



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA
OPCIÓN EN AUTOMATIZACIÓN

**“Desarrollo de una mano mecatrónica de bajo costo para
un robot Humanoide*”**

T E S I S

Presentada para obtener el título de:

Maestro en Ciencias de la Electrónica Opción en Automatización

Presenta:

Lic. Fernando Herrera Arroyo*

Directores:

Dra. María Aurora Diozcora Vargas Treviño.

Dra. Darnes Vilariño Ayala.

Dr. David Eduardo Pinto Avendaño.

Puebla, México

NOVIEMBRE 2017.

*BECARIO CONACYT

BUAP®

Agradecimientos:

A Dios por darme la oportunidad de disfrutar de la compañía de multitud de personas las cuales han sido un pilar en un estado de incertidumbre para poder afrontar la vida y tener un mayor crecimiento como persona.

Agradezco a la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por brindarme la formación profesional con la cual cuento.

A todo el equipo que conforma la Maestría de la Facultad de Ciencias de la Electrónica opción Automatización por brindarme la oportunidad de continuar mi desarrollo profesional en sus instalaciones.

A mis asesores de tesis la Dra. Aurora Vargas Treviño, Dra. Darnes Vilariño Ayala, Dr. David Eduardo Pinto Avendaño, por el apoyo tanto de conocimientos, moral y asesoría para poder realizar este trabajo, en especial al Dr. Sergio Vergara Limon por brindarme los conocimientos y la paciencia necesaria para desarrollar esta tesis.

A mis sinodales, ya que con sus comentarios preguntas y correcciones contribuyeron de manera significativa en el enriquecimiento de este trabajo.

A Conacyt por el apoyo económico brindado para financiar los gastos personales para poder terminar la maestría.

Al laboratorio del lenguaje y conocimiento (LK&E) del doctorado de la facultad de ciencias de la computación de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla mediante la cual se brindó el financiamiento y material necesario para el desarrollo de esta tesis.

A mis compañeros de la Maestría de Ciencias de la Electrónica opción Automatización por la ayuda que brindaron en algún momento, Manuel, Raúl, Geovanni, Francisco, Gabino, Moya, Rigoberto, Daniel, Hugo y Hermes.

A mis amigos Juan Carlos, Daniel Gómez, Ricardo Torres, Luis Ernesto por animarme y darme ideas para continuar el desarrollo de esta tesis.

Resumen

En este documento se presenta el trabajo de tesis realizado para el diseño y desarrollo de una mano mecatrónica para un robot humanoide con 5g.d.l. (Grados de libertad). El primer apartado corresponde a una introducción sobre el estudio de los inicios de los robots humanoides así como las primeras manos mecánicas realizadas con propósitos de prótesis y el desarrollo de las primeras manos mecatrónicas al paso de los años, esto es de gran relevancia ya que la mayoría de las mismas tienen como objetivo común el realizar prótesis contribuyendo de una manera significativa a la medicina, de esta forma el aporte de la robótica es relevante y contribuye a mejorar la calidad de vida de las personas que por algún motivo carecen de dicha extremidad.

Gracias a la mecatrónica es posible desarrollar sistemas que imitan de manera significativa los gestos de un ser humano, este es el caso del robot humanoide que se ha obtenido en el laboratorio del lenguaje y conocimiento de la facultad de ciencias de la computación de la BUAP pero no cuenta con extremidades es por ello que se enfoca esta tesis en el desarrollo del primer prototipo de una mano mecatrónica.

En el segundo apartado se presentan los aspectos generales de la anatomía de la mano humana, medidas y parámetros los cuales son necesarios para el diseño y construcción de la mano mecatrónica mediante el uso del programa de diseño de SolidWorks. Así como también se realiza el estudio del modelo cinemático y dinámico de un dedo de la mano realizada, de igual forma se realiza el diseño y construcción de la etapa de potencia para el movimiento de cada uno de los dedos, se presenta la caracterización de los motores garantizando que trabajen en su zona lineal, el algoritmo de control es procesado por un microprocesador [1] desarrollado en la Maestría en Ciencias de la Electrónica de la Benemérita universidad Autónoma de Puebla realizado en QUARTUS-II para la comunicación de las diferentes etapas entre el FPGA y la interfaz realizada en LabView la cual cuenta con controles para enviar los datos de posición y ganancias a los actuadores proporcionando el movimiento de los dedos de la mano, y por último se presentan los resultados experimentales del sistema y las etapas que conforman la mano mecatrónica.

Índice

Introducción.....	i
Capítulo I: Características de la mano mecatrónica.	7
1.1 Anatomía de la mano humana.	7
1.1.1 La mano.....	8
1.1.2 Falanges.	8
1.1.3 La articulación carpo metacarpiana (palma de la mano).	9
1.1.4 Las articulaciones interfalángicas.	10
1.1.5 Inserción de los tendones de los dedos y control Muscular.	11
1.1.5.1 Músculos Intrínsecos.....	12
1.1.5.2 Sistema flexor.....	13
1.2 Movimientos de los dedos de la mano.....	14
1.2.1 Movimiento del pulgar.....	14
1.2.2 Medidas Norma DIN 33 402.....	15
1.3 Características de la mecánica de la mano.....	16
1.4 Especificaciones de la mano mecatrónica.	17
1.5 Diagrama general del sistema.....	18
1.6 Conclusiones.....	19
Capítulo II: Diseño y construcción del sistema mecánico de la mano.	20
2.1 Diseño de los dedos.	20
2.2 Diseño de palma de mano.....	21
2.3 Construcción de la mano.	23
2.4 Actuadores.	24
2.5 Conclusiones.....	25
Capítulo III: Cinemática y Dinámica.	26
3.1 Cinemática.	26
3.1.1 Modelo cinemático de un dedo.	27
3.2 Modelo Dinámico.	29
3.2.1 Modelo dinámico de un dedo.....	31
3.3 Conclusiones.....	34

Capítulo IV: Hardware.	35
4.1 Diagrama general del sistema de hardware.	35
4.2 Tarjeta de comunicación wifi (RN-XV).	38
4.3 FPGA DE0-nano.....	38
4.4 Motorreductor CGM12-N20VA-08200E.	40
4.5 Torque.	41
4.6 Eficiencia.	42
4.7 Metodología de la caracterización de Motor de CD.	42
4.8 Caracterización de motorreductores.	43
4.9 Encoders	46
4.10 Etapa de potencia y aislamiento (Puente H).	47
4.11 Circuito de protección para el FPGA y potencia.	48
4.12 Acondicionamiento de señales de encoders.	49
4.13 Conclusiones.	50
Capítulo V: Firmware y Software.	52
5.1 Sistema de transferencia de datos.	52
5.2 Decodificador de posición.	54
5.3 Generación de PWM.....	56
5.4 Microprocesador.	58
5.5 Controlador Proporcional (Firmware de algoritmo de control).....	59
5.6 Compilador.	60
5.7 Software.	61
5.8 Conclusiones.	62
Capítulo VI: Resultados Experimentales.	63
6.1 Resultados de la caracterización de los motorreductores CGM12N20VA.....	63
6.2 Resultado de las señales de encoder.	64
6.3 Resultados de las señales de PWM.....	64
6.4 Resultados de las etapas que conforman el sistema electrónico.	65
6.5 Resultados de la modificación del firmware en Quartus.	66
6.6 Resultados de la interfaz en LabView.	67
6.6 Conclusiones.	69

Conclusiones Generales. 70

Apéndice A..... 71

Apéndice B..... 73

Apéndice C..... 74

Apéndice D..... 76

Apéndice E 77

Índice de Figuras

Figura 1: Ramas que conforman la Mecatrónica.....	i
Figura 3: Torso del robot humanoide.	ii
Figura 2: Robot de Leonardo.....	ii
Figura 4: Mano de acrílico del robot Humanoide.	iii
Figura 5: Brazo Le Petit Loraine.....	iii
Figura 6: Mano Stanford/JPL.	iv
Figura 7: Mano Utah/MIT.....	iv
Figura 8: Mano H1-1000.....	iv
Figura 9: Mano MechaTe.....	v
Figura 10: Mano NG.....	v
Figura 12: Movimientos de la mano en la articulación de la muñeca.....	7
Figura 11: Articulación y huesos para movimiento de muñeca.	7
Figura 13: Huesos que componen a la mano humana.	8
Figura 15: Vista palmar.....	9
Figura 14: Huesos que componen los falanges y el pulgar.	9
Figura 16: Articulaciones de falanges.....	11
Figura 17: Vista dorsal de los tendones extensores de la mano.	12
Figura 18: Vista palmar de los abductores flexores meñique y pulgar.	12
Figura 19: Sistema Flexor de la mano y vainas para guiar los tendones.....	13
Figura 20: Movimiento de los dedos en flexion.....	14
Figura 21: Movimientos del pulgar y ángulos de flexión.....	15
Figura 22: Vista Palmar de la mano.	15
Figura 23: Vista lateral de la mano.	16
Figura 24: Analogía entre anatomía de dedo y diseño.	17
Figura 25: Diagrama general del sistema mecatrónico.	19
Figura 26: Dimensiones físicas de falanges (En mm.) diseñados y movimiento.....	20
Figura 27: Conductos flexor y extensor de los dedos, vista normal y seccionada.	21
Figura 28: Diseño con superficies de la palma de la mano en SolidWorks.	21
Figura 29: Plantillas realizadas para motores y polea.	21
Figura 30: Vistas frontal y trasera de mano diseñada.....	22
Figura 31: Medida de polea en mm.....	22
Figura 32: Armado de los dedos.....	23
Figura 33: Mano con actuadores-.....	23
Figura 34: Motorreductor CGM20VA-08200.....	24
Figura 35: Ejes de referencia para cinemática directa usando D-H.	28
Figura 36: Diagrama a bloques del sistema.....	36
Figura 37: Diagrama de conexión del sistema electrónico.....	37
Figura 38: Módulo wifi rn-xv.....	38
Figura 39: Pines de comunicación módulo wifi RN-XV.	38

Figura 40: FPGA EP4CE22F17E6 DE0_Nano.....	39
Figura 41: Pines de Configuración de FPGA.....	39
Figura 42: Diagrama de conexión FPGA, RAM y ROM.....	40
Figura 43: Motorreductor CGM12-N20VA.....	40
Figura 44: Torque.....	41
Figura 45: Base y polea para caracterizar el motor.....	43
Figura 46: Transistor Darlington para caracterización por frecuencia.....	43
Figura 47: Implementación de caracterización por frecuencia.....	44
Figura 48: Grafica de linealidad torque vs Ciclo de Trabajo de 5 motores.....	45
Figura 49: Señales en cuadratura de encoder.....	46
Figura 50: Combinaciones lógicas de señales A y B de encoder.....	46
Figura 51: Diagrama de máquina de estados para detección de encoder.....	47
Figura 52: Diseño de Puente-H.....	47
Figura 53: Circuito de protección y señales de lógica.....	49
Figura 54: Diagrama eléctrico de protección acondicionamiento y potencia de cada motor...	49
Figura 55: Placas realizadas para cada actuador.....	50
Figura 56: Sistema Electrónico implementado.....	50
Figura 57: Transmisión UART.....	52
Figura 58: Comunicación UART Módulo Wifly y Admin. wifi en FPGA.....	52
Figura 59: Muestreo de bits.....	53
Figura 60: Máquinas de estados de transmisión y recepción UART.....	53
Figura 61: Módulo UART de Transmisión (TX).....	53
Figura 62: Módulo testUART.....	54
Figura 63: Módulo UART de Recepción.....	54
Figura 64: Generación de señal de reloj para maquina de estado.....	54
Figura 65: Circuito para la generación de la señal de reloj.....	55
Figura 66: Señales para la obtención de reloj para maquina de estados.....	55
Figura 67: Combinaciones lógicas de señales de encoder.....	55
Figura 68: Diagrama de máquina de estados para decodificar el encoder.....	56
Figura 69: Módulo decodificador de posición.....	56
Figura 70: Divisores de frecuencia para motor 1 (220Hz) y motor 2 (210Hz).....	57
Figura 71: Divisores de frecuencia para motor 3,4 (200Hz) y motor 5 (100Hz).....	58
Figura 72: Bloque generador de señales de control PWM Izquierda y Derecha.....	58
Figura 73: Bloques que componen el microprocesador.....	58
Figura 74: Lazo cerrado de control Kp para cada uno de los dedos.....	59
Figura 75: Compilador de instrucciones.....	60
Figura 76: Interfaz de usuario para mandar las posiciones deseadas.....	61
Figura 77: Grafica de linealidad torque vs Ciclo de Trabajo de 5 motores.....	64
Figura 78: Señales de Encoder.....	64
Figura 79: Señales PWM obtenidas para el control de los motores.....	65
Figura 80: Sistema electrónico implementado.....	65

Figura 81: Sistema completo de la mano mecatrónica.....	66
Figura 82: Firmware de microprocesador implementado y modificado para 5gdl.....	66
Figura 83: Interfaz gráfica realizada en LabView.....	67
Figura 84: Posiciones deseadas alcanzadas +/- 1 cuenta.de error.....	67
Figura 85: Gráficas para el motor 1 (pulgar).....	68
Figura 86: Gráficas para el motor 2 (Anular).....	68
Figura 87: Gráficas de motor 3 (Índice).....	69

Índice de tablas

Tabla 1: Grados correspondientes a flexión y extensión de los dedos.....	14
Tabla 2: Grados de flexión del dedo pulgar.....	15
Tabla 3: Medidas de la mano Norma DIN 33 402.....	16
Tabla 4: Medidas Pulgar y grosor de mano.....	16
Tabla 5: Medidas de los hilos flexores de los dedos.....	22
Tabla 6: Numero de vueltas de la caja reductora respecto al hilo en flexión total.....	24
Tabla 7: Numero de pulsos para flexión total de cada dedo de la mano.....	25
Tabla 8: Parámetros D-H de un dedo planar de 3gdl.....	28
Tabla 9: Especificaciones de motor CGM12-N20VA.....	40
Tabla 10: Colores de cables de los motores.....	41
Tabla 11: Datos obtenidos de los torques contra ciclo de trabajo para cada motor.....	45
Tabla 12: Frecuencias características de motores.....	56
Tabla 13: Valores de cuentas máximos para divisores de frecuencia.....	57
Tabla 14: Conjunto de instrucciones de microprocesador.....	59
Tabla 15: Código en ensamblador de control proporcional.....	60
Tabla 16: Datos obtenidos de torques contra ciclo de trabajo para cada motor.....	63

Introducción.

El estudio del cuerpo humano es un área de conocimiento que se ha venido desarrollando constantemente, Hipócrates (considerado el padre de la medicina occidental) y Leonardo Da Vinci, son personas que realizaron estudios de anatomía humana con profundidad sin precedentes en sus respectivas épocas y contextos [2].

A partir del siglo XX se ha logrado adquirir nuevos conocimientos respecto a la anatomía del cuerpo humano, la medicina y la tecnología unen sus metodologías para crear nuevas herramientas que permiten dar soluciones a problemas mediante el uso de interfaces electrónicas.

La mano humana es una pinza notable que diseñadores en robótica han intentado imitar durante mucho tiempo. Actualmente no se ha podido lograr una imitación considerable. Con sus 20 grados de libertad, 19 músculos, 17 articulaciones, 19 huesos, además de sus ligamentos, nervios y numerosos sensores, la mano humana es muy difícil de reproducir mecánicamente [6].

Ingeniería en Mecatrónica como tal es la unión de varios tipos de ingeniería las cuales son: Ingeniería electrónica, Ingeniería informática, Ingeniería mecánica, e Ingeniería de control (ver Fig. 1). La mecatrónica como conjunto de varias disciplinas surge de la necesidad de acoplar tanto sistemas mecánicos como electrónicos para realizar procesos de automatización completos desde el prototipo hasta la implementación final de un producto determinado con la prioridad de ser ágiles y confiables [2].

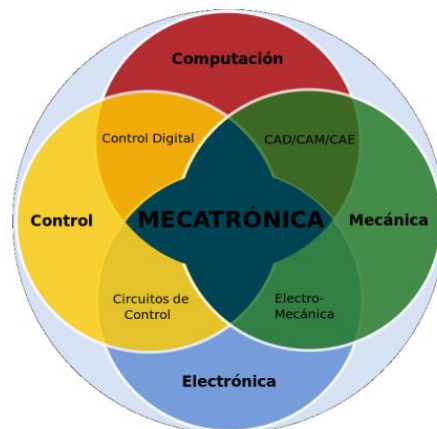


Figura 1: Ramas que conforman la Mecatrónica.

Robots humanoides: Un robot humanoide es un robot construido en forma y características propias del cuerpo humano, y son hechos para propósitos funcionales, principalmente son usados para investigaciones científicas y conocer a fondo las

características de la estructura y comportamiento del cuerpo humano, las aplicaciones implican desde realizar expresiones faciales hasta implementar tareas comunes de control de extremidades para tener interacción con personas, herramientas o ambientes [3].

En 1495 Leonardo Davinci realiza el primer robot humanoide que parecía un caballero con armadura y consistía en una serie de poleas engranes y cables, era capaz de levantarse mover los brazos y sentarse, es conocido como el robot de Leonardo [3], (ver Fig. 2).



Figura 2: Robot de Leonardo.

El laboratorio de Ingeniería del Lenguaje y del Conocimiento de la facultad de ciencias de la computación adquirió un robot humanoide con la capacidad de realizar expresiones faciales, sin embargo, este robot hasta el momento cuenta únicamente con el torso robotizado (ver Fig. 3), debido a que el robot no cuenta con extremidades como lo son los brazos, manos, piernas y pies se desea desarrollar de manera gradual otras partes del cuerpo, en particular una mano robótica con la finalidad de acoplarse a un robot humanoide y posteriormente contar con un sentido del tacto en conjunto con el laboratorio de la maestría en ciencias de la electrónica opción en automatización de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.



Figura 3: Torso del robot humanoide.

