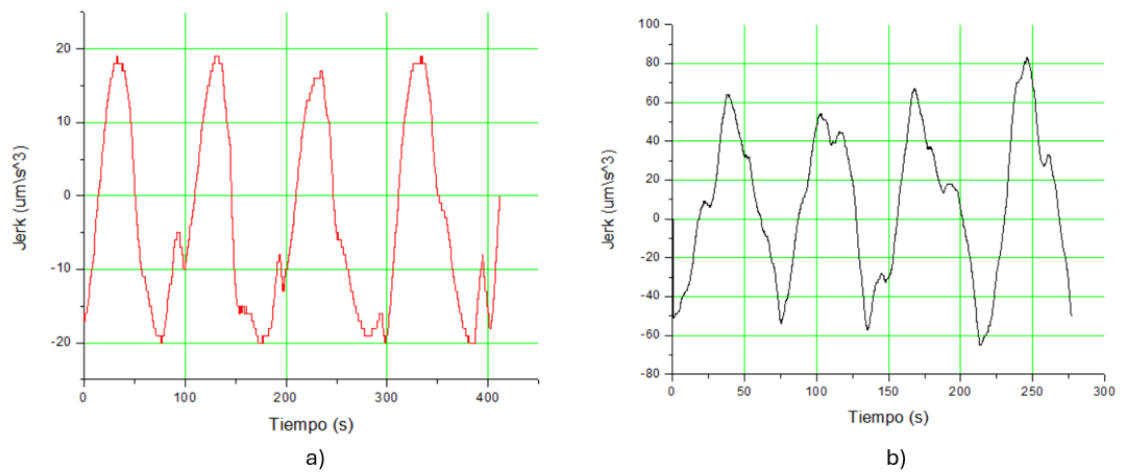


Figura 5.10: a) Jerk con compensación. b) Jerk sin compensar.

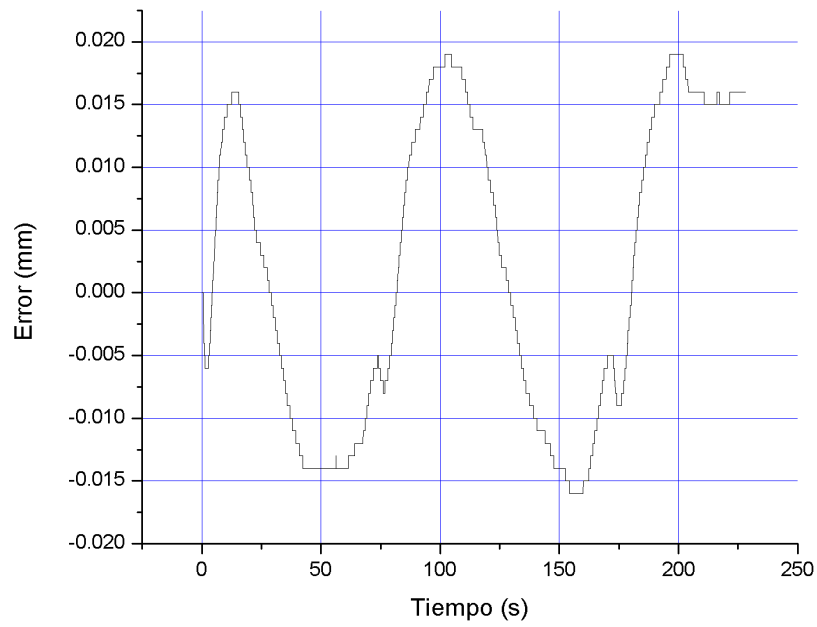


Figura 5.11: Error de posición eje X.

5.2. Eje Y

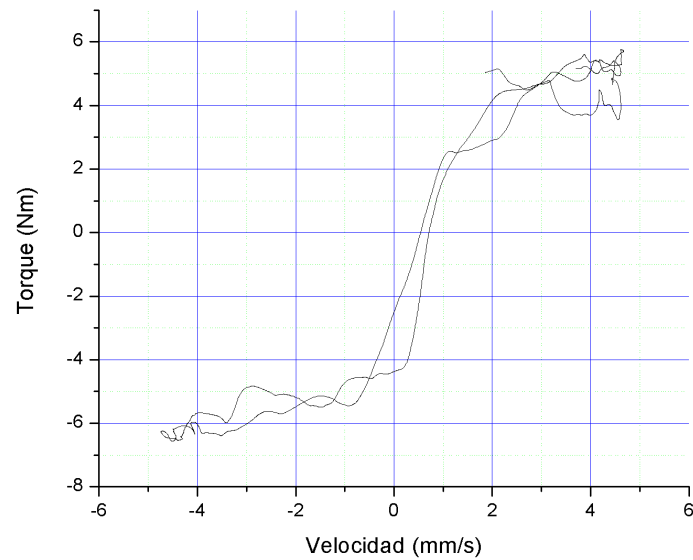


Figura 5.12: Gráfica Torque contra velocidad eje Y, sin compensación Fricción.

Después de realizar la compensación con el modelo de fricción tenemos los siguientes resultados

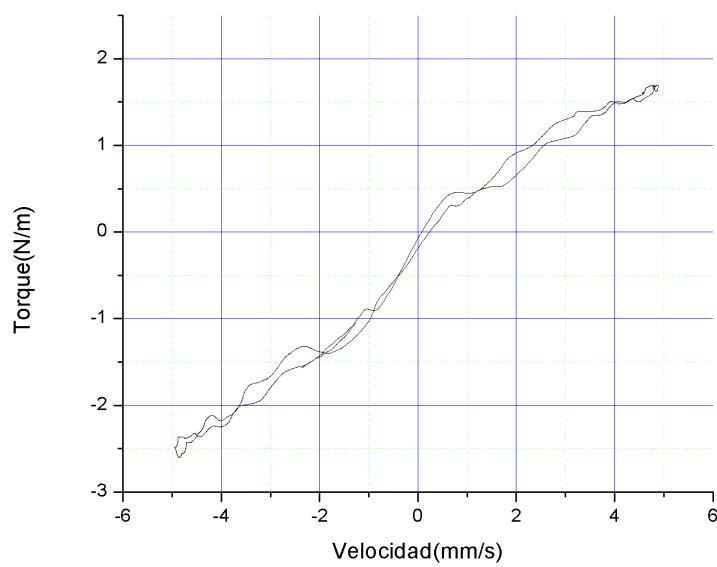


Figura 5.13: Gráfica Torque contra velocidad eje Y, con compensación Fricción.

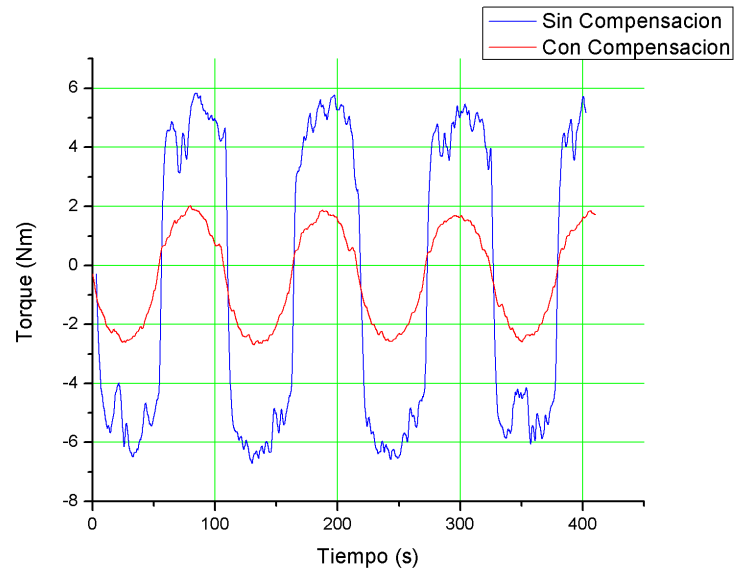


Figura 5.14: Torque eje Y sin compensación y con compensación de Fricción.

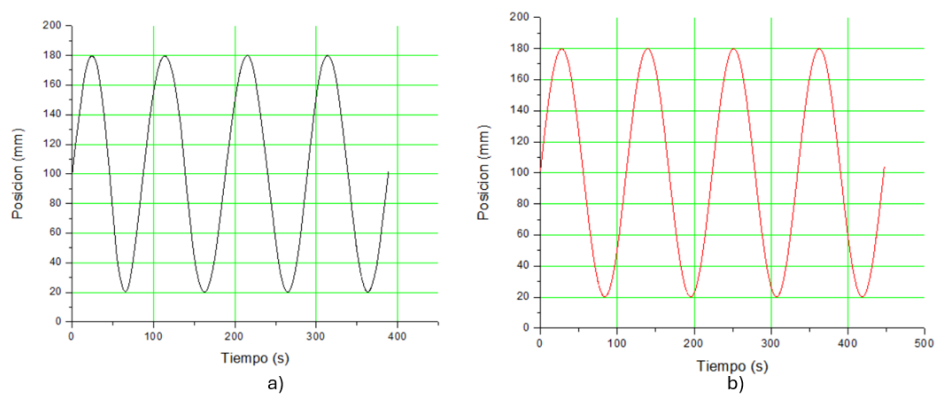


Figura 5.15: a) Posición del robot sin compensación fricción. b) Posición del robot con compensación fricción.

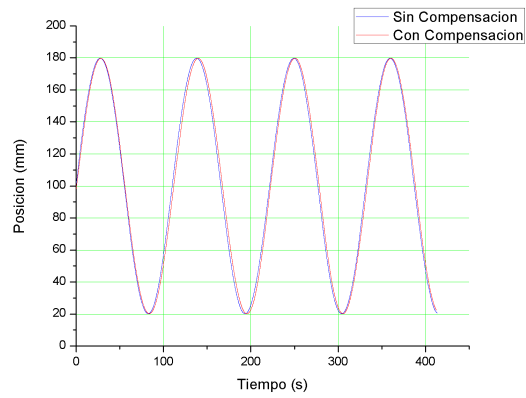


Figura 5.16: Posición Robot.

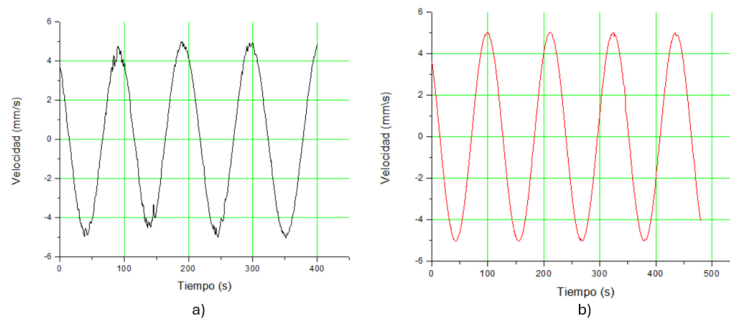


Figura 5.17: a) Velocidad sin compensar. b) Velocidad con compensación.

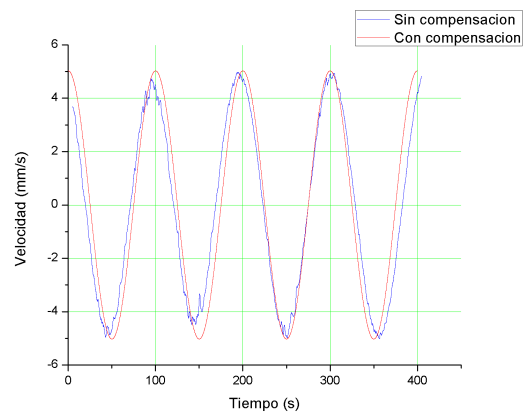


Figura 5.18: Velocidad Robot.

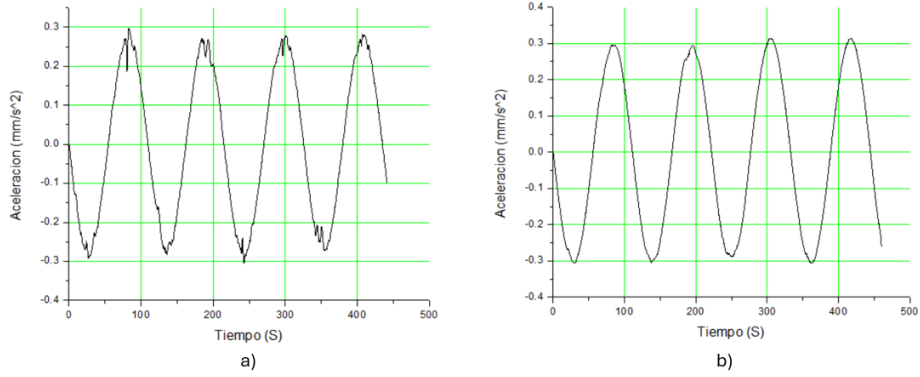


Figura 5.19: a) Aceleración sin compensar. b) Aceleración con compensación.