Por lo tanto en este proyecto de tesis se considera la construcción de la mano robótica, un sistema de control para poder acceder a los movimientos de los actuadores, el sistema de control deberá de tener mecanismos de seguridad que eviten daño a los servomotores, en la figura 4 se muestra la mano que tiene actualmente el robot y que se diseñará.



Figura 4: Mano de acrílico del robot Humanoide.

En la implementación del primer prototipo de la mano mecatrónica es importante tener conocimiento de las manos realizadas al paso de los años y de las nuevas tecnologías de esta forma se puede desarrollar de manera efectiva la construcción de la misma, es así como se ofrece una alternativa más con nuevos conceptos tanto de diseño y construcción logrando poder desarrollar tecnología en México que pudiese también ser utilizada para propósitos de prótesis.

En el Siglo XVI, el médico militar francés Ambroise Paré, desarrolló el primer brazo artificial móvil, llamado Le petit Loraine los dedos podían abrirse o cerrarse presionando o retrayendo una palanca, y el brazo podía realizar la flexión o extensión a nivel de codo. Fue realizada para una prótesis de codo (ver Fig.5). Y también lanzó la primera mano estética de cuero, e innova la utilización de materiales para el diseño del miembro superior [4].



Figura 5: Brazo Le Petit Loraine.

Primeras manos mecatrónicas.

En 1983 se diseñó la mano Stanford/jpl por el Dr. J. Kenneth Salisbury Jr. consta de tres dedos, tiene nueve grados de libertad el movimiento de los dedos se realiza con tendones, tiene sensores de encoders, fuerza y tensión para el sentido del tacto, cada dedo es idéntico en su construcción [6], (ver Fig. 6).



Figura 6: Mano Stanford/JPL.

En 1985 se realizó la mano Utah / MIT la cual tiene apariencia casi humana, esta mano requiere un conjunto de cables poleas para realizar el movimiento de los dedos, tiene sensores de efecto hall aunque la mano no incorpora el “sentido del tacto” [5], (ver Fig 7).



Figura 7: Mano Utah/MIT.

Manos mecatrónicas comerciales:

A continuación se estudian los avances de las manos robóticas creadas, en específico aquellas que son comerciales esto es para tener una idea del costo real que implica el comprar un sistema de este tipo.

La mano H1-1000 creada por ROBOT HAND animatronic servo human size RC/Comp con un precio de \$750 USD está hecha mediante componentes CNC durables de acero inoxidable y servos de alto torque (cinco Futaba S3111) no existen vibraciones en los movimientos de los dedos, (ver Fig.8).



Figura 8: Mano H1-1000

Mano MechaTe con un precio de \$988 USD hecha por Custom Entertainment Solutions de composición Robusta, tiene 5 servos para el movimiento, fácil y rápida programación con movimientos reales. La base permite fácil conexión a un robot (ver Fig.9)



Figura 9: Mano MechaTe.

Mano NG con un precio de \$6500 USD consta de cuatro dedos con un grado de libertad cada uno, un dedo pulgar con dos grados de libertad accionados por servomotores, la muñeca, brazo y codo cada uno accionado con un servomotor, el hombro consta de dos servomotores (ver Fig. 10).



Figura 10: Mano NG

La estructura de las manos robóticas depende demasiado del propósito final ya que algunas de ellas presentan una buena apariencia para prótesis, otras se enfocan más en el ámbito de investigación para tratar de producir los movimientos de la mano humana y otras más a propósitos de agarre o manipulación de herramientas, de la misma forma se nota que a medida que las manos robóticas son más sofisticadas y robustas el precio adquisitivo aumenta demasiado siendo no muy accesibles para cualquier persona, un factor importante en el desarrollo de propios prototipos y tecnología contribuye a la economía ofreciendo nuevos productos al usuario final.

Objetivo general:

“Desarrollar un sistema mecatrónico para una mano robótica que se pueda acoplar a un robot humanoide.”

Objetivos particulares:

1. Adecuar la mecánica del sistema para la mano robótica.
2. Estudiar el análisis de cinemática y dinámica del sistema mecatrónico.
3. Instrumentar los sistemas de control.
4. Desarrollar la interfaz de usuario para configurar el controlador deseado.
5. Pruebas del sistema diseñado.
6. Publicación de los resultados.

A continuación se presenta un resumen de cada capítulo que se aborda en esta tesis.

En el capítulo I se abordan las características principales del diseño de la mano mecatrónica de cinco grados de libertad mediante un previo estudio de la anatomía, medidas y proporciones de la mano humana ya que con ello se definen los parámetros tanto de tamaño movimientos y sistema implementado para el movimiento de la mano en la sujeción de objetos.

En el capítulo II se aborda la construcción de la mano mecatrónica, las partes mecánicas y los materiales que la conforman.

En el capítulo III se aborda el estudio de cinemática y dinámica de un dedo ya que en la construcción mecánica se usan tres eslabones para cada dedo siendo los correspondientes a falange proximal, medial y distal.

En el capítulo IV se presenta el diseño y la construcción de la etapa de potencia, protección, acondicionamiento de señales y comunicación.

En el capítulo V se presenta el firmware y software que se implementa para controlar la mano mecatrónica.

En el capítulo VI se presentan los resultados experimentales del sistema completo de la mano mecatrónica realizada.

Capítulo I: Características de la mano mecatrónica.

En este capítulo se realiza la descripción de las características de la mano mecatrónica por medio del estudio de la anatomía de la mano humana, es así como se analiza la composición estructura y movimientos de los falanges, también se analizan las medidas y proporciones aproximadas de una mano humana, se muestra el diseño de la mano mecatrónica de cinco grados de libertad (un g.d.l por dedo) mediante los datos recabados y se muestra un esquema general del sistema de la mano mecatrónica.

1.1 Anatomía de la mano humana.

La muñeca es la articulación entre el antebrazo compuesto por los huesos radio y cubito (radio-cubital) y los huesos carpianos que corresponden al carpo (ver Fig. 11), se distinguen primordialmente cuatro movimientos abducción, aducción, extensión y flexión, [7] [8] (ver Fig 12).

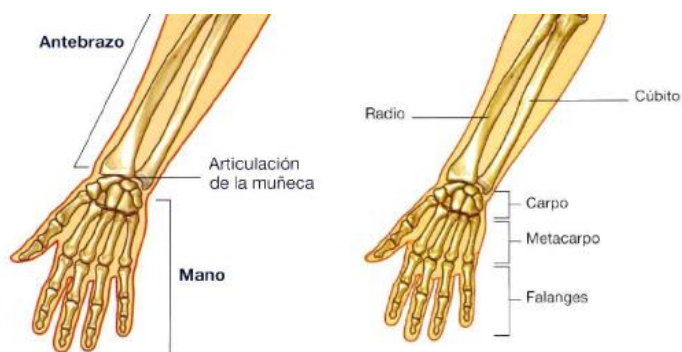


Figura 11: Articulación y huesos para movimiento de muñeca.

Los movimientos de la muñeca son 20° de abducción cubital, 30° de aducción radial, 70° de extensión y 80° de flexión (ver Fig. 12).

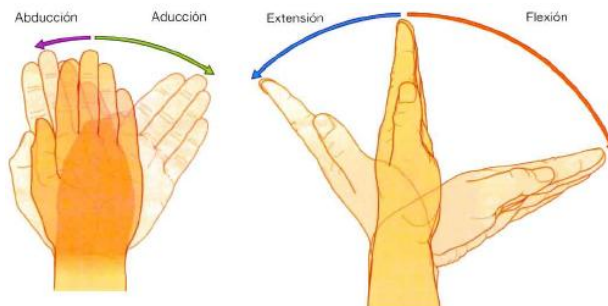


Figura 12: Movimientos de la mano en la articulación de la muñeca

Mediante los cuatro movimientos de la muñeca y los movimientos del hombro, brazo y antebrazo se puede colocar la mano en cualquier posición [7][8].

1.1.1 La mano.

Es una estructura compleja, consta de 27 huesos (ver Fig. 13), de los cuales se distinguen tres grupos principales:

1. Huesos del carpo.
2. Huesos del metacarpo.
3. Huesos de los dedos o falanges.

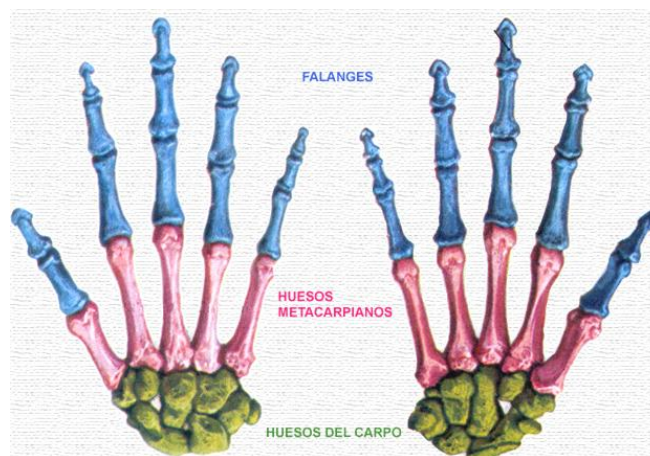


Figura 13: Huesos que componen a la mano humana.

Donde los huesos del carpo y metacarpo forman la estructura palmar, nos enfocaremos en el grupo de los falanges o dedos ya que estos realizan el mayor porcentaje de movimiento para la sujeción de objetos [17].

1.1.2 Falanges.

Este grupo de huesos se divide en falanges proximales, mediales y distales (ver Fig. 13), los falanges proximales se unen a los huesos metacarpianos por medio de ligamentos metacarpianos, los falanges mediales se unen a los falanges proximales por medio de los ligamentos colaterales, y los falanges distales se unen a los falanges mediales por medio de un ligamento central y un tendón flexor que flexiona el grupo de los falanges [7].

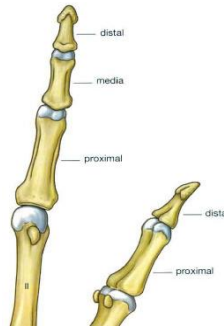


Figura 14: Huesos que componen los falanges y el pulgar.

El falange correspondiente al dedo pulgar consta de metacarpo un falange proximal y un falange distal (ver Fig. 14).

1.1.3 La articulación carpo metacarpiana (palma de la mano).

Esta articulación comprende el conjunto de los huesos metacarpianos y los huesos carpianos y está cubierta por cartílago hialino que se extiende sobre el dorso y alrededor de la superficie palmar en una superficie curva. En esta articulación ocurre la flexión–extensión (dorsal–palmar), la abducción–aducción son movimientos voluntarios sin embargo hay rotación palmar como un movimiento involuntario (pronación – supinación) [7]

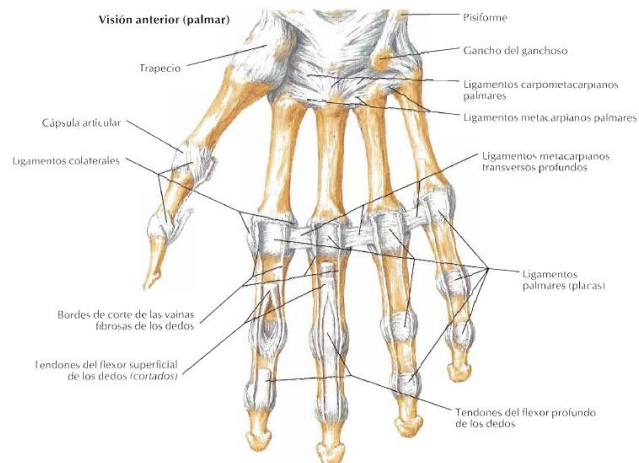


Figura 15: Vista palmar.

El conjunto de estas articulaciones permite el movimiento en el que la superficie cóncava de la falange proximal se desliza a lo largo de la superficie convexa del metacarpo esto se puede visualizar como una bisagra entre el metacarpo y el falange proximal.

La superficie proximal de la falange tiene un arco de 20° mientras que la cabeza metacarpiana tiene un arco de superficie de 180° . El movimiento de la articulación metacarpo-falángica es de 90° de flexión palmar y aproximadamente 20° de hiperextensión.

La abducción y la aducción de la articulación metacarpofalángica se limita cuando el dedo se flexiona, debido a que el borde distal de la cabeza está aplanado y los ligamentos laterales se encuentran tensos durante la flexión. Estos últimos se originan en un pequeño tubérculo colocado excéntricamente en las superficies laterales de la cabeza. Cuando el dedo se encuentra extendido, los ligamentos colaterales están relajados, permitiendo el movimiento lateral. En la posición de flexión, la base de la falange descansa firmemente en la superficie del metacarpo, el cual se encuentra más lejos del eje de rotación y los ligamentos, se tensan. En la cara palmar de la articulación los cóndilos también son más anchos que en la cara dorsal, aumentando aún más la tensión de los ligamentos [7].

No existen ligamentos en la superficie dorsal de las articulaciones metacarpo falángicas, los tejidos limitantes son los tendones extensores de los dedos. La cara palmar de estas articulaciones está reforzada por los platillos palmares y está formada de cartílago y unida firmemente a la porción proximal de la falange. La porción proximal del platillo es membranosa y se une lejanamente con el metacarpo. Los platillos están colocados firmemente contra las articulaciones por medio de fibras de los ligamentos laterales y están conectados entre sí con los ligamentos transversos profundos. Los platillos refuerzan la cápsula de la articulación y se interponen entre las superficies de esta última y los tendones flexores que la atraviesan. En cada metacarpo existe un abultamiento del ligamento, el cual encierra a los tendones flexores y forma parte del conducto de los tendones [7].

1.1.4 Las articulaciones interfalángicas.

Estas articulaciones tienen la función de una bisagra permitiendo únicamente la flexión y la extensión y hay diferencias básicas con las articulaciones metacarpofalángicas (ver Fig. 16).

1.- La articulación metacarpofalángica es una articulación esférica que permite la abducción, la aducción y la circunducción. La articulación interfalángica es una articulación en bisagra que permite la flexión y la extensión.

2.- Las configuraciones de las superficies articulares son diferentes.

3.- La hiperextensión, es posible en la articulación metacarpofalángica de forma pasiva, pero no en las articulaciones interfalángicas.

4.- Los ligamentos colaterales están tensos en la flexión y laxos en la extensión en las articulaciones metacarpofalángicas, pero no se tiene una idea clara de ellos en las articulaciones interfalángicas.

5.- En las articulaciones metacarpofalángicas los platillos palmares están conectados a muchos tejidos móviles ligamento transverso profundo, tendones de los músculos interóseos y aponeurosis palmar en tanto que en las articulaciones interfalángicas, el platillo es menos móvil [7].

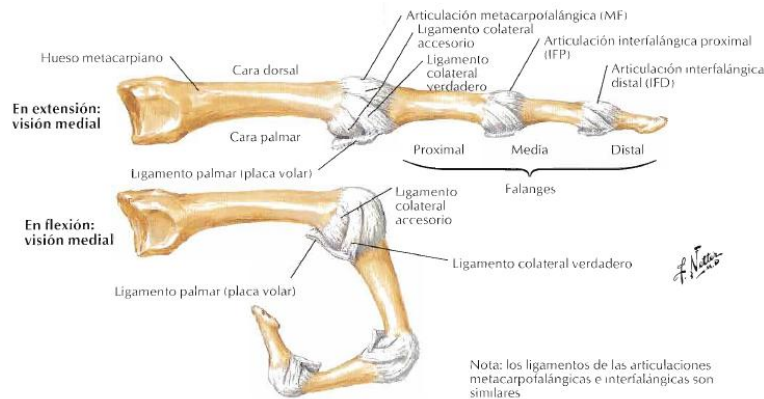


Figura 16: Articulaciones de falanges.

1.1.5 Inserción de los tendones de los dedos y control Muscular.

Los músculos que se enfocan a hacer los distintos movimientos de la mano, muñeca y dedos se pueden dividir en extrínsecos e intrínsecos.

1.1.5.1 Músculos Extrínsecos

Los músculos extrínsecos se encuentran en los compartimentos anteriores y posteriores del antebrazo. Estos controlan los movimientos fuertes y se encargan del agarre.

Los dedos tienen dos flexores largos, situados en la parte inferior del antebrazo. Se insertan en los tendones a las falanges de los dedos. El flexor profundo se une a la falange distal y el flexor superficial se adhiere a la falange media. Los flexores permiten la flexión real de los dedos. El pulgar tiene un flexor largo y flexor corto en el grupo muscular tenar, también tiene otros músculos en el grupo tenar, moviendo el dedo pulgar en la oposición.

Los extensores están ubicados en la parte posterior del antebrazo y están conectados de una manera más compleja que los flexores en el dorso de los dedos. Los tendones unen los músculos interóseos y lumbricales para formar el mecanismo extensor.

La función principal de los extensores es enderezar los dígitos (figura 17). El pulgar tiene dos extensores del antebrazo, los tendones de estos forman la tabaquera anatómica.

Además, el dedo índice y el dedo meñique tienen un extensor extra, se utiliza por ejemplo para apuntar. Los extensores están ubicados dentro de los 6 compartimentos separados.

Los primeros cuatro compartimentos se encuentran en las ranuras presentes en el dorso del lado inferior del radio, mientras que el quinto compartimento está en entre el radio y el cúbito. El sexto compartimento esté en la ranura en el dorso del lado inferior del cúbito, [8].

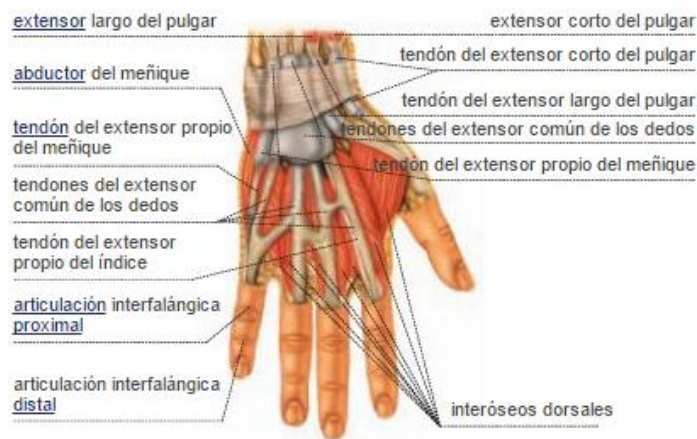


Figura 17: Vista dorsal de los tendones extensores de la mano.

1.1.5.1 Músculos Intrínsecos.

Los músculos intrínsecos se encuentran dentro de la propia mano y son los responsables de las funciones motoras delicadas de la mano (figura 18).

Los grupos de músculos intrínsecos son el tenar e hipotenar, los músculos interóseos originarios entre los huesos metacarpianos y los músculos lumbricales derivados del flexor profundo para insertar en el mecanismo extensor dorsal campana [7][8].

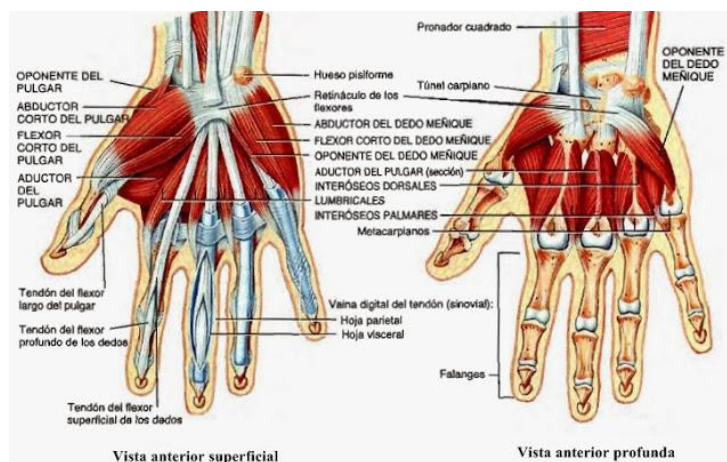


Figura 18: Vista palmar de los abductores flexores meñique y pulgar.

1.1.5.2 Sistema flexor.

Los flexores de los dedos y de la muñeca se dividen en los músculos extrínsecos, cuyo origen se encuentra en el antebrazo y flexan principalmente las articulaciones interfalángicas, y los músculos intrínsecos, cuyo origen se encuentra distal a la muñeca y flexan principalmente las articulaciones metacarpofalángicas.

Los flexores extrínsecos son nueve, nacen en la parte anterior del codo y terminan como tendones largos con unas características especiales, que se insertan en la falange medial y en la distal de cada dedo:

El flexor largo del pulgar (FLP), que flexa la interfalángica del pulgar (1er dedo), inervado por el nervio interóseo anterior rama del nervio mediano y que se inserta en la falange distal del pulgar.

El flexor digital superficial (FDS), flexiona la articulación interfalángica proximal de los dedos 2° al 5°; inervado por el nervio mediano y que se inserta en el lado palmar de la falange media de los dedos.

El flexor digital profundo (FDP), flexiona la articulación interfalángica distal, tiene su inserción en el lado palmar de la falange distal de los dedos 2° al 5° y está inervado, la parte radial o de los dedos índice y medio interóseo anterior rama del nervio mediano y la parte cubital o de los dedos anular y meñique por el nervio cubital. Controla la tensión de la articulación de la interfalángica distal, [9][10].

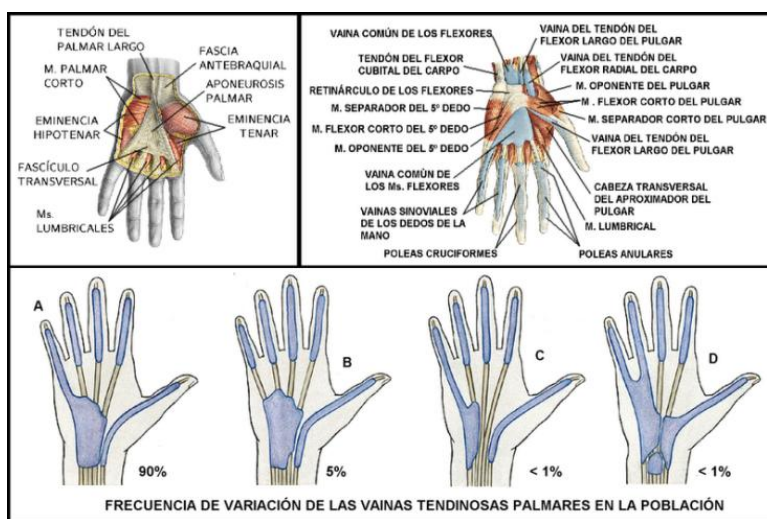


Figura 19: Sistema Flexor de la mano y vainas para guiar los tendones.

1.2 Movimientos de los dedos de la mano.

Los movimientos de los dedos de la mano se realiza en el plano extensor-flexor exceptuando el dedo pulgar, la flexión constituye la mayor parte del movimiento de las articulaciones de los dedos y se dividen en metacarpo falángico, interfalángico proximal e interfalángico distal, [11][18] (ver Fig.20).

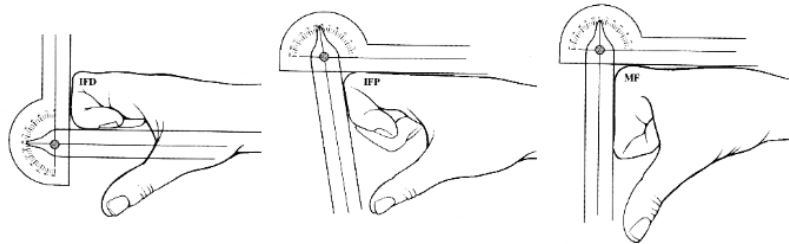


Figura 20: Movimiento de los dedos en flexion.

Los grados correspondientes a la flexión de la figura 20 para cada articulación de los dedos [11] se pueden ver en la tabla 1.

Articulación	Flexión	Extensión
MF	90°	-20
IFP	100°	0
IFD	35°	0
Suma	225°	-20

Tabla 1: Grados correspondientes a flexión y extensión de los dedos

1.2.1 Movimiento del pulgar.

Una particularidad del dedo pulgar es que cuenta con el metacarpiano, falange proximal y falange distal, es decir no cuenta con falange medial, y los ángulos activos para cada segmento son: rotación de 70° radiales en el metacarpiano, 80° del falange proximal y 50° del falange distal, [11] [18] (ver Fig. 21).

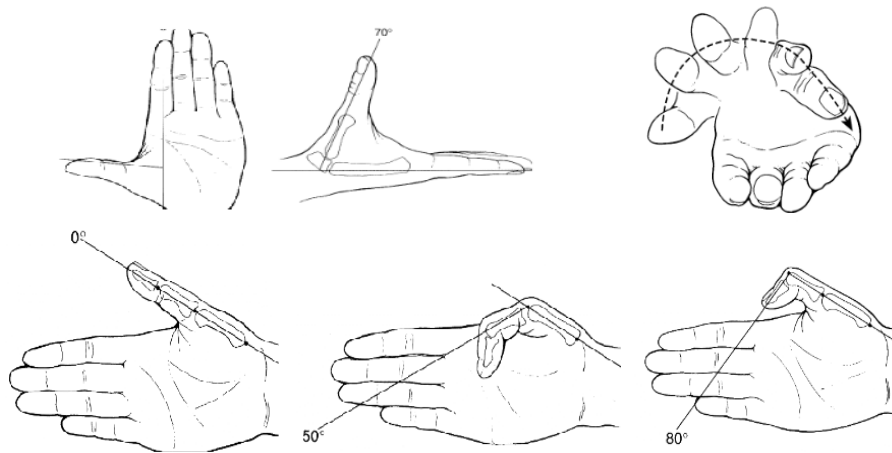


Figura 21: Movimientos del pulgar y ángulos de flexión.

Los grados correspondientes a la flexión del dedo pulgar se muestran en la tabla 2.

Articulación	Flexión	Extensión
MFR	70°	0
IFP	80°	0
IFD	50°	0
Suma	200°	0

Tabla 2: Grados de flexión del dedo pulgar.

1.2.2 Medidas Norma DIN 33 402.

En las figuras 22 y 23 junto con las tablas 3 y 4 se dan las medidas de las manos según la Norma DIN 33 402 2°, destinadas a ser usadas en el diseño y/o elección de herramientas, utilaje y mandos [11][18].

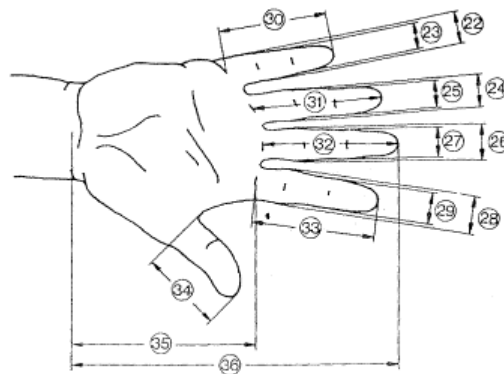


Figura 22: Vista Palmar de la mano.

Dimensiones en cm.		PORCENTAJE					
		Hombres			Mujeres		
		5 %	50 %	95 %	5 %	50 %	95 %
22	Ancho del meñique en la palma de la mano	1,8	1,7	1,8	1,2	1,5	1,7
23	Ancho del meñique próximo de la yema	1,4	1,5	1,7	1,1	1,3	1,5
24	Ancho del dedo anular en la palma de la mano	1,8	2,0	2,1	1,5	1,6	1,8
25	Ancho del dedo anular próximo a la yema	1,5	1,7	1,9	1,3	1,4	1,6
26	Ancho del dedo mayor en la palma de la mano	1,9	2,1	2,3	1,6	1,8	2,0
27	Ancho del dedo mayor próximo a la yema	1,7	1,8	2,0	1,4	1,5	1,7
28	Ancho del dedo índice en la palma de la mano	1,9	2,1	2,3	1,6	1,8	2,0
29	Ancho del dedo índice próximo a la yema	1,7	1,8	2,0	1,3	1,5	1,7
30	Largo del dedo meñique	5,6	6,2	7,0	5,2	5,8	6,6
31	Largo del dedo anular	7,0	7,7	8,6	6,5	7,3	8,0
32	Largo del dedo mayor	7,5	8,3	9,2	6,9	7,7	8,5
33	Largo del dedo índice	6,8	7,5	8,3	6,2	6,9	7,6
34	Largo del dedo pulgar	6,0	6,7	7,6	5,2	6,0	6,9
35	Largo de la palma de la mano	10,1	10,9	11,7	9,1	10,0	10,8
36	Largo total de la mano	17,0	18,6	20,1	15,9	17,4	19,0

Tabla 3: Medidas de la mano Norma DIN 33 402



Figura 23: Vista lateral de la mano.

Dimensiones En cm.		PORCENTAJE					
		Hombres			Mujeres		
		5 %	50 %	95 %	5 %	50 %	95 %
37	Ancho del dedo pulgar	2,0	2,3	2,5	1,6	1,9	2,1
38	Grosor de la mano	2,4	2,8	3,2	2,1	2,6	3,1

Tabla 4: Medidas Pulgar y grosor de mano.

1.3 Características de la mecánica de la mano.

Del previo estudio de anatomía, se destacan las siguientes premisas en el diseño de la mano en particular de los dedos o falanges ya que con los mismos se realiza la mayoría del movimiento de la mano.

- De la sección 1.1.2 se realiza el acople del sistema mecánico para el movimiento de los dedos que se componen de los huesos metacarpianos-falange-proximal, falanges proximal-medial, y falanges medial-distal, por medio de las articulaciones proximal, medial y distal, esto se realiza mediante la unión de los eslabones correspondientes con pernos formando una bisagra (ver Fig. 24).

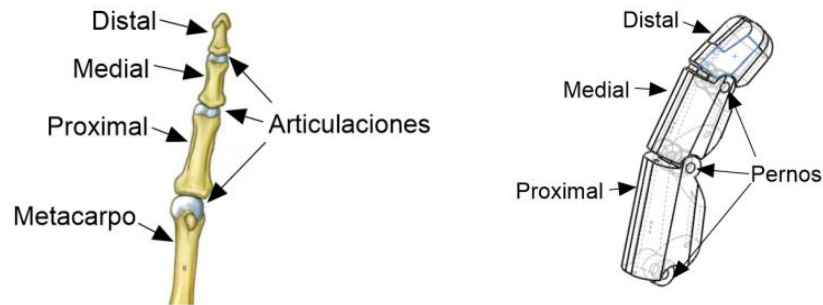


Figura 24: Analogía entre anatomía de dedo y diseño.

- De la sección 1.1.5 se adaptan dentro de los dedos y la palma los conductos responsables para introducir los ligamentos extensores y flexores respectivos para el movimiento de la mano mediante los actuadores.
- De la sección 1.2 se usan los valores de los movimientos en grados para los dedos (índice, medio, anular y meñique) vistos en la tabla 1 y para el movimiento del pulgar los de la tabla 2 en flexión.
- De la sección 1.2.2 se aplicaron las dimensiones físicas para los dedos correspondientes al 95% de los hombres.
- Una mano humana pesa aproximadamente 500gr este es un dato importante para no sobrepasar este parámetro.

1.4 Especificaciones de la mano mecatrónica.

Las especificaciones principales en el desarrollo de la mano mecatrónica

1. El sistema contará con cuatro dedos y un dedo pulgar.
2. El sistema mecatrónico propuesto estará basado en la cinemática y dinámica de los seres humanos.
3. El sistema contará con un mecanismo efectivo para la manipulación desde herramientas de software (en tiempo real).

4. El sistema mecatrónico contará con un mecanismo automático de shut-down (apagado seguro) y de un mecanismo de seguridad que evite daños en los servomecanismos.

1.5 Diagrama general del sistema

El usuario mediante una GUI (Interfaz) realizada en LabView se comunica hacia el sistema mecatrónico por medio de una interfaz wifi a través del módulo wifly, al recibir los datos de posición deseada y ganancias se mandan a un bloque de administración de wifi el cual se comunica al bloque decodificador de comandos, donde se ordenan y envían los datos hacia el bloque multiplexor (puertos de entrada), la salida del multiplexor entra a un bloque de procesamiento para ejecutar nuestro algoritmo de control el cual es uno de tipo proporcional.

El bloque de procesamiento es un microprocesador [1] implementado en FPGA capaz de ejecutar su propio conjunto de instrucciones en ensamblador, a su vez este conjunto de instrucciones se tienen que compilar para poder ser traducidas a un lenguaje hexadecimal que interpreta el procesador y permite la ejecución del control.

De esta forma se ejecuta el algoritmo de control y el resultado proporcionado como el error de posición procesado se demultiplexa (puertos de salida) para mandar los datos a los cinco bloques correspondientes de PWM donde se generan las señales hacia las etapas de potencia

Las etapas de potencia se encargan de proporcionar energía a los actuadores en nuestro caso los motorreductores, estos a su vez tienen en su eje de giro encoders de cuadratura los cuales proporcionan las señales digitales las cuales entran a una etapa de acondicionamiento y la salida de la misma a un bloque decodificador para poder obtener la posición y sentido de giro donde se obtiene la posición actual ésta es ingresada a la etapa de multiplexión (puertos de entrada) donde el procesador calcula el error restando la posición deseada de la actual, cerrando los cinco lazos de control correspondientes a los cinco dedos de la mano mecatrónica.

En la figura 25 se muestra el diagrama general del sistema mecatrónico.

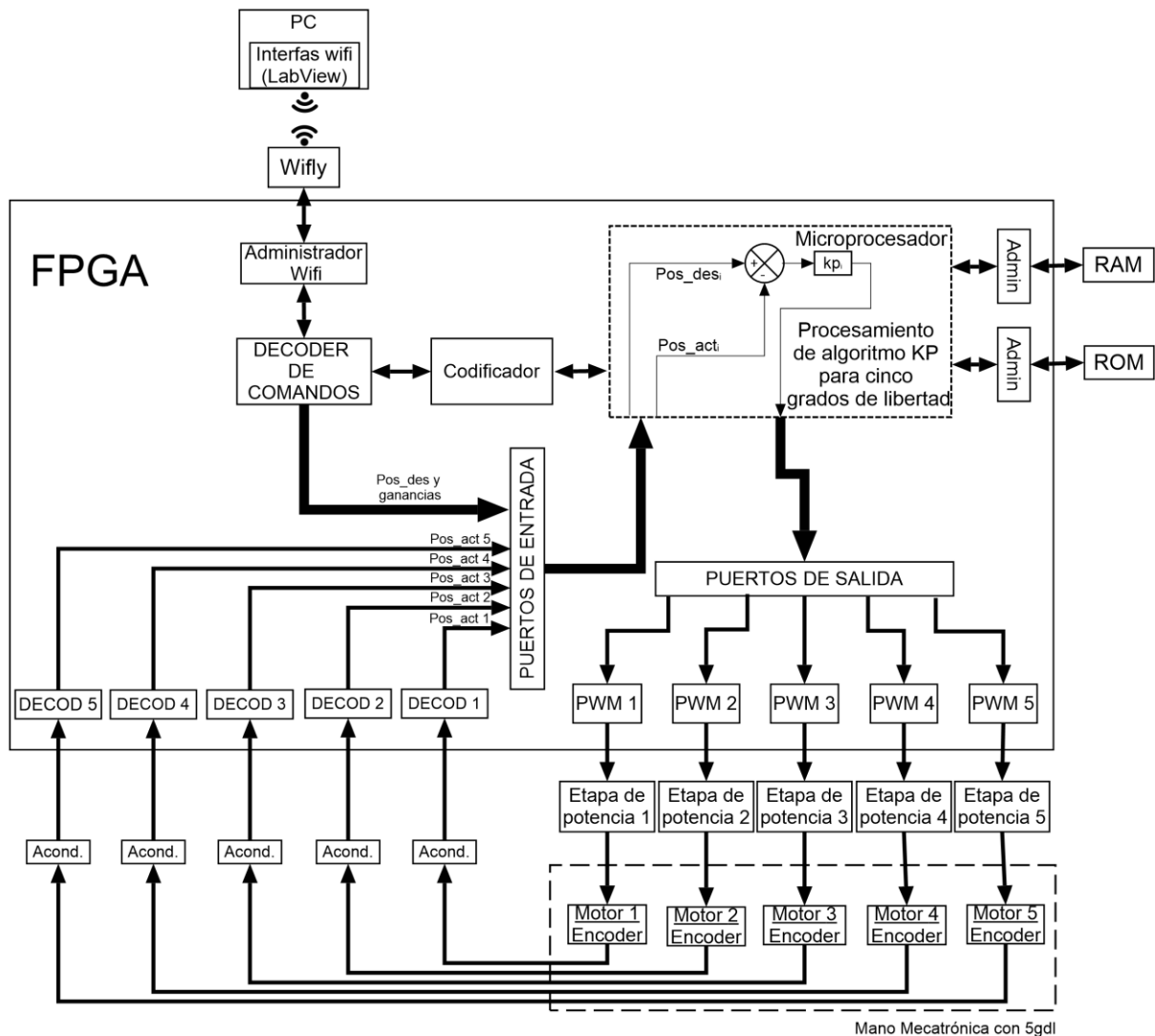


Figura 25: Diagrama general del sistema mecatrónico.