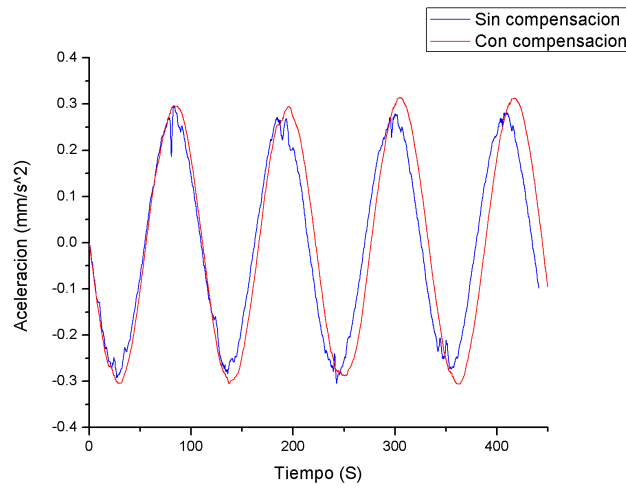


Figura 5.20: Aceleración sin compensación y con compensación de Fricción

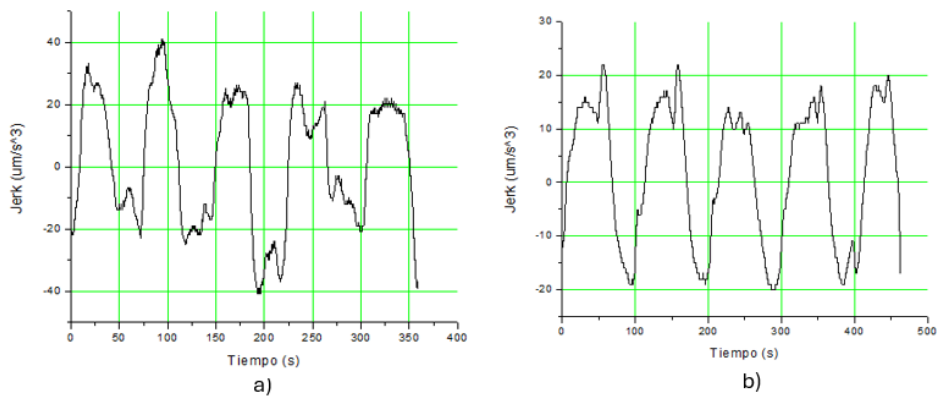


Figura 5.21: a) Jerk con compensación. b) Jerk sin compensar.

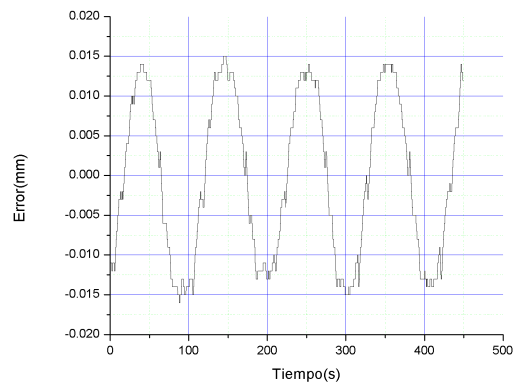


Figura 5.22: Error de posición eje Y.

5.3. Eje Z

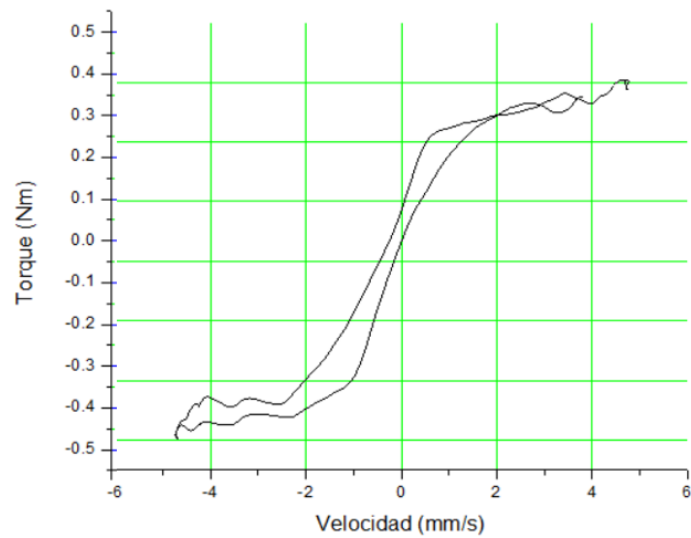


Figura 5.23: Gráfica Torque contra velocidad eje Z, sin compensación Fricción.

Después de realizar la compensación de fricción podemos ver los siguientes resultados.

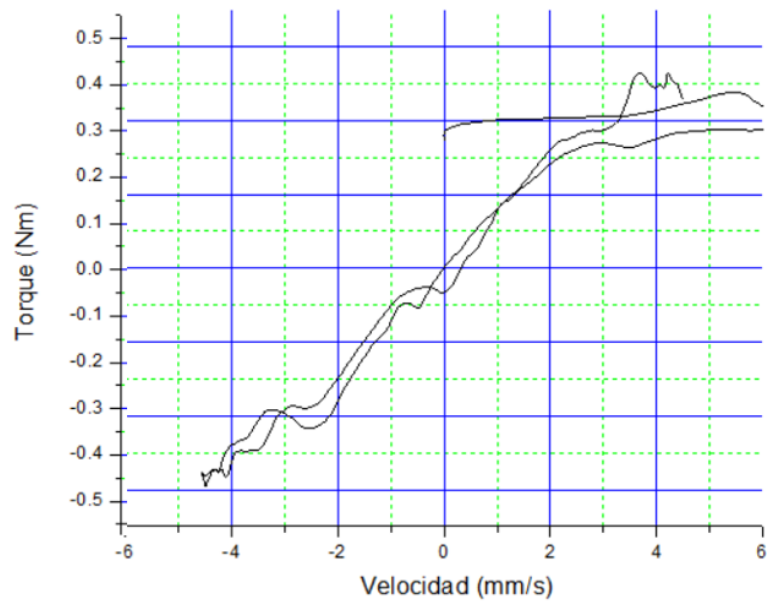


Figura 5.24: Gráfica Torque contra velocidad eje Z, con compensación Fricción.