1.6 Conclusiones.

En este capítulo se realizó un estudio la anatomía de los dedos los cuales en su estructura se compone de los huesos mediales proximales y distales, se definieron las características de movimiento y medidas que se debe realizar mecánicamente, así como también se definieron los conductos de la flexión y extensión de los dedos se mostraron las características y especificaciones a cumplir de la mano a realizar así como un diagrama general del sistema mecatrónico implementado en el control del movimiento de la mano.

Capítulo II: Diseño y construcción del sistema mecánico de la mano.

A continuación se define el diseño de la mecánica de la mano que se construirá físicamente del primer prototipo mediante la plataforma de diseño SolidWorks y la construcción mediante impresión 3d, las ventajas de contar con esta dos herramientas permite realizar un prototipo rápido y eficiente desde la idea hasta la corrección en tiempo y forma abaratando costos y sin necesidad de recurrir a una empresa para su realización, también se define la mecánica y restricciones que tiene el movimiento los dedos de la mano mecatrónica en base a las especificaciones y características vistas en el capítulo 1.

2.1 Diseño de los dedos.

En el diseño de los dedos mediante el uso de la plataforma SolidWorks se tomaron en cuenta las medidas aproximadas vistas en el capítulo 1 de los falanges proximal, medial y distal para cada dedo, así como también los ángulos de flexión, para el acoplamiento mecánico entre los eslabones de los dedos y la palma se hizo uso de pernos de 3 mm los cuales se insertan entre dos eslabones formando una bisagra para que la articulación tenga movimiento como se muestra en la figura 26.

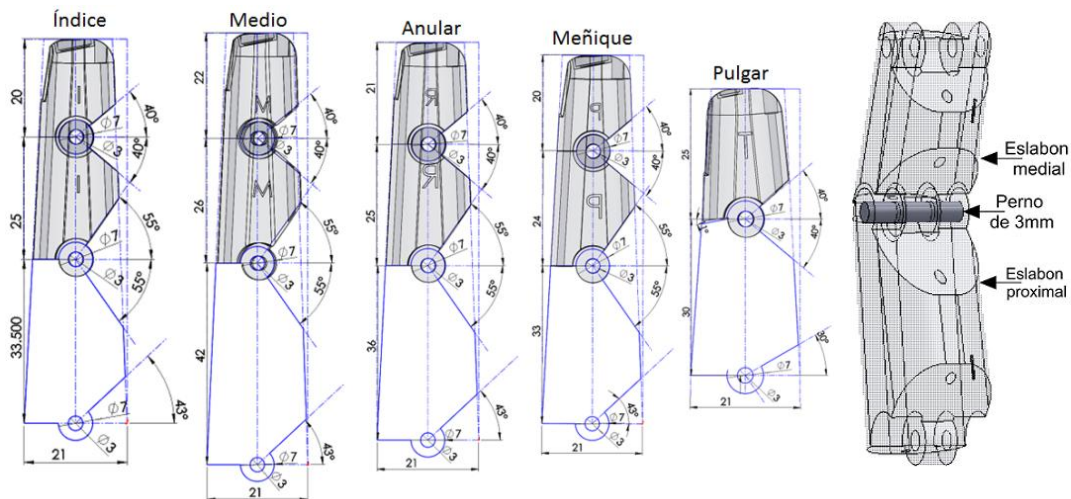


Figura 26: Dimensiones físicas de falanges (En mm.) diseñados y movimiento.

Para realizar el movimiento de los dedos se barrenaron las piezas dando como resultado un conducto de extensión donde se inserta un ligamento y un conducto de flexión donde se inserta un hilo (ver Fig. 27) el cual estará acoplado al actuador mediante una polea.

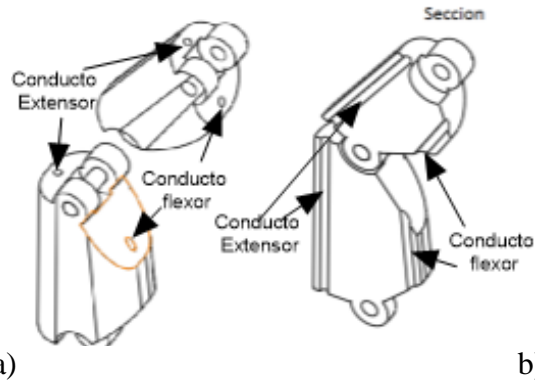


Figura 27: Conductos flexor y extensor de los dedos, vista normal y seccionada.

2.2 Diseño de palma de mano.

En esta sección se muestra el diseño de la palma de la mano que se realizó mediante técnicas de modelado con superficies y se tomó como referencia una imagen de una mano para darle un aspecto más real, ya que se requería que en su construcción fuera agradable al usuario (ver Fig. 28).

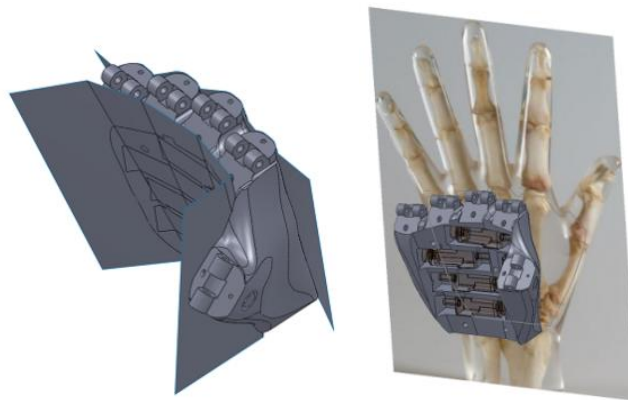


Figura 28: Diseño con superficies de la palma de la mano en SolidWorks.

Se diseñaron e imprimieron una serie de plantillas para los actuadores los cuales se componen de: motorreductor, polea e hilo flexor que son los responsables de la flexión de los dedos, (ver Fig. 29).

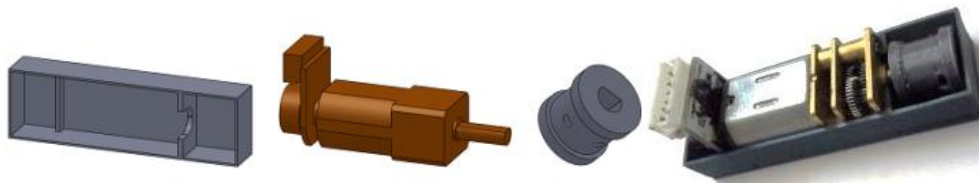


Figura 29: Plantillas realizadas para motores y polea.

Mediante las plantillas se realizaron los cortes correspondientes en la palma de la mano y asegurar que los componentes pudieran entrar sin complejidad teniendo como resultado un sistema íntegro y así culminar con el diseño de la mano completa (ver Fig. 30).

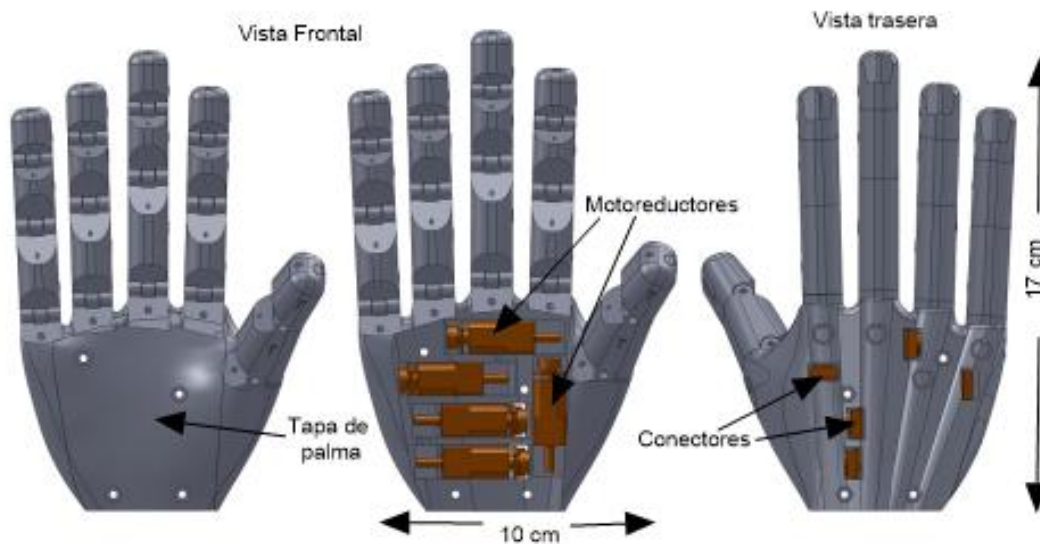


Figura 30: Vistas frontal y trasera de mano diseñada.

Los parámetros aproximados correspondientes a las medidas del hilo flexor para contraer cada dedo mediante las restricciones de la mecánica diseñada se presentan en la tabla 5.

Restricciones de Flexión	
Dedo	Longitud de hilo Flexor
Pulgar	20.7 mm
Índice	43 mm
Medio	44.3 mm
Anular	46.3 mm
Meñique	40.7 mm

Tabla 5: Medidas de los hilos flexores de los dedos.

La medida del diámetro de la polea diseñada es de 7.8mm. La misma se encarga de realizar el acople mecánico entre el actuador y el hilo flexor correspondiente de la tabla 5 para el movimiento de cada dedo (ver fig 31).



Figura 31: Medida de polea en mm.

2.3 Construcción de la mano.

En la construcción de la mano fue necesario convertir los archivos de SolidWorks de su extensión “.sldprt” a “.stl” mediante la exportación de los archivos y se realiza desde menú archivo>guardar como... y se elige en el tipo de archivo como stl, una vez convertidos a este formato, se abre la interfaz de Cura (Software de Impresión 3D) y se manda a imprimir desde usb hacia la impresora 3D.

En el armado de los dedos se usaron pernos de 3mm x 15mm y 3mm x 21mm (ver Fig. 32), el ligamento se insertó desde el falange distal hasta la palma de la mano dentro del conducto extensor y el hilo flexor en el conducto correspondiente desde el falange distal hasta la polea que esta acoplada al motorreductor, (ver Fig. 33).

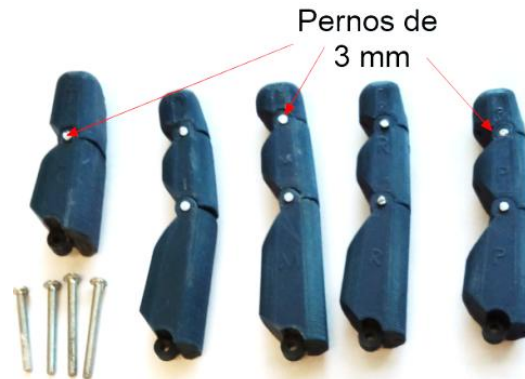


Figura 32: Armado de los dedos.

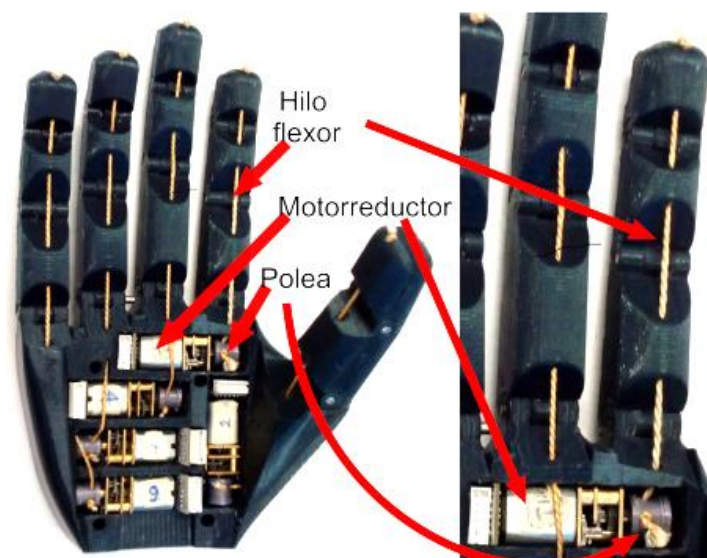


Figura 33: Mano con actuadores-

2.4 Actuadores.

Cada uno de los actuadores responsables del movimiento de los dedos se componen de tres elementos estos son motor que en su eje tiene acoplado un encoder de 28 pulsos por vuelta y caja reductora de 100:1 ofreciendo 2800 pulsos por vuelta del eje reductor (ver Fig. 34), polea de 7.8mm acoplada en el eje de la caja reductora e hilo flexor (ver Fig 33).

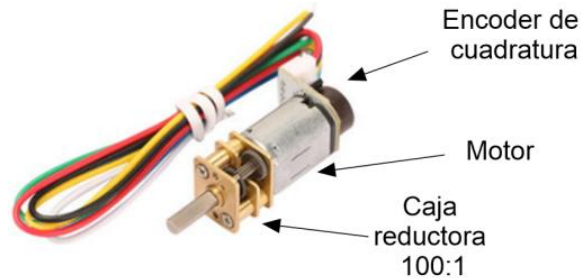


Figura 34: Motorreductor CGM20VA-08200.

Mediante la tabla 5 y el diámetro de la polea visto en la figura 31, haciendo uso de la ecuación de una circunferencia se puede determinar la cantidad de vueltas que tiene que girar el motorreductor y a su vez se puede calcular el número de pulsos aproximados para realizar la flexión total de cada dedo.

El cálculo del número de vueltas puede obtenerse mediante la siguiente ecuación:

$$N = \frac{L}{\pi * d} \quad (1)$$

Dónde:

L es la longitud del respectivo hilo flexor en mm.

π es aproximadamente 3.1416.

d es el diámetro de la polea en mm.

N es el número de vueltas del eje del reductor.

De donde se obtienen los datos de la tabla 6.

<i>Dedo</i>	<i>Vueltas del eje reductor</i>
Pulgar	0.845
Índice	1.755
Medio	1.807
Anular	1.89
Meñique	1.66

Tabla 6: Numero de vueltas de la caja reductora respecto al hilo en flexión total

El cálculo del número de pulsos a contar para realizar la flexión total de cada dedo se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$P = N * C * R = N * 100 * 24 \quad (2)$$

Dónde:

N es el número de vueltas del eje del reductor previamente calculadas.

C es el factor de reducción (100:1) del motorreductor.

R es la resolución de conteos por cada vuelta del motor.

P es el número de pulsos calculado.

Los pulsos teóricos a contar para realizar la flexión total de cada dedo se ven en la tabla 7.

Dedo	Numero de pulsos
Pulgar	2366
Índice	4914
Medio	5059
Anular	5292
Meñique	4651

Tabla 7: Numero de pulsos para flexión total de cada dedo de la mano.

2.5 Conclusiones

El diseño de la palma de la mano se realizó la plataforma SolidWorks por modelado de superficies proporcionando un aspecto más real, el mismo método se usó para el corte de la tapa de la palma, en los cortes donde se insertan los motores se realizaron plantillas para asegurar que entraran dentro de la mano sin complejidad, también se aprendió a usar la impresora 3D mediante el software Cura para obtener el archivo a imprimir hacia la impresora 3D, se imprimió una mano preliminar con los datos del fabricante con tolerancia y eran incorrectas por lo cual se tuvo que rediseñar e imprimir la mano dos veces debido a que los motores no coincidían con las medidas especificadas, es así como en el primer diseño completo los motores no entraban y se decidió imprimir de nuevo la mano mejorando el diseño para que los motores quedaran fijos de igual forma se hicieron varias modificaciones a la palma para colocar una base y funcionara como muñeca.

Mediante el ensamble final del modelo se pudo obtener una aproximación de la cantidad de hilo que se tiene que retraer mediante el motorreductor y la polea para poder hacer la flexión de los dedos y a su vez se obtuvo una relación del número de vueltas del eje del motorreductor y el número de cuentas aproximadas siendo parámetros a considerar para las restricciones del algoritmo de control y la interfaz en LabView.

Capítulo III: Cinemática y Dinámica.

Este capítulo comprende el estudio del modelo dinámico de un dedo correspondiente a un robot planar de 3 grados de libertad ya que la mano en su construcción mecánica está compuesta por cinco dedos y cada dedo está constituido por tres elementos correspondientes a las uniones de tres falanges (proximal, medial y distal) y en el caso del pulgar constituido por metacarpiano, falange proximal y distal. Este modelo ya ha sido publicado por lo que es una revisión del previo trabajo¹.

3.1 Cinemática.

Es la parte de la física que describe geoméricamente el movimiento de sistemas mecánicos sin tomar en cuenta las fuerzas que lo producen, en el caso de robots manipuladores se emplea el término "cinemática directa" y se refiere al estudio analítico del movimiento del robot sin tomar en cuenta las fuerzas que lo originan, el estudio de la cinemática directa proporciona elementos para analizar y diseñar el desplazamiento de trayectorias del robot así como la orientación del efector final (herramienta de trabajo) [13].