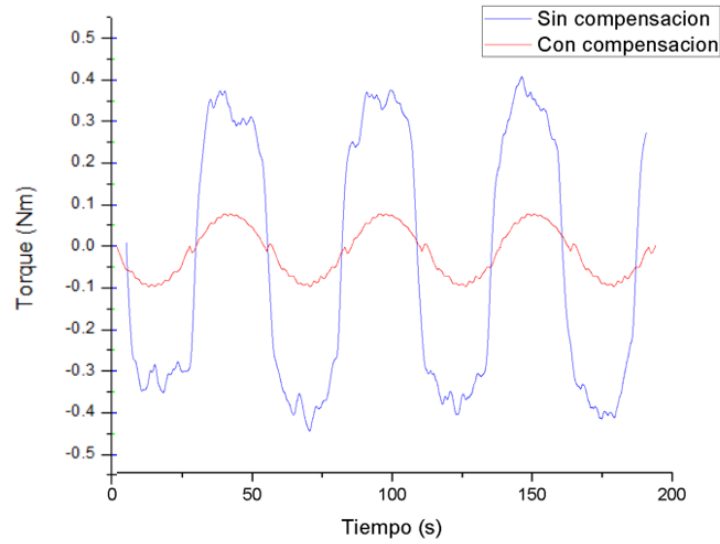


Figura 5.25: Torque eje Z sin compensación y con compensación de Fricción.

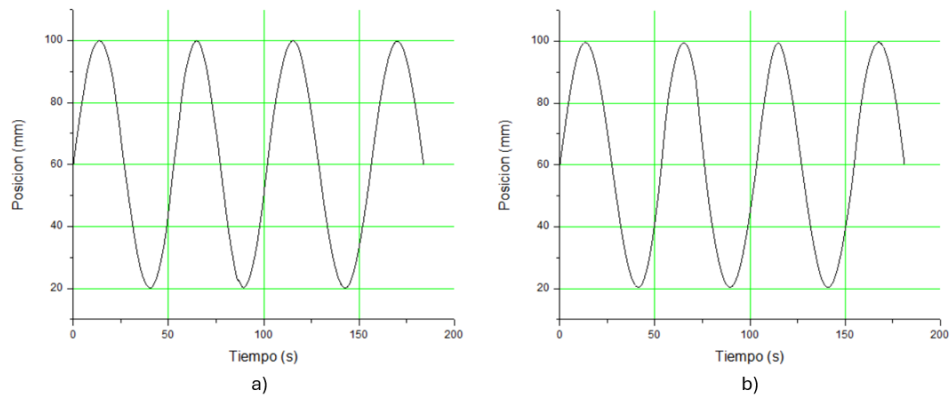


Figura 5.26: a) Posición del robot sin compensación fricción. b) Posición del robot con compensación fricción.

En cuanto al error en la trayectoria podemos ver que está por debajo de las $7\mu m$

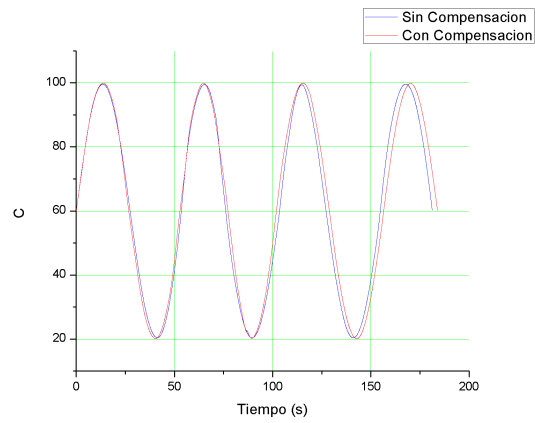


Figura 5.27: Posición Robot.

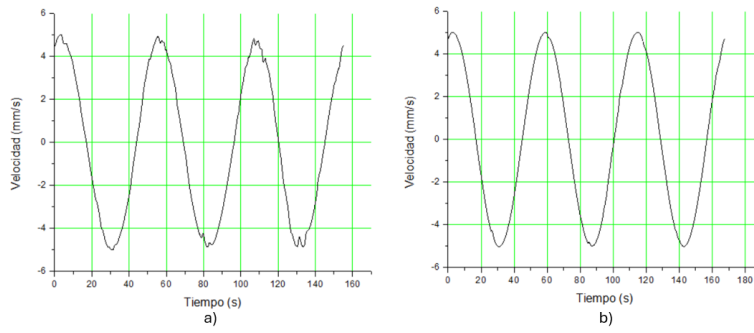


Figura 5.28: a) Velocidad sin compensar. b) Velocidad con compensación.

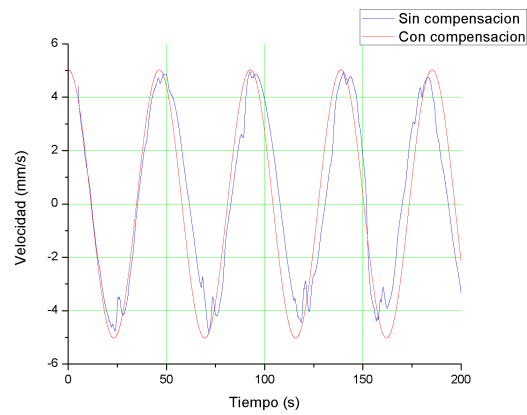


Figura 5.29: Velocidad Robot.

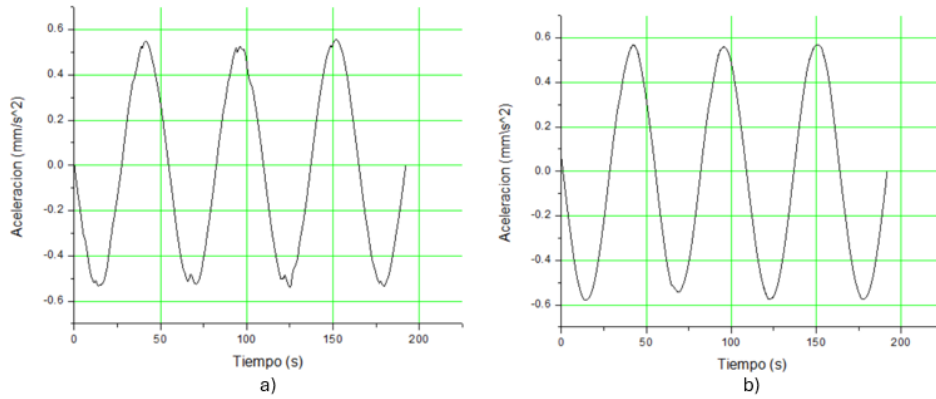


Figura 5.30: a) Aceleración sin compensar. b) Aceleración con compensación.