Convención Denavit-Hartenberg: Existen varios métodos para obtener el modelo cinemático directo de robots manipuladores, en el caso en que el número de grados de libertad crece el análisis se complica es por ello que se recurren a métodos más sencillos uno de estos es la metodología de Denavit-Hartenberg y en su estructura en cadena cinemática abierta (el final de un eslabón es la base del siguiente) queda representado en transformaciones homogéneas,[12][14].

El procedimiento consiste en determinar una tabla de parámetros que relaciona a los eslabones del robot en cadena cinemática abierta, estos parámetros son los siguientes:

θ_i es el Ángulo entre los ejes X_{i-1} y X_i medido alrededor del eje Z_{i-1} en sentido anti horario.

α_i es el Ángulo entre los ejes Z_{i-1} y Z_i medido alrededor del eje X_{i-1} en sentido horario.

l_i es la Distancia entre los ejes Z_{i-1} y Z_i medida sobre el eje X_{i-1} .

d_i es la Distancia entre los ejes X_{i-1} y X_i medida sobre el eje Z_{i-1} (offset).

l_i Siempre es positivo por que corresponde a una longitud, mientras que α_i, d_i y θ_i son cantidades con signo y β_i representa el espesor del servomotor.

[16]¹Alberto de Jesús Lagunes limon, "Diseño y construcción de un guante sensor de posiciones", Tesis de maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Junio 2009.

La tabla de parámetros de D-H tiene la siguiente estructura:

Eslabón	l_i	α_i	$d_i; \beta_i$	θ_i
---------	-------	------------	----------------	------------

En la representación D-H cada transformación homogénea H_i se representa por el producto de cuatro transformaciones básicas:

$$H_i = R_{z_i\theta_i} T_{z_i d_i} T_{x_i l_i} R_{x_i \alpha_i}$$

Donde:

$$R_{z_i\theta_i} = \begin{bmatrix} C(\theta_i) & -S(\theta_i) & 0 & 0 \\ S(\theta_i) & C(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; \quad T_{z_i d_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i(\beta_i) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{x_i l_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; \quad R_{x_i \alpha_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C(\alpha_i) & -S(\alpha_i) & 0 \\ 0 & S(\alpha_i) & C(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Por lo tanto para cada eje de referencia existe una transformación homogénea, [13] de la forma:

$$H_i = \begin{bmatrix} C(\theta_i) & -S(\theta_i)C(\alpha_i) & S(\theta_i)S(\alpha_i) & l_i C(\theta_i) \\ S(\theta_i) & C(\theta_i)C(\alpha_i) & -C(\theta_i)S(\alpha_i) & l_i S(\theta_i) \\ 0 & S(\alpha_i) & C(\alpha_i) & d_i(\beta_i) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Por simplicidad se usó la notación: $\cos(\theta_i) = C(\theta_i)$ y $\sin(\theta_i) = S(\theta_i)$.

3.1.1 Modelo cinemático de un dedo.

La cinemática directa de una articulación de tres grados de libertad planar (falanges de un dedo) haciendo uso de la metodología de Denavit-Hartenberg y colocando los ejes de referencia (ver Fig. 35).

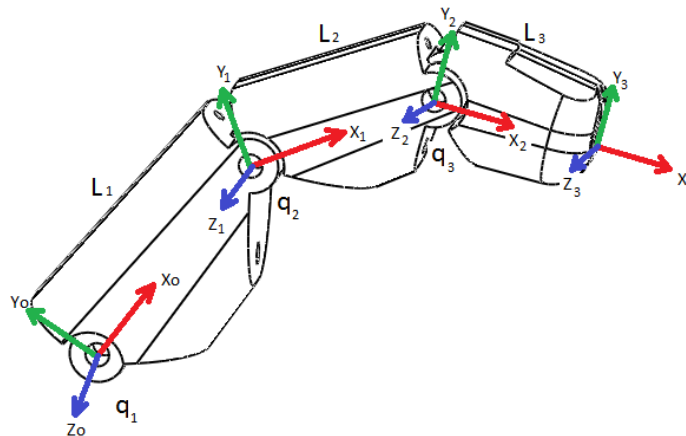


Figura 35: Ejes de referencia para cinemática directa usando D-H.

La tabla de los parámetros D-H correspondiente a los ejes de referencia del dedo es la siguiente:

Eslabón	l_i	α_i	$d_i; \beta_i$	θ_i
1	L1	0	0	q1
2	L2	0	0	q2
3	L3	0	0	q3

Tabla 8: Parámetros D-H de un dedo planar de 3gdl

Las matrices de transformación homogénea asociadas a los tres eslabones respecto a cada eje de referencia son:

$$H_1^0 = \begin{bmatrix} C(q_1) & -S(q_1) & 0 & l_1 C(q_1) \\ S(q_1) & C(q_1) & 0 & l_1 S(q_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$H_2^1 = \begin{bmatrix} C(q_2) & -S(q_2) & 0 & l_2 C(q_2) \\ S(q_2) & C(q_2) & 0 & l_2 S(q_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$H_3^2 = \begin{bmatrix} C(q_3) & -S(q_3) & 0 & l_3 C(q_3) \\ S(q_3) & C(q_3) & 0 & l_3 S(q_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Mediante el uso de Matlab se obtuvieron las matrices de transformación homogénea de cada eslabón y es la multiplicación de las matrices individuales de cada articulación por sus anteriores o bien:

Para la articulación proximal:

$$H_1^0 = \begin{bmatrix} C(q_1) & -S(q_1) & 0 & l_1 C(q_1) \\ S(q_1) & C(q_1) & 0 & l_1 S(q_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Para la articulación medial:

$$H_2^0 = H_2^1 * H_1^0 = \begin{bmatrix} C(q_1 + q_2 + q_3) & -S(q_1 + q_2 + q_3) & 0 & l_1 C(q_1) + l_2 C(q_1 + q_2) \\ S(q_1 + q_2 + q_3) & C(q_1 + q_2 + q_3) & 0 & l_1 S(q_1) + l_2 S(q_1 + q_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Para la articulación distal:

$$H_3^0 = H_3^2 * H_2^1 * H_1^0 \quad (9)$$

$$= \begin{bmatrix} C(q_1 + q_2 + q_3) & -S(q_1 + q_2 + q_3) & 0 & l_1 C(q_1) + l_2 C(q_1 + q_2) + l_3 C(q_1 + q_2 + q_3) \\ S(q_1 + q_2 + q_3) & C(q_1 + q_2 + q_3) & 0 & l_1 S(q_1) + l_2 S(q_1 + q_2) + l_3 S(q_1 + q_2 + q_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La cinemática directa de un dedo respecto al centro de masa está dado por:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{c1} C(q_1) \\ l_{c1} S(q_1) \end{bmatrix} \quad \text{Articulación proximal}$$

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 C(q_1) + l_{c2} C(q_1 + q_2) \\ l_1 S(q_1) + l_{c2} S(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \quad \text{Articulación medial}$$

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 C(q_1) + l_{c2} C(q_1 + q_2) + l_{c3} C(q_1 + q_2 + q_3) \\ l_1 S(q_1) + l_{c2} S(q_1 + q_2) + l_{c3} S(q_1 + q_2 + q_3) \end{bmatrix} \quad \text{Articulación distal}$$

Se obtiene la cinemática directa de los dedos o falanges respecto al centro de masa de cada eslabón esto es el primer paso para el modelo dinámico.

3.2 Modelo Dinámico.

Una de las metodologías más usadas en la obtención del modelo dinámico de un robot corresponde al de las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange y en este caso se hace uso del mismo para obtener el modelo dinámico del robot planar de 3gdl.

Ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange

En esta sección se obtiene el modelo dinámico de un robot formado por eslabones rígidos conectados por articulaciones en cadena cinemática abierta y se describe el procedimiento. La siguiente metodología es usada para obtener las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange (Modelo Dinámico):

1. Obtener la cinemática directa del centro de masa de cada uno de los eslabones.
Para el i-ésimo eslabón tomar en cuenta las longitudes anteriores l_{i-1} y ángulos q_i y q_{i-1}

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = f_R(l_i, l_{i-1}, l_{ci}, q_{i-1}, q_i) \quad (10)$$

2. Obtener la cinemática diferencial del i-ésimo eslabón y de ahí deducir la rapidez lineal:

$$\mathbf{v}_i = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

La rapidez lineal del centro de masa de cada eslabón se calcula de la siguiente forma:

$$\mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_i = \dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2 \quad (12)$$

3. Obtener el modelo de energía que equivale a:

$$\mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{K}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{U}(\mathbf{q}) \quad (13)$$

La energía cinética $\mathbf{K}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ incluye el movimiento de traslación y rotación.

$$\mathbf{K}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \sum_1^n \left[\frac{1}{2} m_i \mathbf{v}_i^T \mathbf{v}_i + \frac{1}{2} I_i \dot{q}_i^2 \right] \quad (14)$$

Donde I_i es el momento de inercia de cada eslabon.

La energía potencial $\mathbf{U}(\mathbf{q})$ no tiene una forma específica como en el caso de la energía cinética, depende de la geometría del robot en general:

$$U_i(\mathbf{q}) = \sum_1^n [m_i g l_{ci} h_i(\mathbf{q})] \quad (15)$$

Siendo $\mathbf{h}_i(\mathbf{q})$ una función que indica la altura del eslabón con respecto al origen del sistema de referencia del robot.

Obtener el lagrangiano:

$$\mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{K}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{U}(\mathbf{q}) \quad (16)$$

4. Aplicar las ecuaciones de movimiento de Euler –Lagrange e incluir el modelo de fricción.

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial q_i} + b_i \dot{q}_i + f_{ci} \text{signo}(\dot{q}_i) + f_{ci} [1 - |\text{signo}(\dot{q}_i)|] \quad (17)$$

De esta forma se encuentran los torques o pares aplicados a cada articulación, a continuación se procede a obtener el modelo dinámico.

3.2.1 Modelo dinámico de un dedo.

En esta sección procede a obtener el modelo dinámico de un dedo compuesto por tres eslabones rígidos conectados por articulaciones en cadena cinemática abierta mediante las Ecuaciones de Euler-Lagrange a continuación se hace uso de esta metodología para obtener el modelo dinámico del robot planar de 3gdl.

1.-La cinemática directa de un dedo respecto al centro de masa de cada eslabón está dada como:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{c1}C(q_1) \\ l_{c1}S(q_1) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1C(q_1) + l_{c2}C(q_1 + q_2) \\ l_1S(q_1) + l_{c2}S(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ Y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1C(q_1) + l_{c2}C(q_1 + q_2) + l_{c3}C(q_1 + q_2 + q_3) \\ l_1S(q_1) + l_{c2}S(q_1 + q_2) + l_{c3}S(q_1 + q_2 + q_3) \end{bmatrix} \quad (20)$$

2.-Obteniendo la cinemática diferencial para cada eslabón respecto al centro de masa de cada eslabón y deduciendo la rapidez lineal:

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} l_{c1}C(q_1) \\ l_{c1}S(q_1) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -l_{c1}S(q_1)\dot{q}_1 \\ l_{c1}C(q_1)\dot{q}_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} v_2 &= \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_2 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} l_1C(q_1) + l_{c2}C(q_1 + q_2) \\ l_1S(q_1) + l_{c2}S(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -l_1S(q_1)\dot{q}_1 - l_{c2}S(q_1 + q_2)(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ l_1C(q_1)\dot{q}_1 + l_{c2}C(q_1 + q_2)(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} v_3 &= \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_3 \\ Y_3 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} l_1C(q_1) + l_{c2}C(q_1 + q_2) + l_{c3}C(q_1 + q_2 + q_3) \\ l_1S(q_1) + l_{c2}S(q_1 + q_2) + l_{c3}S(q_1 + q_2 + q_3) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -l_1S(q_1)\dot{q}_1 - l_2S(q_1 + q_2)(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) - l_{c3}S(q_1 + q_2 + q_3)(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3) \\ l_1C(q_1)\dot{q}_1 + l_2C(q_1 + q_2)(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + l_{c3}C(q_1 + q_2 + q_3)(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (23)$$

Obteniendo la respectiva rapidez respecto al centro de masa para cada eslabón como $v_i^T v_i$ se tiene:

$$\begin{aligned} v_1^T v_1 &= l_{c1}^2 S^2(q_1) \dot{q}_1^2 + l_{c1}^2 C^2(q_1) \dot{q}_1^2 = l_{c1}^2 [S^2(q_1) + C^2(q_1)] \dot{q}_1^2 \\ v_1^T v_1 &= l_{c1}^2 \dot{q}_1^2 \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned}
v_2^T v_2 &= l_1^2 S^2(q_1) \dot{q}_1^2 + 2l_1 l_{c2} S(q_1) S(q_1 + q_2) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) + l_{c2}^2 S^2(q_1 + q_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \\
&\quad + l_1 C^2(q_1) \dot{q}_1^2 + 2l_1 l_{c2} C(q_1) C(q_1 + q_2) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) + l_{c2}^2 C^2(q_1 + q_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \\
&= l_1^2 \dot{q}_1^2 + 2l_1 l_{c2} C(q_1 + q_2 - q_1) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) + l_{c2}^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \\
v_2^T v_2 &= l_1^2 \dot{q}_1^2 + 2l_1 l_{c2} C(q_2) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) + l_{c2}^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \tag{25}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v_3^T v_3 &= l_1^2 S^2(q_1) \dot{q}_1^2 + l_2^2 S^2(q_1 + q_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 + l_{c3}^2 S^2(q_1 + q_2 + q_3) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3)^2 \\
&\quad + 2l_1 l_2 S(q_1) S(q_1 + q_2) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) \\
&\quad + 2l_1 l_{c3} S(q_1) S(q_1 + q_2 + q_3) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_1 \dot{q}_3) \\
&\quad + l_2 l_{c3} S(q_1 + q_2) S(q_1 + q_2 + q_3) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_3 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2 \dot{q}_3 + \dot{q}_2^2) \\
&\quad + l_1^2 C^2(q_1) \dot{q}_1^2 + l_2^2 C^2(q_1 + q_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 + l_{c3}^2 C^2(q_1 + q_2 + q_3) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3)^2 \\
&\quad + 2l_1 l_2 C(q_1) C(q_1 + q_2) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) \\
&\quad + 2l_1 l_{c3} C(q_1) C(q_1 + q_2 + q_3) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_1 \dot{q}_3) \\
&\quad + l_2 l_{c3} C(q_1 + q_2) C(q_1 + q_2 + q_3) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_3 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2 \dot{q}_3 + \dot{q}_2^2) \\
v_3^T v_3 &= l_1^2 \dot{q}_1^2 + l_2^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 + l_{c3}^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3)^2 + 2l_1 l_2 C(q_2) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) \\
&\quad + 2l_1 l_{c3} C(q_2 + q_3) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_1 \dot{q}_3) \\
&\quad + l_2 l_{c3} C(q_3) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_3 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2 \dot{q}_3 + \dot{q}_2^2) \tag{26}
\end{aligned}$$

Donde se usaron las identidades trigonométricas:

$$\begin{aligned}
S^2(x) + C^2(x) &= 1 \\
C(x - y) &= C(x)C(y) + S(x)S(y)
\end{aligned}$$

3.- Se obtiene el modelo de energía:

$$H(q, \dot{q}) = k(q, \dot{q}) + U(q) \tag{27}$$

La energía cinética $K(q, \dot{q})$ incluye el movimiento de traslación y rotación.

$$K(q, \dot{q}) = \sum_1^n \left[\frac{1}{2} m_i v_i^T v_i + \frac{1}{2} I_i \dot{q}_i^2 \right] \tag{28}$$

Para el eslabón proximal se tiene:

$$K_1(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} m_1 [l_{c1}^2 \dot{q}_1^2] + \frac{1}{2} I_1 \dot{q}_1^2 = \frac{1}{2} [m_1 l_{c1}^2 + I_1] \dot{q}_1^2 \tag{29}$$

Y la energía potencial del eslabón proximal es:

$$U_1(q, \dot{q}) = m_1 g l_{c1} S q_1 \tag{30}$$

Para el eslabón medial se tiene:

$$\begin{aligned}
K_2(q, \dot{q}) &= \frac{1}{2} m_2 [l_1^2 \dot{q}_1^2 + 2l_1 l_{c2} C(q_2) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) + l_{c2}^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2] + \frac{1}{2} I_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \\
&= \frac{1}{2} m_2 l_1^2 \dot{q}_1^2 + m_2 l_1 l_{c2} C(q_2) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) + \frac{1}{2} m_2 l_{c2}^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 + \frac{1}{2} I_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \\
&= \frac{1}{2} m_2 l_1^2 \dot{q}_1^2 + m_2 l_1 l_{c2} C(q_2) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) + \frac{1}{2} (m_2 l_{c2}^2 + I_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2
\end{aligned} \tag{31}$$

Y la energía potencial del eslabón medial es:

$$U_2(q, \dot{q}) = m_2 g l_1 S q_1 + m_2 g l_{c2} S(q_1 + q_2) \tag{32}$$

Para el eslabón distal se tiene:

$$\begin{aligned}
K_3(q, \dot{q}) &= \frac{1}{2} m_3 [l_1^2 \dot{q}_1^2 + l_2^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 + l_{c3}^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3)^2 + 2l_1 l_2 C(q_2) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) \\
&\quad + 2l_1 l_{c3} C(q_2 + q_3) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_1 \dot{q}_3) \\
&\quad + l_2 l_{c3} C(q_3) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_3 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2 \dot{q}_3 + \dot{q}_2^2)] + \frac{1}{2} I_3 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3)^2 \\
&= \frac{1}{2} m_3 l_1^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_3 l_2^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 + \frac{1}{2} m_3 l_{c3}^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3)^2 + m_3 l_1 l_2 C(q_2) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) \\
&\quad + m_3 l_1 l_{c3} C(q_2 + q_3) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_1 \dot{q}_3) \\
&\quad + \frac{1}{2} m_3 l_2 l_{c3} C(q_3) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_3 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2 \dot{q}_3 + \dot{q}_2^2) + \frac{1}{2} I_3 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3)^2
\end{aligned} \tag{33}$$

Y la energía potencial de eslabón distal es:

$$U_3(q, \dot{q}) = m_3 g l_1 S q_1 + m_3 g l_2 S(q_1 + q_2) + m_3 g l_{c3} S(q_1 + q_2 + q_3) K(q, \dot{q}) \tag{34}$$

El Lagrangiano es:

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}(q, \dot{q}) &= \frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1^2 \dot{q}_1^2 + m_2 l_1 l_{c2} C(q_2) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) \\
&\quad + \frac{1}{2} (m_2 l_{c2}^2 + I_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \\
&\quad + \frac{1}{2} m_3 l_1^2 \dot{q}_1^2 \\
&\quad + \frac{1}{2} m_3 l_2^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 + \frac{1}{2} m_3 l_{c3}^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3)^2 + m_3 l_1 l_2 C(q_2) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) \\
&\quad + m_3 l_1 l_{c3} C(q_2 + q_3) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_1 \dot{q}_3) \\
&\quad + \frac{1}{2} m_3 l_2 l_{c3} C(q_3) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_3 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2 \dot{q}_3 + \dot{q}_2^2) + \frac{1}{2} I_3 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3)^2 \\
&\quad - m_1 g l_{c1} S q_1 - m_2 g l_1 S q_1 - m_2 g l_{c2} S(q_1 + q_2) - m_3 g l_1 S q_1 \\
&\quad - m_3 g l_2 S(q_1 + q_2) - m_3 g l_{c3} S(q_1 + q_2 + q_3)
\end{aligned} \tag{35}$$

4.-Aplicando las ecuaciones de Euler Lagrange.