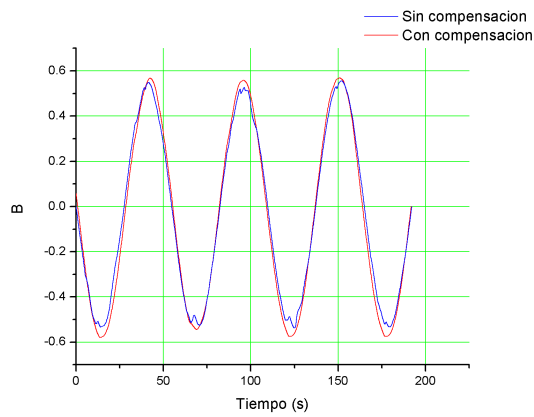


Figura 5.31: Aceleración sin compensación y con compensación de Fricción

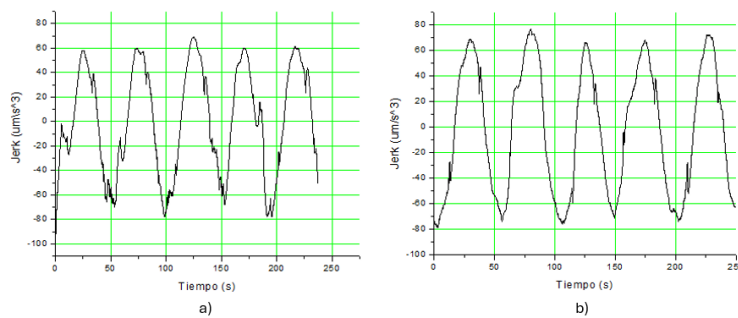


Figura 5.32: a) Jerk con compensación. b) Jerk sin compensar.

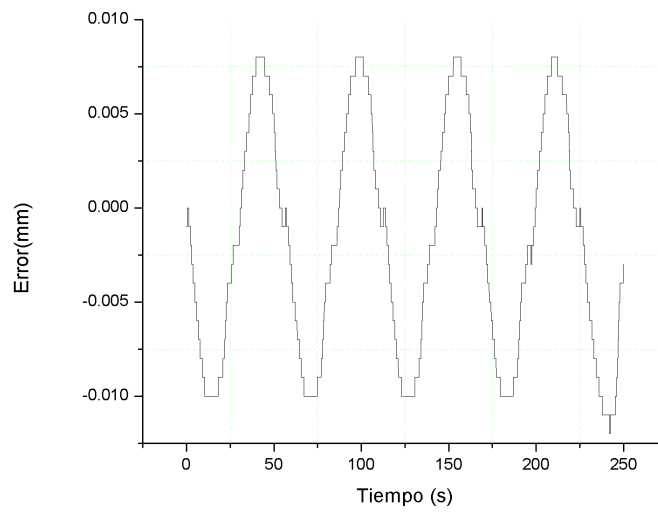


Figura 5.33: Error eje Z.

5.4. Resultados de la distribución del desplazamiento Δx cada $100\mu m$

La metodología realizada permite realizar movimientos muy precisos, así que se puso a prueba el robot para que realizará de un punto a otro es decir posicionar al robot de un punto x_o fuera de la posición de casa, y a partir de ese punto mandarlo a moverse $100\mu m$, se realizó un experimento donde se mando a moverse cada $100\mu m$ 50 veces, y se obtuvo su grafica de distribución normal, para ver el comportamiento típico. En este experimento para utilizar la formula de distribución normal, se obtuvo la media $\mu = 105.9$ y la desviación estándar $\sigma = 9.56$.

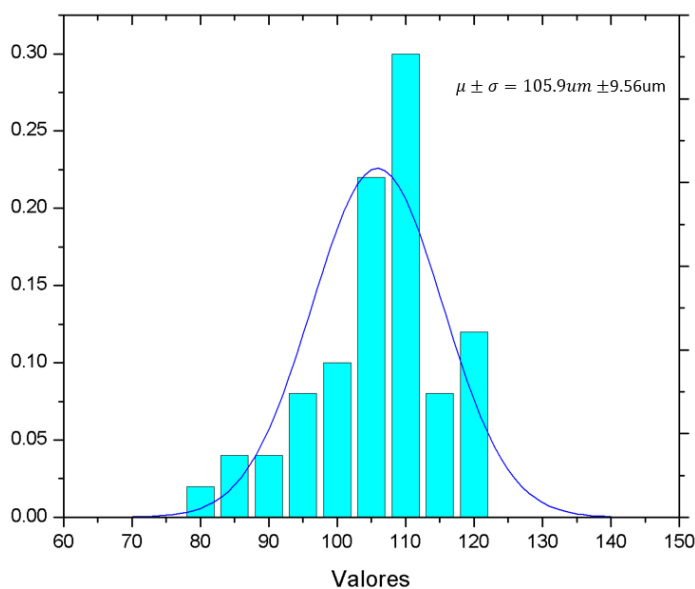


Figura 5.34: Resultados al movimiento cada $100\mu m$, eje X.

Después de ver el comportamiento en la Figura anterior, se hizo un ajuste en el movimiento, para poder dejar el movimiento exactamente en $100\mu m$ sin embargo podemos ver en la grafica (Figura 5.7) que a pesar del ajuste de $5\mu m$ que se hizo la media de las 50 mediciones que se realizaron fue de $\mu = 103$, esto demuestra que el robot si se manda de un punto a otro se posiciona más en esa distancia.

5.5. RESULTADOS DE LA DISTRIBUCIÓN DEL DESPLAZAMIENTO Δy CADA 100 μm 129

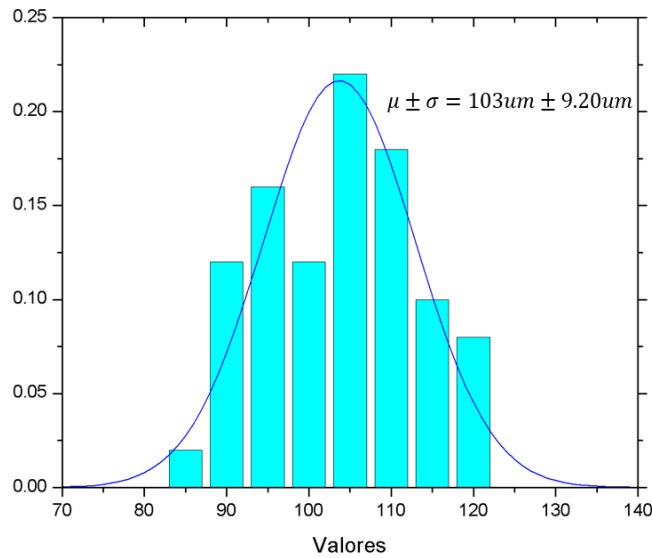


Figura 5.35: Resultados al movimiento cada 100 μm , eje X.

5.5. Resultados de la distribución del desplazamiento Δy cada 100 μm

Al igual que el eje X se realizó el mismo experimento de posiciona a 100 μm y se muestra el siguiente histograma.

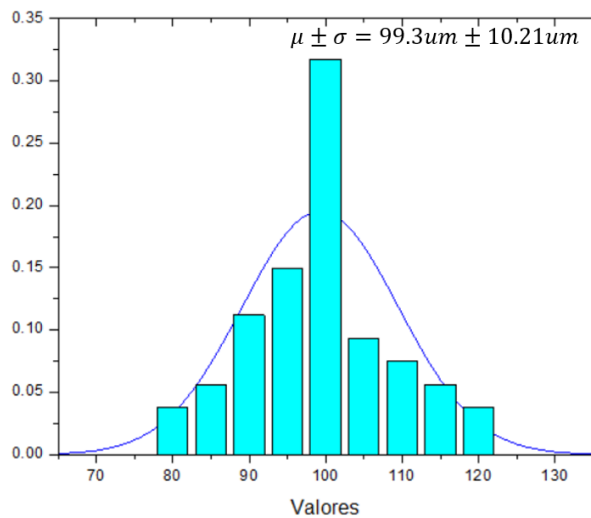


Figura 5.36: Resultados al movimiento cada 100 μm , eje Y.

5.6. Escaneado

Para poner a prueba el escáner 3D se tomó una figura de metal para realizar la rutina de escaneado, como avanza cada $100\mu\text{m}$ se tomo un área de 50 micras por 100 micras del caparazón de una tortuga. Mediante software lo que se hizo fue que al momento de que el palpador toca la pieza este sube al eje Z y manda la posición de los 3 ejes en tiempo real, al realizar este proceso se obtuvo un total de 5000 puntos de coordenadas (x,y,z), mediante el software de MATLAB, se realizo la gráfica en 3D de la pieza escaneada, obteniendo los siguientes resultados.

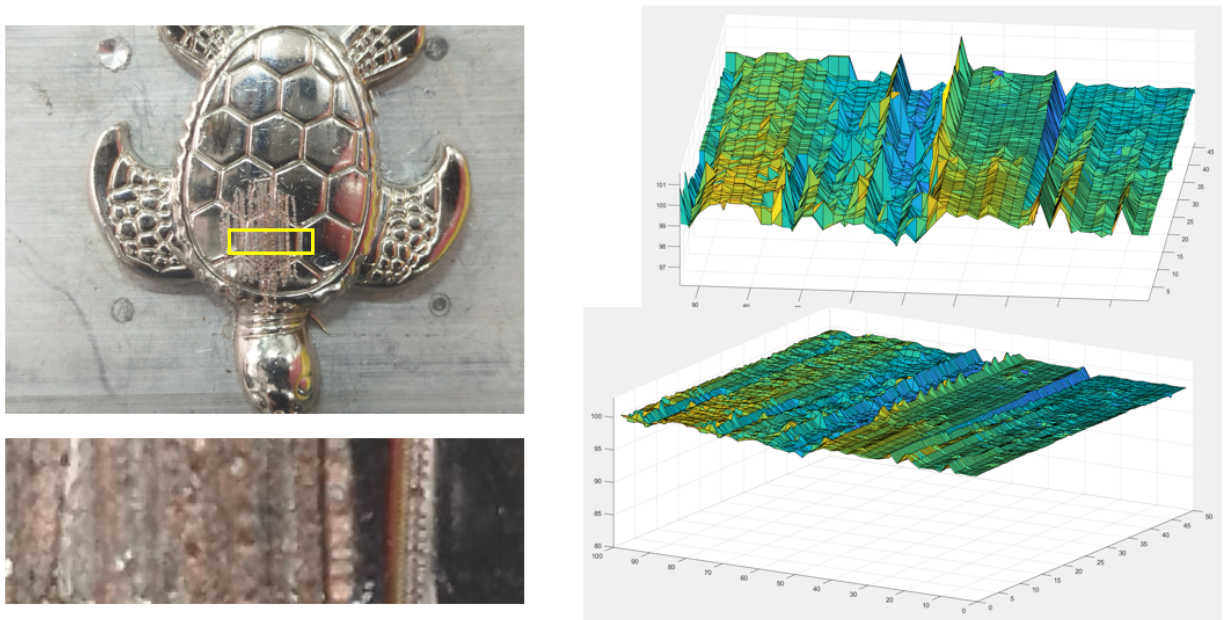


Figura 5.37: Escaneo Área Caparazón.

Podemos ver en el movimiento es muy exacto en cualquiera de los 3 ejes, ya se posiciona de manera correcta además de que el palpador es un elemento mecánico y siempre hay errores en la medición, el escaner realiza la tarea que se le especifica

5.7. Conclusiones

De los resultados obtenidos podemos concluir que se han cumplido los objetivos planteados en este proyecto de tesis.

Realizar la instrumentación y el recableado completo del robot resultó ser muy importante, dado que la ejecución de la rutina de escaneado de una pieza demanda un considerable tiempo de operación.

La corrección en el cálculo de velocidad demostró que era necesaria ya que en la toma de datos se producían muchos falsos valores de cero. Es importante mencionar que este error es producido debido a la desincronización entre las señales A y B del encoder y la señal de reloj del FPGA.

Se comprobó que los datos de velocidad, aceleración, jerk y torque se veían fuertemente afectados por la digitalización de acuerdo con lo esperado teóricamente, por lo que esto se solucionó completamente con el uso de filtros digitales instrumentados en código usando el lenguaje D que funciona dentro del FPGA en tiempo real. Al transmitir los datos hacia la computadora se vuelve a presentar este fenómeno por lo cual se tuvieron que aplicar nuevamente los filtros por medio de un código en LabView para realizar el filtrado de los datos discretos obtenidos.

Al graficar los resultados experimentales de torque contra velocidad se observa claramente como la fricción no permite el movimiento del eje a muy bajas velocidades, sin embargo a partir de esta grafica se puede estimar el valor de la fricción estática, viscosa y de coulomb, con los valores obtenidos se logró compensar casi en su totalidad la fricción aplicando el modelo de fricción propuesto en este proyecto, lo cual resultó al final en una respuesta casi lineal de la relación de torque en función de la velocidad.