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial q_i} + b_i \dot{q}_i + f_{ci} \text{signo}(\dot{q}_i) + f_{ci} [1 - |\text{signo}(\dot{q}_i)|] \tag{36}$$

Se obtienen las siguientes ecuaciones para los torques.

$$\begin{aligned}
\tau_1 = & m_1 l_{c1}^2 \ddot{q}_1 + m_2 \left(l_1^2 \ddot{q}_1 + l_{c2}(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) + l_1 l_{c2} \left(C(q_2)(2\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) - S(q_2)(2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) \right) \right) \\
& + m_3 \left(l_1 l_2 \left(C(q_2)(2\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \right. \right. \\
& \left. \left. - S(q_2)(2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) \right) + l_2 l_{c3} \left(C(q_3)(2\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3) \right. \right. \\
& \left. \left. - S(q_3)(2\dot{q}_1\dot{q}_3 + 2\dot{q}_2\dot{q}_3 + \dot{q}_3^2) \right) + l_1 l_{c3} \left(C(q_2 + q_3)(2\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3) \right. \right. \\
& \left. \left. - S(q_2 + q_3)(2(\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_1\dot{q}_3 + \dot{q}_2\dot{q}_3) + \dot{q}_2^2 + \dot{q}_3^2) \right) + l_1^2 \ddot{q}_1 + l_2^2(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \right. \\
& \left. + l_{c3}^2(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3) \right) + I_1 \ddot{q}_1 + I_2(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) + I_3(2\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3) \\
& - m_1 g l_{c1} S(q_1) - m_2 g (l_1 S(q_1) + l_{c2} S(q_1 + q_2)) \\
& - m_3 g (l_1 S(q_1) + l_2 S(q_1 + q_2) + l_{c3} S(q_1 + q_2 + q_3))
\end{aligned} \tag{37}$$

$$\begin{aligned}
\tau_2 = & m_2 l_{c2}^2 (\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) + m_2 l_1 l_{c2} (C(q_2)\ddot{q}_1 + S(q_2)\dot{q}_1^2) + m_3 l_1 l_2 (C(q_2)\ddot{q}_1 + S(q_2)\dot{q}_1^2) \\
& + m_3 (l_1 l_{c3} (C(q_2 + q_3)\ddot{q}_1 + S(q_2 + q_3)\dot{q}_1^2) \\
& + l_2 l_{c3} (2C(q_2)(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3) - 2S(q_3)(\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_1\dot{q}_3)) + l_2^2(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \\
& + l_{c3}^2(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3)) + I_2(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) + I_3(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3) - m_2 g l_{c1} S(q_1 + q_2) \\
& - m_3 g (l_2 S(q_1 + q_2) + l_3 S(q_1 + q_2 + q_3))
\end{aligned} \tag{38}$$

$$\begin{aligned}
\tau_3 = & m_3 (l_{c3}^2(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3)) + l_1 l_{c3} (C(q_2 + q_3)\ddot{q}_1 + S(q_2 + q_3)\dot{q}_1^2) \\
& + l_2 l_{c3} (C(q_3)(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) + S(q_3)(\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2)) + I_3(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{q}_3) \\
& - m_3 g l_{c3} S(q_1 + q_2 + q_3)
\end{aligned} \tag{39}$$

3.3 Conclusiones.

Mediante esta metodología se pueden obtener los torques correspondientes para las tres uniones interfalángicas de un dedo de la mano, es de notarse que como la mano constituyen 5 dedos la dinámica para los dedos restantes es la misma pero se deben sustituir los valores de cada eslabón, en el apéndice B se encuentra el código realizado en Matlab que corrobora la obtención tanto de la cinemática como la dinámica desarrolladas.

Capítulo IV: Hardware.

En este capítulo se describen las partes que conforman la implementación electrónica para el control de la mano como son la etapa de protección, la etapa de aislamiento, la etapa de potencia y la etapa de acondicionamiento de señales, de la misma forma se presentan los diagramas de conexión, la descripción de los motorreductores y la caracterización para que estos trabajen en su zona lineal ya que de ello depende que el torque aplicado sea proporcional a las señales de control mediante modulación de ancho de pulso que son las salidas del FPGA hacia los drivers.

4.1 Diagrama general del sistema de hardware.

La comunicación y adquisición de datos de la mano de cinco grados de libertad se realiza mediante una interfaz gráfica en LabView por medio de wifi hacia un módulo Wifly rn-xv y una tarjeta FPGA la cual tiene implementado un microprocesador [1] que ejecuta su propio conjunto de instrucciones desde la ROM con su previa compilación y grabado, se procesa el algoritmo de control, una vez realizado el control se envían las señales correspondientes a las etapas de potencia que realizan el movimiento de los actuadores.

Los actuadores tienen un encoder que sirven de retroalimentación mediante una etapa de acondicionamiento hacia los decodificadores de posición donde se obtiene la posición actual y el resultado entra en los puertos de entrada recalculando el algoritmo de control proporcional en el cual se obtiene el error de posición y se manda hacia los puertos de salida donde entran a una etapa de PWM y salen las señales hacia las etapas de potencia para cerrar los cinco lazos de control para el control de la mano (ver Fig. 36).

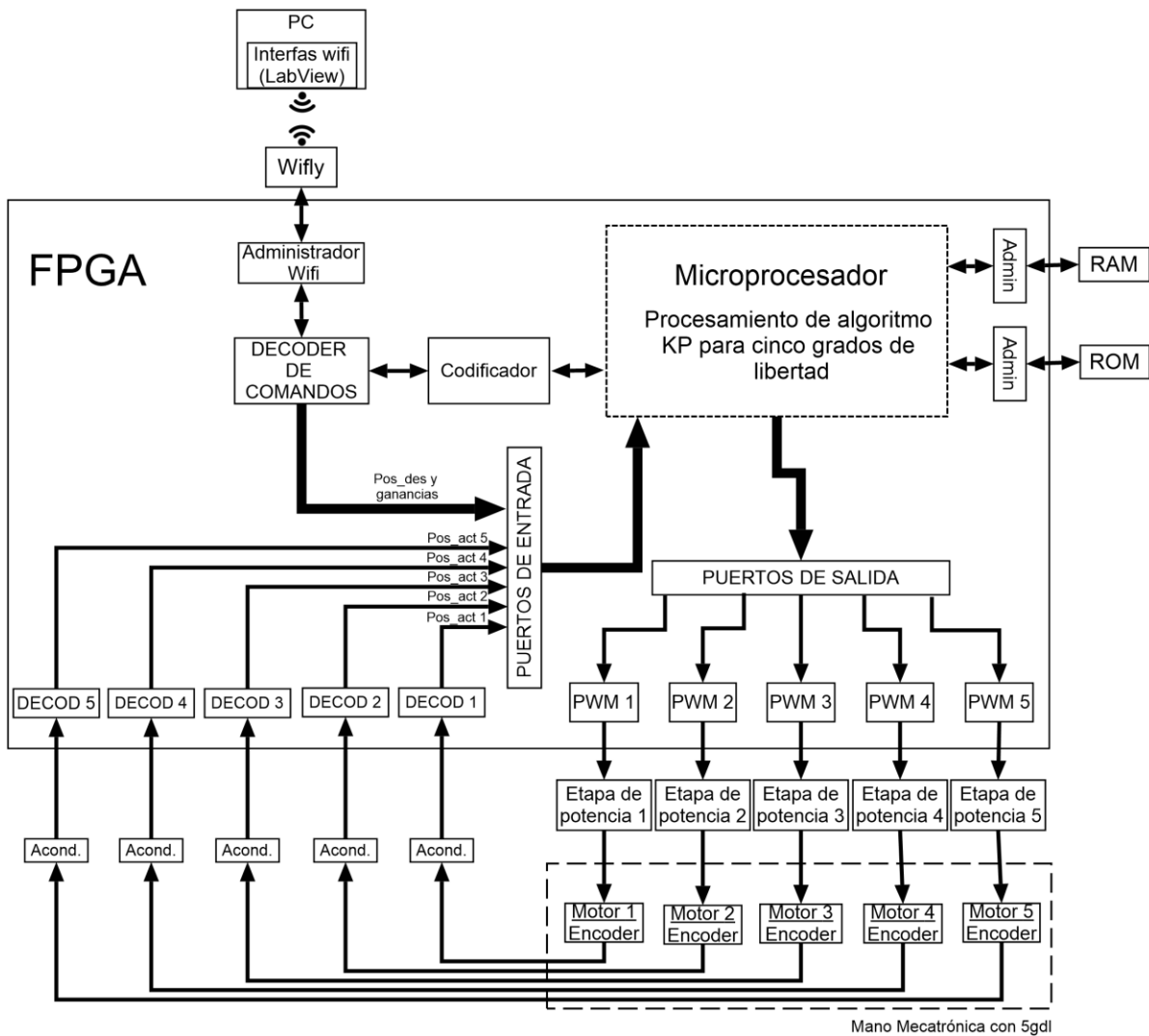


Figura 36: Diagrama a bloques del sistema.

El diagrama electrónico de conexión consta de un módulo wifi (Wifly), una tarjeta de desarrollo comercial DE0-nano con un FPGA Cyclone IV EP4CE22F17C6 de la compañía ALTERA, en el cual se le carga el firmware de un microprocesador con memoria ROM donde se ejecuta el conjunto de instrucciones compiladas y RAM donde se guardan datos procesados también consta de un conjunto de 5 drivers los cuales se componen de la etapa de protección, aislamiento, etapa de potencia y acondicionamiento de señales (ver Fig. 37).

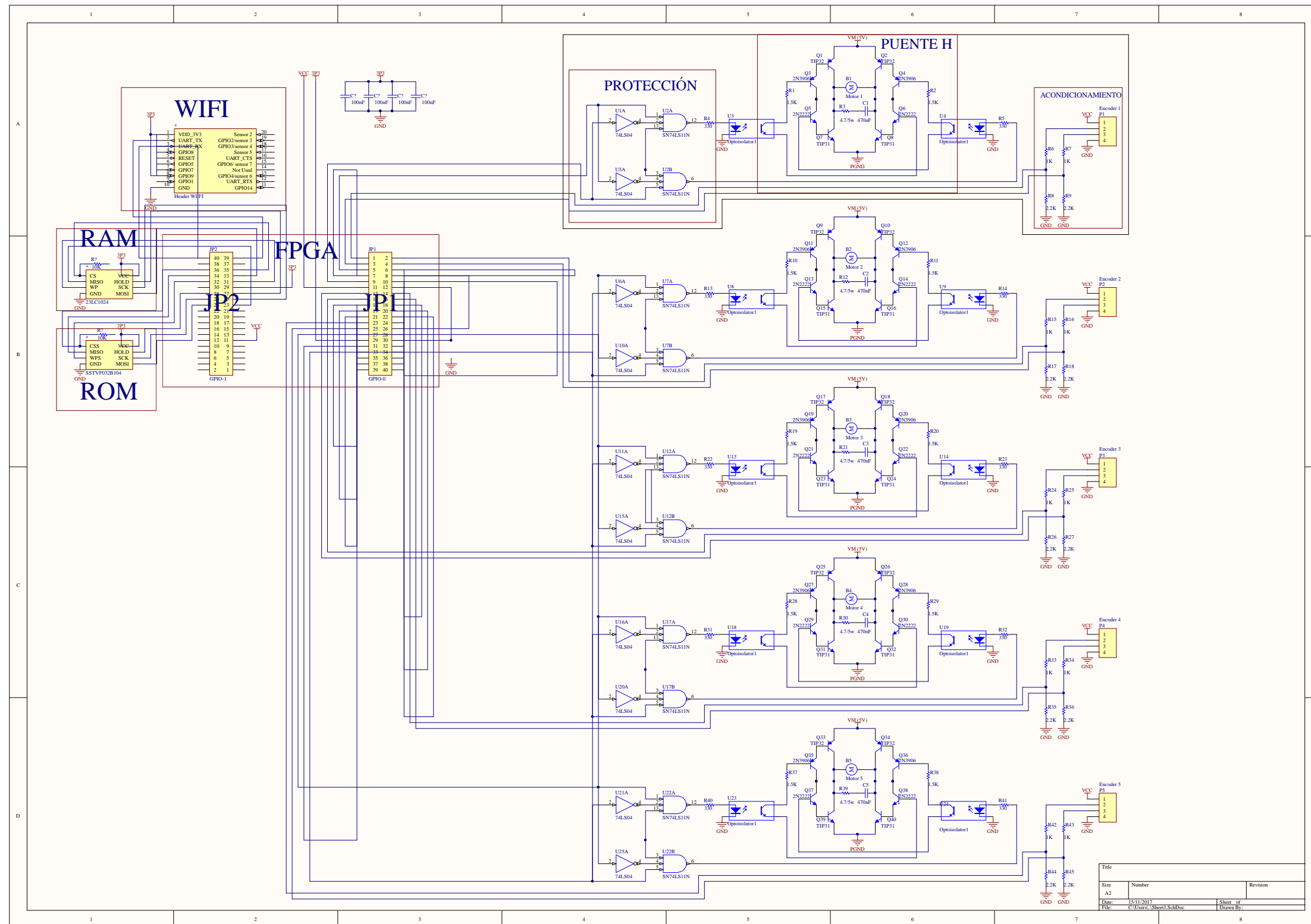
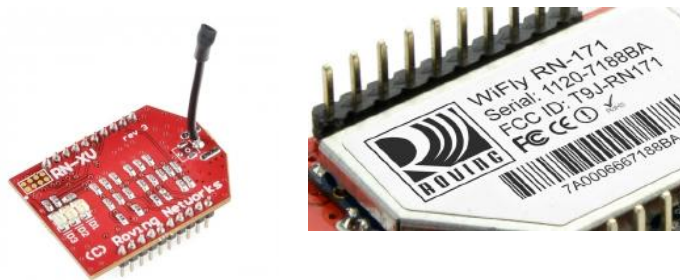


Figura 37: Diagrama de conexión del sistema electrónico.

4.2 Tarjeta de comunicación wifi (RN-XV).

Es una tarjeta que tiene un módulo RN-171 (ver Fig 38 b) para ser compatible en sus pines con el módulo X-Bee y se encarga de la comunicación entre la interfaz de LabView y el sistema electrónico por medio del protocolo TCP/IP de forma inalámbrica a su vez esta tarjeta cuenta con un firmware que permite cambiar su configuración (ver Apéndice C). La comunicación hacia el FPGA se realiza cuando se envían los datos en formato hexadecimal desde la interfaz gráfica en LabView el módulo recibe los datos y los convierte a comunicación serial en sus pines UART-RX UART-TX, el FPGA mediante un administrador de wifi que tiene implementado dentro del firmware logra la transferencia de los datos y los envía a una etapa de decodificación.



a) vista superior b) Vista posterior

Figura 38: Módulo wifi rn-xv.

El diagrama de los pines de conexión del módulo se muestra en la figura 39.

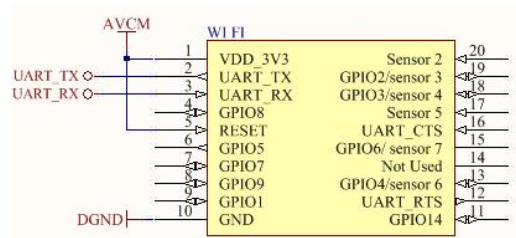


Figura 39: Pines de comunicación módulo wifi RN-XV.

Debido a que la comunicación de los pines de salida es una de tipo serial el pin TX del módulo se conecta al RX de la tarjeta DE0-nano y el RX al TX de la tarjeta DE0-nano.

4.3 FPGA DE0-nano

La tarjeta para el control es una de0-nano (ver Fig. 40) la cual tiene un FPGA Cyclone IV con matrícula EP4CE22F17E6 de la compañía de ALTERA al que se le cargo el firmware del microprocesador [1] mediante la interfaz de programación Quartus II versión 13.