El uso del control de trayectoria y añadiendo la compensación de fricción a este controlador nos permitió alcanzar movimientos extremadamente precisos, alcanzando una resolución de 7.5 micrómetros en Z, 20 micrómetros en X y 15 micrómetros en Y.

Se ha logrado una destacable mejora en la precisión del robot, especialmente en el eje X y Y, gracias a la combinación de una sólida mecánica, una electrónica libre de falsos contactos y una efectiva disipación de la etapa de potencia. Esto ha permitido alcanzar una resolución comparable a la de los robots industriales que es de alrededor 25 micrómetros. Después de la sintonización de las ganancias y la compensación de la fricción se logró alcanzar desplazamientos entre puntos consecutivos de 100 más menos 10 micrómetros en los ejes X e Y.

El desarrollo del palpador presentó una ventaja significativa al ser completamente desarmable, además de presentar una resistencia al contacto mucho menor que los palpadores comerciales. Sus componentes mecánicos, que tienden a desgastarse con el uso, pueden ser reemplazados fácilmente, al igual que las puntas, adaptándose así a las necesidades específicas de cada escaneado.

El desempeño actual del robot permitirá que en futuro se use en aplicaciones como cortadores y grabadores laser, producción de circuitos impresos, etc.

Bibliografía

- [1] F.M. Sánchez Martín, F. Millan Rodríguez, J. Salvador Bayarri, J. Palou Redorta, F. Rodríguez Escovar, S. Esquena Fernández, and H. Villavicencio Mavrich. Historia de la robótica: de Arquitas de Tarento al robot Da Vinci (Parte I). *Actas Urol Esp.*, 31:69 – 76, 02 2007.
- [2] Miguel Trejo-Hernandez, Roque Alfredo Osornio-Rios, Rene de Jesus Romero-Troncoso, Carlos Rodriguez-Donate, Aurelio Dominguez-Gonzalez, and Gilberto Herrera-Ruiz. Fpga-based fused smart-sensor for tool-wear area quantitative estimation in cnc machine inserts. *Sensors*, 10(4):3373–3388, 2010.
- [3] Floyd. *Fundamentos de Sistemas Digitales 9 Edicion*. Pearson Educacion, 2007.
- [4] Andreu Morro Gallego. Implementación de fista en una fpga para la resolución de problemas qp. 2020.
- [5] Varios Autores. Métodos y equipos de medición geométrica, 2020.
- [6] Leonardo de J Mesa-Palacio, Gabriel Calle-Trujillo, and Juan J Arbeláez-Toro. Diseño, construcción y fabricación de una máquina prototipo de medición por coordenadas. *TecnoLógicas*, (26):11–25, 2011.
- [7] NIKON METROLOGY NV. Máquinas de medición por coordenadas, 2021.
- [8] Daniel Gallardo Artal. Diseño de una máquina de medición por coordenadas de bajo coste. 2018.
- [9] Leonardo de J. Mesa-Palacio, Gabriel Calle-Trujillo, and Juan J. Arbeláez-Toro. Diseño, Construcción y Fabricación de una Máquina Prototipo de Medición por Coordenadas. *TecnoLógicas*, pages 11 – 25, 06 2011.
- [10] A. Lopez Beltran. *Robot CNC para impresora 3D*. Tesis de Maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2016.
- [11] C. Jiménez Martínez. *Implementación de un CNC con 3 grados de libertad aplicado a impresión 3D*. Tesis de Maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2019.
- [12] F. Coluccio Leskow. Fricción, 2021.

- [13] M García López. *Control de seguimiento de Trayectoria y contorneado basado en el modelo de fricción para un sistema CNC de feed-drive*. Tesis de Maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2022.
- [14] PROVIDORA METALMECANICA. Palpadores, medidores de precisión, 2018.
- [15] Juan Hinojosa Jimenez José Alejandro López Alcantud Juan de la Cruz Martínez-Cabeza de Vaca Alajarin Isidro Villo Perez Juan Zapata Perez. Gines Domenech Asensi, Vicente Garceran Hernandez. *Circuitos y Funciones Electronicas*. CRAI, 2019.
- [16] Grupo Novelec. Finales de carrera: Qué son y características principales, 2018.
- [17] C. Jiménez Martínez. *IMPLEMENTACIÓN DE UN CNC CON 3 GRADOS DE LIBERTAD APLICADO A IMPRESIÓN 3D*. Tesis de Maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2019.
- [18] A Alcantar Vergara. *MODELADO Y CONTROL DE UN ROBOT CARTESIANO DE DOS GRADOS DE LIBERTAD REALIZANDO ESTUDIOS DE JERK*. Tesis para obtener el grado Maestro en Ciencias, Maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2022.
- [19] SCHMERSAL The DNA of Safety. Sensores inductivos y capacitivos, 2023.
- [20] F. Niung. Sensores de proximidad npn y pnp, 2021.
- [21] G. Zepeda Arce. *Diseño de un microprocesador de arquitectura RISC de 32 bits*. Tesis de Maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 2017.
- [22] B.E.; Reyes Cortés F.; Vargas Treviño M. A.; Oviedo Barriga J. L. Rodríguez Hernández, E. Sánchez García. *Nuevo modelo de fricción para robots manipuladores*. Congreso Internacional en Ingeniería Electrónica. Mem. ELECTRO, Vol. 42 pp 140-145, Chihuahua, Chihuahua, México, 2020.
- [23] Charles K. Alexander and Sadiku Matthew N O. *Fundamentos de Circuitos electricos (3A. ed.)*. McGraw-Hill Interamericana, 2006.
- [24] Reyes Martín G. *La función de probabilidad normal: Características y aplicaciones*. Trascender, Contabilidad y Gestión, Universidad de Sonora. Departamento de Contabilidad. Mayo-Agosto 2018, 2018.
- [25] Pértegas Díaz S. Pita Fernández S. *La distribución normal*. Unidad de Epidemiología Clínica y Bioestadística. Complejo Hospitalario Juan Canalejo. A Coruña. Cad Aten Primaria 2001; 8: 268-274., 2001.

Anexos

TOEFL ITP Score Report

Name of Institution: UPAEP PUEBLA

Name: PINTOR JUAN

Student Number:

DOB: 08/17/1997

Sex: M

Degree:

Times Taken TOEFL: None

Native Country: Mexico

Native Language: Spanish

Scaled Scores:

Listening Comprehension: 46
Structure & Written Expression: 48
Reading Comprehension: 52
Total Score: 487

Test Date: 03/09/2024
Form: TOEFL ITP



The face of this document has a security background. The back contains a watermark. Hold at an angle to view.