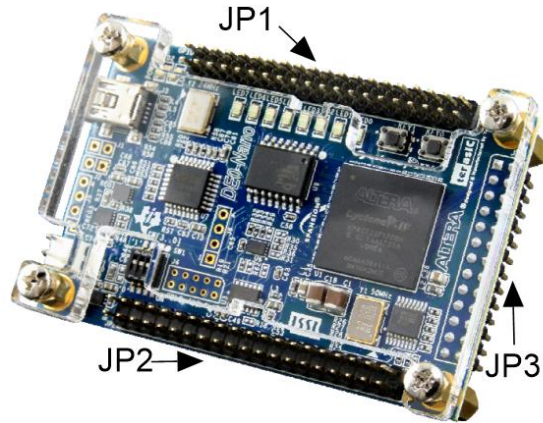


Figura 40: FPGA EP4CE22F17E6 DE0_Nano.

La tarjeta FPGA cuenta principalmente con tres puertos de entrada y salida JP1 (GPIO-0), JP2 (GPIO-1), JP3 (GPIO-2), al igual cuenta con leds indicadores e interruptores, de los cuales se usaron los pines correspondientes al conector JP1 y JP2 respectivamente en la figura 41 se muestra la configuración de sus pines.

GPIO-1			JP2			GPIO-0			JP1		
40	J14	IO	IO	J13	39	1	A8	IN	IO	D3	2
38	K15	IO	IO	J16	37	3	B8	IN	IO	C3	4
36	L13	IO	IO	M10	35	5	A2	IO	IO	A3	6
34	N14	IO	IO	L14	33	7	B3	IO	IO	B4	8
32	P14	IO	IO	N15	31	9	A4	IO	IO	B5	10
30	GND		VCC3P3	29	11	VCC_SYS		GND	12		
28	N16	IO	IO	R14	27	13	A5	IO	IO	D5	14
26	P16	IO	IO	P15	25	15	B6	IO	IO	A6	16
24	L15	IO	IO	R16	23	17	B7	IO	IO	D6	18
22	K16	IO	IO	L16	21	19	A7	IO	IO	C6	20
20	N11	IO	IO	N9	19	21	C8	IO	IO	E6	22
18	P9	IO	IO	N12	17	23	E7	IO	IO	D8	24
16	R10	IO	IO	P11	15	25	E8	IO	IO	F8	26
14	R11	IO	IO	T10	13	27	F9	IO	IO	E9	28
12	GND		VCC_SYS	11	29	VCC3P3		GND	30		
10	T11	IO	IO	R12	9	31	C9	IO	IO	D9	32
8	T12	IO	IO	R13	7	33	E11	IO	IO	E10	34
6	T13	IO	IO	T14	5	35	C11	IO	IO	B11	36
4	T15	IO	IN	R9	3	37	A12	IO	IO	D11	38
2	F13	IO	IN	T9	1	39	D12	IO	IO	B12	40

GPIO-2			JP3		
25	AN_1		IO	G15	17
23	AN_4		IO	F14	15
21	AN_3		IO	F15	13
19	AN_6		IO	D15	11
17	AN_5		IO	C15	9
15	AN_7		IO	C14	7
13	G15	IO	IO	A14	5
11	F14	IO	IN	E16	3
9	F15	IO	VCC3P3	1	
7	D15	IO			
5	C15	IO			
3	C14	IO			
1	A14	IO			

26	GND	
24	AN_0	
22	ANL_2	
20	ANL_7	
18	ANL_5	
16	G16	IO
14	F16	IO
12	D14	IO
10	D16	IO
8	C16	IO
6	B16	IO
4	M16	IN
2	E15	IN

Figura 41: Pines de Configuración de FPGA.

En nuestro caso se usó el puerto GPIO-0 (JP1) para la adquisición y envío de señales de control y para la comunicación del módulo wifly se conectaron a los pines J_13 y J_14 del puerto GPIO-1 (JP2). Así como también se hicieron las respectivas conexiones con las memorias ROM y RAM como se muestra en el diagrama de conexión de la figura 42.

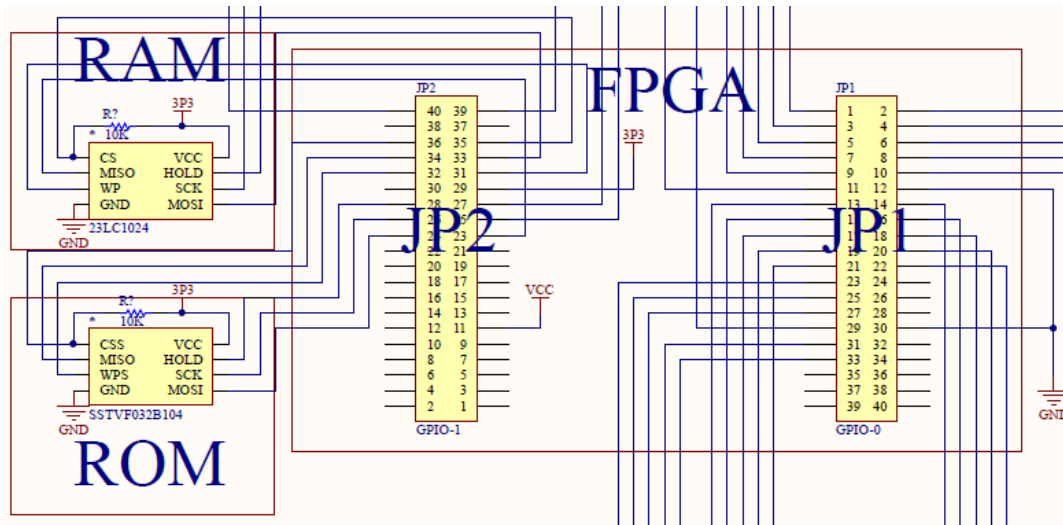


Figura 42: Diagrama de conexión FPGA, RAM y ROM

4.4 Motorreductor CGM12-N20VA-08200E.

Los motores que se utilizan en el movimiento de los dedos (índice, medio, anular, meñique y pulgar) son el motorreductor CGM12-N20VA-08200E, el cual es un motor CD de 6v tiene una caja reductora 100:1 y un encoder incremental de cuadratura acoplado al eje del motor con una resolución de 28 pulsos por revolución que corresponde aproximadamente a 2800 pulsos por revolución en el eje de salida de la caja reductora (ver Fig 43).

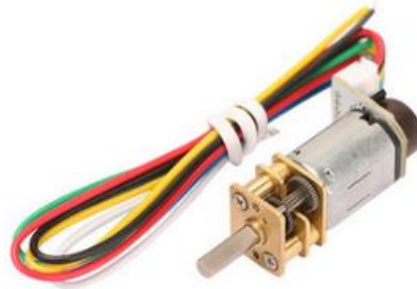


Figura 43: Motorreductor CGM12-N20VA.

En la tabla 9 se muestran las características del motorreductor.

Especificaciones del motor	
Voltaje nominal	6 V
Revoluciones	90 RPM
Corriente(sin carga)	<60 mA
Torque del motor	0,7 kg-cm
Corriente máxima	0,6 A.

Tabla 9: Especificaciones de motor CGM12-N20VA.

El cableado se muestra en la tabla 10.

Color	Función
Rojo	Terminal positiva de motor VDD
Negro	Terminal negativa de motor GND
Verde	Terminal encoder GND
Azul	Alimentación encoder Vcc (3.5 – 20 V)
Amarillo	Salida encoder A
Blanco	Salida encoder B

Tabla 10: Colores de cables de los motores

La caracterización de un motor es base para poder emular el comportamiento de un motor de transmisión directa el cual tiene la particularidad de que la energía aplicada es directamente proporcional al par aplicado en el eje.

4.5 Torque.

Torque o el par es el momento de fuerza que ejerce un motor sobre el eje de transmisión de potencia. Si un cuerpo es capaz de rotar sobre un eje, el resultado de la fuerza es una combinación de la fuerza aplicada y la distancia al eje rotacional, (ver Fig 44). A este resultado se le conoce como par o torque y es el producto vectorial de multiplicar la distancia por la fuerza (F) perpendicular al eje de rotación (r), donde F y r son vectores.

El torque es una magnitud vectorial, si α es el ángulo entre r y F, el valor numérico por definición del producto vectorial, es:

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times (\vec{F} \text{sen } \alpha) \quad (40)$$

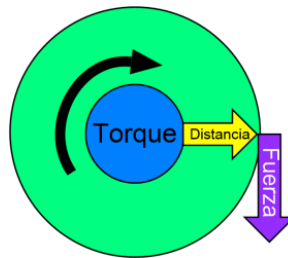


Figura 44: Torque.

Si se aplica una fuerza a 90° entonces la ecuación del torque es la siguiente:

$$\tau = r * F \quad (41)$$

Dónde:

- F es la fuerza en kg.
- r es el radio de motor.
- τ es el par del motor.

4.6 Eficiencia.

La eficiencia es la relación que hay entre el torque sobre la potencia del motor y la ecuación es la siguiente:

$$\eta = \frac{\tau}{P} = \frac{\tau}{VI} \quad (42)$$

Dónde:

τ es el torque o par del motor,

P es la potencia del motor que es igual a $V \cdot I$.

η es la eficiencia del motor.

4.7 Metodología de la caracterización de Motor de CD.

La metodología para caracterizar los motores de CD y garantizar que trabajen en su zona lineal, [15] es la siguiente:

1. Obtener el voltaje nominal mediante un barrido de voltaje sin exceder el voltaje máximo del fabricante, se mide la corriente con un multímetro y los kilogramos mediante un dinamómetro el cual debe estar a 90° del eje del reductor por medio de una polea.
2. Calcular la potencia, torque y eficiencia con las ecuaciones (41) y (42).
3. En la gráfica eficiencia/voltaje se elige el voltaje nominal donde la eficiencia no varía drásticamente y el torque es mayor.
4. Se realiza un barrido de frecuencia sometiendo al motor con una señal cuadrada al 50% desde los 20Hz hasta los 20Khz mediante un transistor en configuración Darlington tratando de encontrar una frecuencia que proporcione la mitad del torque elegido o la mitad de la fuerza correspondiente en kg.
5. Una vez elegida la frecuencia se varia el ancho de pulso de la señal desde el 10% hasta el 90% y se realiza la gráfica torque/ciclo de trabajo para que muestre una respuesta lineal es así como se garantiza que el motor trabaja en su zona lineal y se convierte en un motor de transmisión directa, de no ser así se repite el paso 4 y 5 correspondientes.

4.8 Caracterización de motorreductores.

Para realizar la caracterización de los motores se diseñó una base la cual fija el motor, al igual que una polea y se imprimieron, se acopló el dinamómetro con el eje de la caja reductora mediante la polea de 2cm de diámetro y un hilo a 90° (ver Fig. 45).

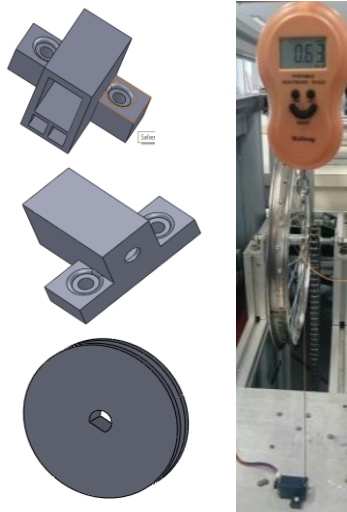


Figura 45: Base y polea para caracterizar el motor

El arreglo Darlington que se implementó en el barrido por frecuencia se muestra en la figura 46.

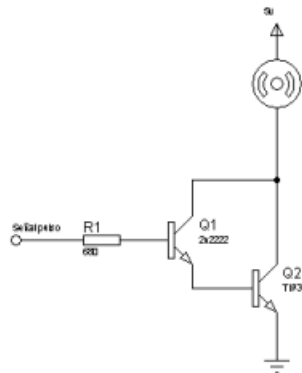


Figura 46: Transistor Darlington para caracterización por frecuencia.

Donde las betas individuales fueron:

Transistor	2n2222	Tip31
β	289	36

El cual tiene una Beta el transistor Darlington de:

$$\beta_d = 289 * 36 = 10404$$

La beta forzada propuesta para garantizar la saturación del transistor es:

$$\beta_f = 160$$

Como se cumple que $\beta_f \ll \beta_d$ implica que el transistor se encuentra en saturación, para la caracterización se requiere que haga circular una corriente máxima de 1.2 A por lo cual se tiene:

$$I_b = \frac{I_{c_{sat}}}{\beta_f} = \frac{1.2A}{160} = 7.5mA \quad (43)$$

La corriente requerida no dañaría al generador de funciones ya que tiene una máxima corriente de 10mA y el cálculo de la resistencia del circuito es:

$$R_b = \frac{5v - (2) * (0.7v)}{I_b} = \frac{3.6}{7.5mA} = 480 \text{ ohms} \quad (44)$$

Realizando el procedimiento de barrido de voltaje para los motores se encontró que el voltaje nominal fue de 5V.

En el barrido por frecuencia se usó el circuito de control con el transistor Darlington (ver Fig 46) conectando la resistencia de la base del transistor al generador de frecuencia el cual fue configurado con una señal pulso al 50% con un voltaje de 2.25v y 1.25 volts de offset, para generar una onda cuadrada de 5v positiva al 50% y a la fuente se le sumo el voltaje de pérdida entre colector y emisor del tip31c en saturación que fue medido de 0.9v por lo cual la fuente fue configurada a 5.9v para que el motor recibiera los 5v de la caracterización de voltaje como se muestra en la figura 47.

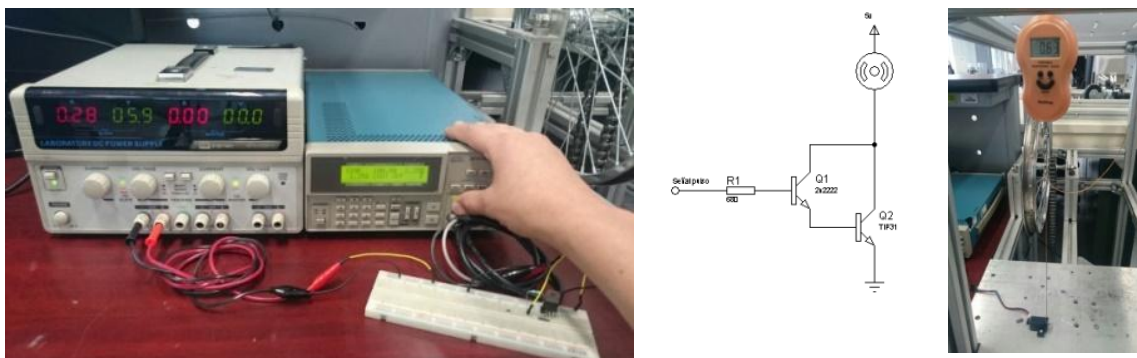


Figura 47: Implementación de caracterización por frecuencia.

Mediante la metodología de caracterización de los motores se encontró que el voltaje nominal fue de 5v así como también sus frecuencias respectivas: motor 1 (220Hz), motor 2

(200Hz), motor 3 (200Hz), motor 4 (210Hz), y motor 5 (100Hz) el resultado de los datos de torque respecto al ciclo de trabajo se muestran en la tabla 11.

Ciclo trabajo	motor 1 (220 Hz)	motor2 (210 Hz)	motor 3 (200 Hz)	motor 4(200 Hz)	motor 5 (100 Hz)
	Torque (Nm)	Torque (Nm)	Torque (Nm)	Torque (Nm)	Torque (Nm)
10%	0.004905	0.004905	0.005886	0.005886	0.005886
20%	0.01987114	0.01987114	0.01987114	0.01987114	0.02235503
30%	0.03477449	0.03601643	0.03601643	0.03477449	0.03850033
40%	0.04967784	0.05340368	0.05340368	0.04967784	0.05837146
50%	0.06954898	0.07203287	0.06830703	0.07079092	0.07079092
60%	0.08196844	0.08445233	0.08569427	0.08196844	0.08817817
70%	0.09066206	0.09687179	0.09811373	0.09935568	0.10680736
80%	0.10680736	0.11425903	0.11301709	0.10680736	0.11798487
90%	0.12295265	0.12916238	0.13164628	0.12295265	0.13288822
99%	0.14779157	0.1403399	0.1403399	0.1403399	0.1403399

Tabla 11: Datos obtenidos de los torques contra ciclo de trabajo para cada motor.

Y Las gráficas de Torque vs Ciclo de Trabajo de todos los motores se muestra en la figura 48 donde se observa la respuesta lineal respecto a la frecuencia encontrada.

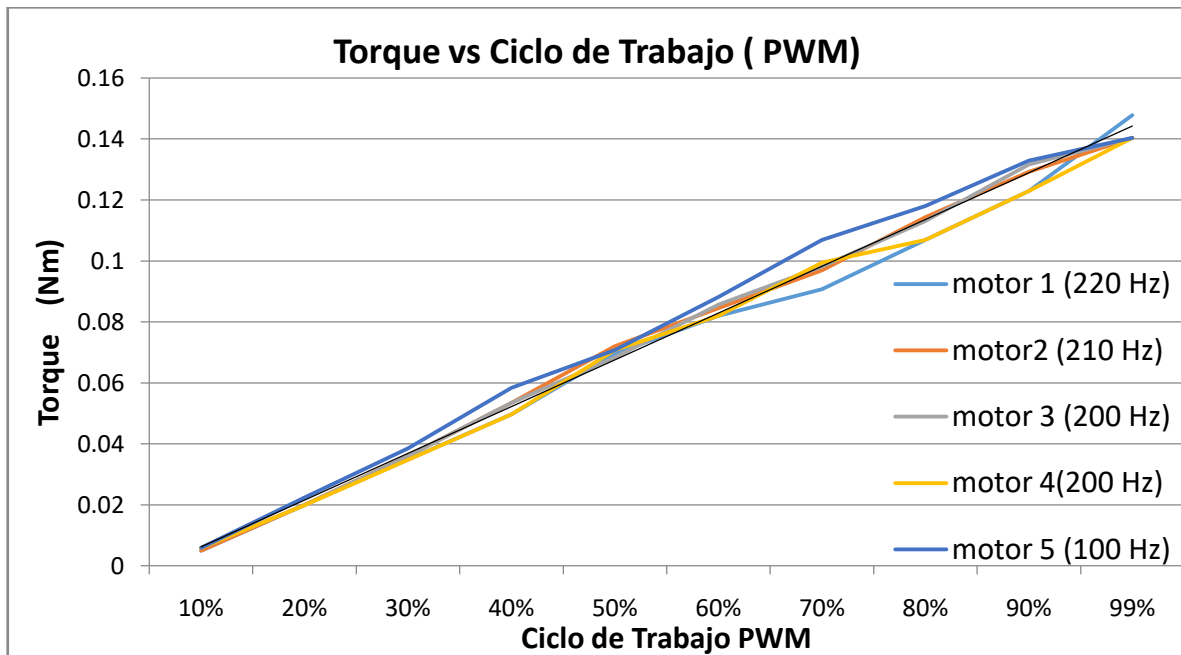


Figura 48: Grafica de linealidad torque vs Ciclo de Trabajo de 5 motores.