The TOEFL ITP Assessment Series is designed to be used for placement, progress monitoring, and exit purposes. TOEFL ITP scores can also be used for admissions to programs and institutions where English is not the dominant language of instruction for content courses. Learn more at www.ets.org/toefl_itp/use.

154774-16573 • FB0923R60 • Printed in U.S.A.

I.N. 770462

Copyright © 2012 by Educational Testing Service

Student's File Cop
Do Not Cop

Desarrollo e Instrumentación de un Palpador para Escáner 3D en Plataforma FPGA

Lic. Juan Francisco Pintor Michimani ¹, Dr. Sergio Vergara Limon ², Dra. María Aurora Diozcora Vargas Treviño ³, Dr. Jesús López Gómez ⁴, Dra. Amparo Dora Palomino Merino ⁵ y Dr. Daniel Marcelo Gonzales Arriaga ⁶

Resumen—En este trabajo se presenta el diseño de un palpador el cual es una herramienta que se instala en un robot CNC cartesiano de 3 grados de libertad (GDL) el cual se encuentra en las instalaciones de la maestría en Ciencias de la Electrónica Opción Automatización de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) para realizar escaneado de piezas a alta resolución. Se presenta el modelo dinámico del robot para el estudio del comportamiento del mecanismo el cual ha sido obtenido mediante la metodología de parámetros agrupados utilizando la ecuación de Lagrange. En base al estudio se desarrolla un sistema de control para el robot utilizando un sistema embebido en un FPGA (Field Programable Gate Array) Cyclone V perteneciente a la empresa Altera, la cual permite controlar la posición de cada motor.

Palabras clave—CNC, FPGA, Palpador, Escáner, modelo dinámico.

Introducción

Gran parte del avance tecnológico está centrado en la robótica, dentro de este campo existen los robots manipuladores los cuales son de gran relevancia debido a que pueden realizar tareas peligrosas para el ser humano, dentro de este robot se encuentra el robot cartesiano, el cual es uno de los dispositivos con mayor uso en las máquinas automatizadas debido a que puede generar trayectorias complejas en un espacio tridimensional a partir de movimientos lineales independientes. Pueden ser implementados para manipular objetos o máquinas-herramienta de control numérico computarizado (CNC) como cortadores láser, perforadoras de placas, soldadura, centros de mecanizado, impresoras 3D o en su caso máquinas de medición por coordenadas (MMC).

Existen diversas formas de digitalizar un objeto a 3D muchos sensores que pueden hacer la función de escanear una pieza, sin embargo, estos se clasifican en contacto y no contacto. Los escaner 3D de contacto funcionan sondeando físicamente (tocando) la pieza y registrando la posición del sensor a medida que la sonda se mueve alrededor de la pieza. Una CMM es una máquina de medición de coordenadas que emplea tres componentes móviles que se trasladan a lo largo de guías con recorridos ortogonales. Un operador guía, un palpador alrededor de la pieza para realizar mediciones (x, y, z).

Metodología

Modelo Dinámico

Es de suma importancia tener el modelo dinámico ya que este nos permite realizar un control más apropiado del robot y que tenga un mejor desempeño.

En el laboratorio de la Maestría en Ciencias de la Electrónica Opción en Automatización (MCEA) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), se tiene un robot tipo cartesiano de 3 grados de libertad el cual está configurado para funcionar como un CNC. Para la obtención del modelo dinámico se utiliza el método de parámetros agrupados (B. Fabien, 2008) el cual consiste en basarnos en la estructura mecánica, en este método intervienen cada elemento mecánico conectados (M. García. 2020). Cada uno de los ejes está conformado de una manera similar, como primer elemento tenemos el motor seguido de la caja de engranajes, el cople es el encargado de unir dos ejes, el de salida de la caja de engranes y el tornillo embalado, este último está conectado a una tuerca la cual lo acopla a la mesa de trabajo. En esa configuración el motor del eje X es el que se encarga de cargar a la mesa de trabajo m_{t1} y también

¹ Lic. Juan Francisco Pintor Michimani es alumno de la Maestría en ciencias de la electrónica Opción en automatización en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México. juan.pintor@alumno.buap.mx (autor correspondiente)

² El Dr. Sergio Vergara Limon es Profesor de la Maestría en ciencias de la electrónica Opción en automatización en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México. sergio.vergara@correo.buap.mx

³ La Dra. María Aurora Diozcora Vargas Treviño es Profesora de la Maestría en ciencias de la electrónica Opción en automatización en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México. aurora.vargas@correo.buap.mx

⁴ El Dr. Jesús López Gómez es Profesor de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (DAIA-UJAT), Tabasco, México. jlgo6599@docente.ujat.mx

⁵ La Dra. Amparo Dora Palomino Merino es Profesora de la Maestría en ciencias de la electrónica Opción en automatización en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México. amparo.palomino@correo.buap.mx

⁶ El Dr. Daniel Marcelo Gonzales Arriaga es Profesor en la Facultad de Ciencias de la Computación en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México. daniel.gonzalezarr@correo.buap.mx



CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN ACADEMIA JOURNALS LOS MOCHIS 2024

Conectando Mentes, Innovando Horizontes

CERTIFICADO

otorgado a

Lic. Juan Francisco Pintor Michimani
Dr. Sergio Vergara Limon
Dra. María Aurora Diozcora Vargas Treviño
Dr. Jesús López Gómez
Dra. Amparo Dora Palomino Merino
Dr. Daniel Marcelo Gonzáles Arriaga

por su artículo titulado

Desarrollo e Instrumentación de un Palpador para Escáner 3D en Plataforma FPGA

(Artículo No. MCH014)

La ponencia correspondiente fue presentada en el Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Los Mochis 2024, *Conectando Mentes, Innovando Horizontes*, desarrollado los 26 y 27 de febrero de 2024, con sede en el Centro de Innovación y Educación Los Mochis. El evento fue presentado en colaboración con eminentes investigadores de Los Mochis. El artículo está incluido en las siguientes publicaciones: (1) en el portal de Internet AcademiaJournals.com, con ISSN 1946-5351 online, Vol. 16, No. 01, 2024 e indexación en la base de datos *Fuente Académica Plus de EBSCOHOST*, Massachusetts, Estados Unidos y (2) en libros ebook digitales compilados por área temática, con números ISBN online*. Se tiene acceso libre a todas las publicaciones del congreso en el portal de internet de Academia Journals.

Los organizadores del congreso reconocen la participación de los autores en el congreso, agradeciendo sus contribuciones.

DR. RAFAEL MORAS, P.E.

Director General
Academia Journals