4.9 Encoders

Los encoders son sensores que generan señales digitales en respuesta al movimiento del motor y está basado en sensores Hall. El sensor Hall requiere un voltaje (Vcc) entre 3.5V y 6V y una corriente máxima de 10mA. Las salidas A y B son ondas cuadradas desde 0V hasta Vcc con un desfase de 90°.

Las señales del encoder del motor con un voltaje nominal de 5v se muestran en la figura 50 donde se nota que la frecuencia máxima es aproximadamente 1.57 KHz. Al contar los flancos (de bajada y subida) de ambas salidas se puede obtener 28 conteos por cada revolución del rotor del motor o en la salida de la caja reductora 2800 conteos.

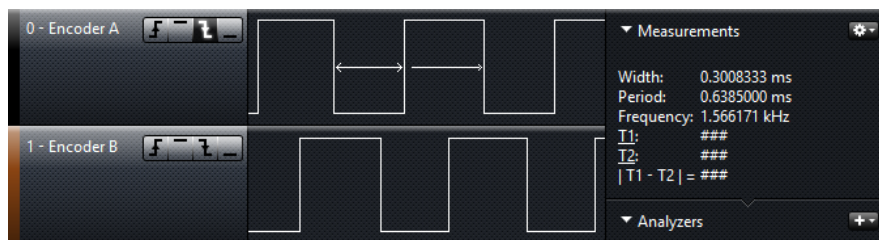


Figura 49: Señales en cuadratura de encoder.

La forma de obtener la posición de un encoder incremental de cuadratura consiste en detectar los cambios lógicos entre las señales A y B, en la figura 50 se muestra el sentido proporcionado respecto al cambio en las señales, por ejemplo si el encoder tiene una posición inicial de las señales A y B en uno respectivamente y se detecta un cambio en la señal digital A a cero entonces el sentido de giro del motor es positivo (antihorario) y se suma una unidad al contador de posición pero en el caso en que las señales A y B están en uno y la señal B cambia a 0 se detecta un sentido de giro negativo y al contador de posición se le debe restar una unidad.

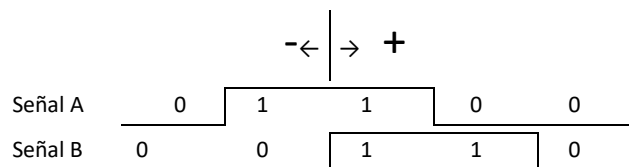


Figura 50: Combinaciones lógicas de señales A y B de encoder.

De esta forma se realiza la máquina de estados (ver Fig. 51) que contare los pulsos y detectara el sentido de giro del encoder.

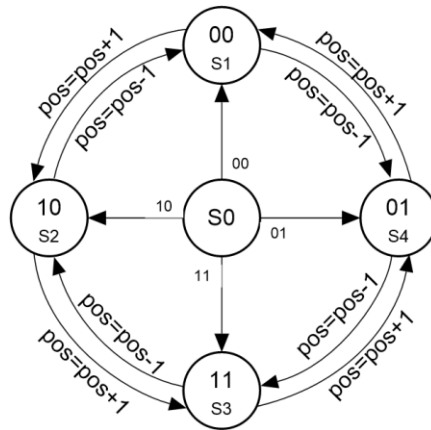


Figura 51: Diagrama de máquina de estados para detección de encoder

4.10 Etapa de potencia y aislamiento (Puente H).

En la construcción de la etapa de potencia (puente h ver Fig. 52) se hicieron las siguientes consideraciones, el fabricante especifica que la corriente mínima de funcionamiento sin carga es de 60mA y a su vez con carga es aproximadamente 600mA por lo cual se toma como parámetro esencial, para el cálculo se construirá un puente h de 1.2 A el cual proporcionara el doble de corriente máxima del motor, esto es porque se presenta un sobre impulso de corriente al trabajar el motor con carga.

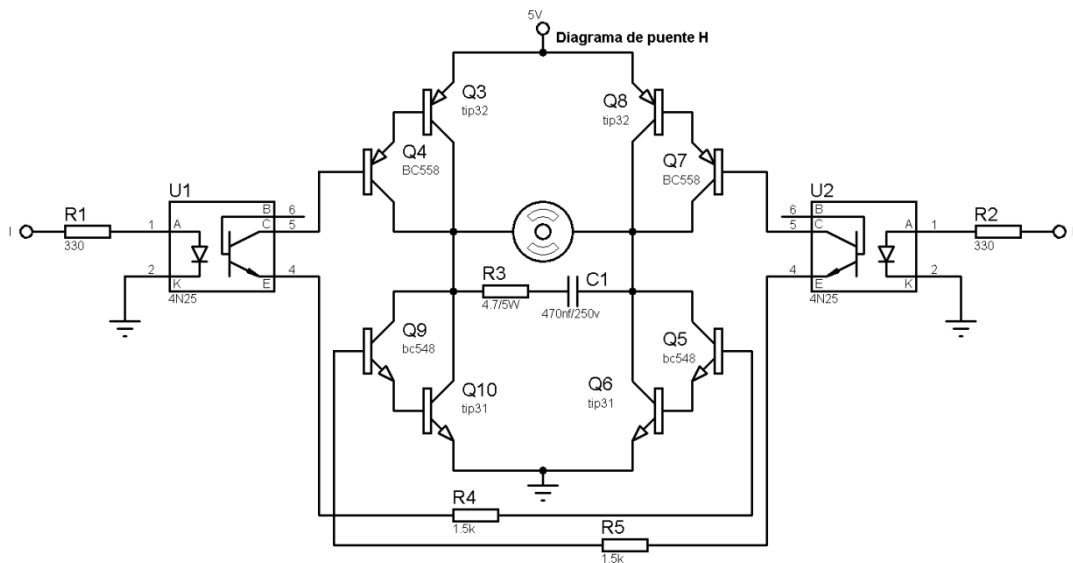


Figura 52: Diseño de Puente-H

Los cálculos del puente h fueron los siguientes:

Las betas individuales son:

Transistor	Bc548	Tip31
β	289	36

El cual tiene una Beta el transistor Darlington de:

$$\beta_d = 10404$$

La beta forzada que se propone para garantizar la saturación del transistor es de:

$$\beta_f = \frac{\beta_d}{10} = \frac{10404}{10} = 1040 \quad (45)$$

Se requiere que haga circular una corriente de 1.2A por lo cual se tiene:

$$I_b = \frac{I_{c_{sat}}}{\beta_f} = \frac{1.2A}{1040} = 1.15mA \quad (46)$$

Por lo tanto la I_c para el optoacoplador de conmutación U1 es de 1.15mA y para calcular la resistencia de colector se tiene:

$$R_c = \frac{5v - (4) * (0.7v) - 0.2v}{I_c} = \frac{2v}{1.15mA} = 1.7K\Omega \quad (47)$$

Se eligió la resistencia comercial de 1.5k Ω (ver Fig. 52).

El optoacoplador 4n25 permite usar el transistor de su salida en saturación cuando el led emisor se encuentra polarizado y en el datasheet muestra que el voltaje de polarización máximo v_f es 1.5v por lo tanto el cálculo para la resistencia del led se calcula como:

$$R_{led} = \frac{5v - v_f}{I_{led}} = \frac{5v - 1.5}{10mA} = \frac{3.5v}{10mA} = 350\Omega \quad (48)$$

Se eligió la resistencia comercial de 330 Ω (ver Fig. 52).

4.11 Circuito de protección para el FPGA y potencia.

Para proteger la etapa de control ya sea un microcontrolador un FPGA u otro, es recomendable realizar etapas protección, es así como se implementa el circuito de la figura 53.

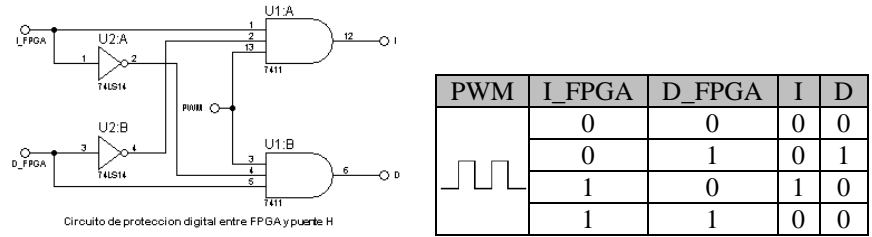


Figura 53: Circuito de protección y señales de lógica.

Cuando ambas señales de entrada (I_FPGA e D_FPGA) son activadas la salida resultante del circuito de protección hacia el puente h son desactivada por lo tanto se evita que el puente h produzca un corto y evita que se dañe tanto la etapa digital como la de potencia.

4.12 Acondicionamiento de señales de encoders.

Para acondicionar las señales del encoder de tipo hall hacia la etapa de control mediante un FPGA se tiene que reducir el voltaje de 5v a 3.3v y se realiza con un divisor de voltaje.

$$V_{sal} = \frac{V_{ent} * R2}{R1 + R2} = \frac{5v * 2.2k}{1k + 2.2k} = 3.3v \quad (49)$$

Por lo tanto el circuito final para hacer los módulos drivers que consisten en puente h circuito de protección y acondicionamiento se muestra en la figura 54.

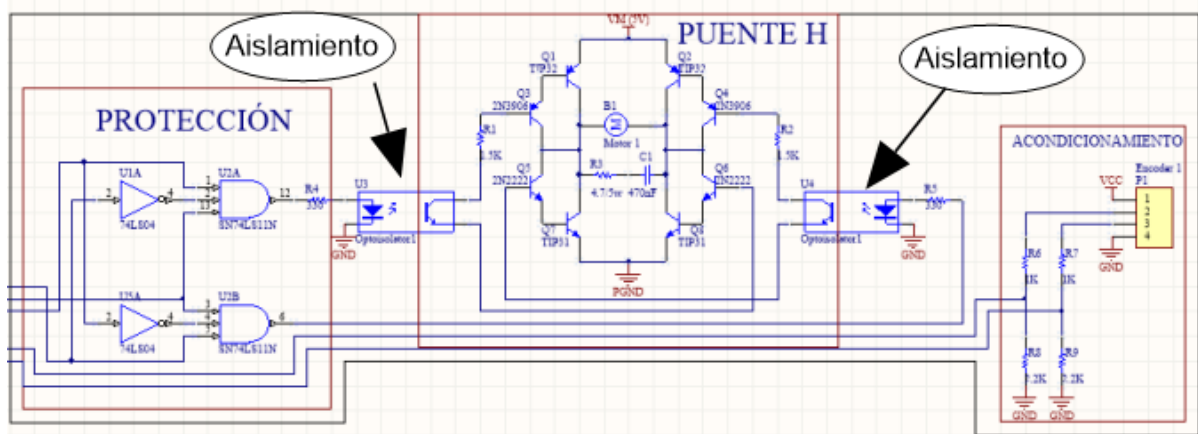


Figura 54: Diagrama eléctrico de protección acondicionamiento y potencia de cada motor.

Es así como se realizan 5 placas o módulos de circuito impreso para cada motorreductor (ver Fig. 55).

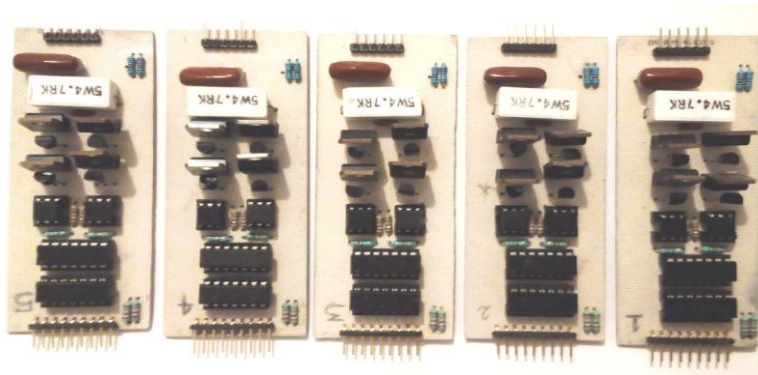


Figura 55: Placas realizadas para cada actuador.

El sistema completo se muestra en la Figura 56.

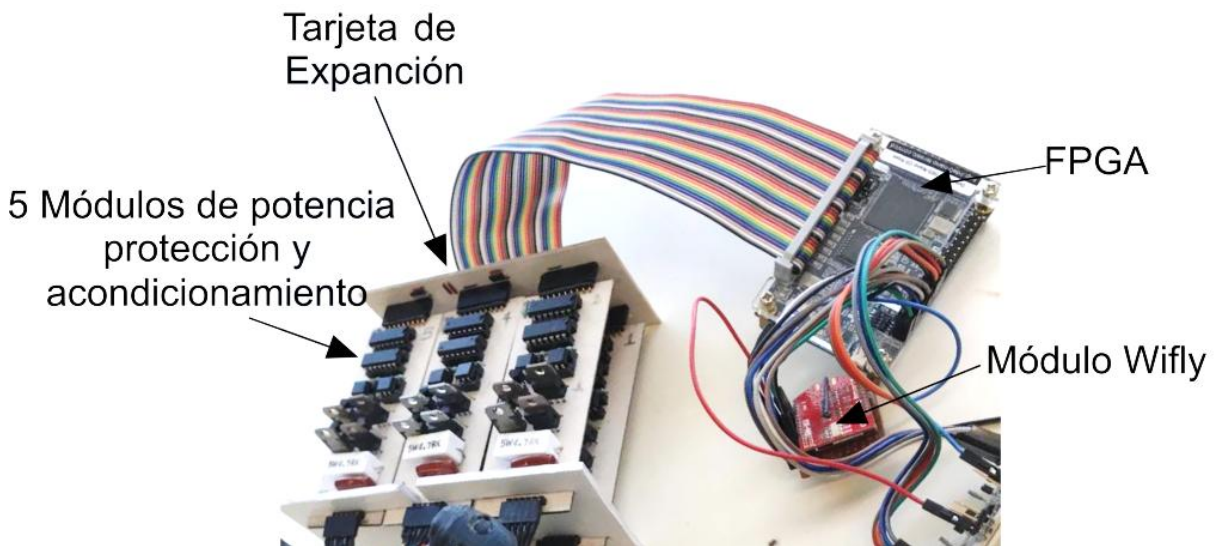


Figura 56: Sistema Electrónico implementado.

4.13 Conclusiones.

Se describió de manera general el sistema electrónico y de comunicación la cual se realiza a través del módulo wifi rx-xv hacia el FPGA mediante una interfaz gráfica en LabView de la misma forma se realizaron los módulos de potencia para cada uno de los motores.

Al realizar la caracterización de cada motor se eligió el voltaje nominal de 5v ya que presentaba mejores beneficios en cuanto a torque y eficiencia, de la misma forma se notó que aunque los motores son del mismo fabricante y de las mismas características la frecuencia de trabajo o caracterización no era la misma, en dos motores se encontró que la frecuencia era la misma (200Hz) pero en los otros tres fueron 220, 210 y 100Hz respectivamente, en todos los motores caracterizados se logró que el torque fuese proporcional a la energía aplicada por un

generador de frecuencia garantizando que trabajen en su zona lineal y por consiguiente los motores sean de transmisión directa.

Se realizaron pruebas a los encoders para conocer la frecuencia máxima en la que trabajan ($\sim 1.57\text{KHz}$) este es un dato importante en la detección de los pulsos para el posicionamiento de los motores, también se encontró que los pulsos por revolución del eje del motor era equivalente a 28 y aproximadamente 2800 pulsos de salida de la caja reductora acoplada al motor.

Se realizaron los cálculos de las distintas etapas de protección, acondicionamiento y potencia y se construyeron dentro de una misma placa para cada actuador, esto nos permite usar las placas como si fueran módulos y posteriormente realizar la conexión hacia el FPGA y en caso de algún inconveniente puedan ser fácilmente intercambiados. De igual forma se mostraron los diagramas de conexión entre las distintas etapas y el FPGA.

Capítulo V: Firmware y Software.

En este capítulo se muestran las diferentes etapas con las que cuenta el firmware del microprocesador [1] implementado en el FPGA mediante la interfaz de Quartus II versión 13.

El algoritmo de control proporcional se realiza mediante el conjunto de instrucciones en ensamblador que ejecuta el microprocesador dentro del FPGA EP4CE22C17C6 previamente compiladas, de esta forma se cierran cinco lazos de control para el control de los actuadores los cuales son los encargados del movimiento de los dedos.

En la sección del software se muestra la interfaz realizada en LabView la cual se encarga de mandar las posiciones deseadas hacia el microprocesador.

5.1 Sistema de transferencia de datos.

Para realizar la programación del firmware del microprocesador dentro del FPGA EP4CE22F17CC6 se usó Quartus II en su versión 13, mediante el módulo wifly (rn-xv) la entrada y salida de datos del modulo son hexadecimales y la comunicación entre el módulo y el FPGA se realiza mediante comunicación UART, para la transferencia de datos el firmware consta de un protocolo de comunicación UART (administrador wifi) que se realiza mediante el uso de 10 bits de los cuales 1 bit es de inicio 8 bits de datos y un bit de paro la lógica es inversa es decir inactiva en “1” lógico y activa en “0 lógico” a la taza de transferencia se le llama baudrate o cantidad de bits por segundo. En la figura 57 se muestra el formato de transmisión UART.

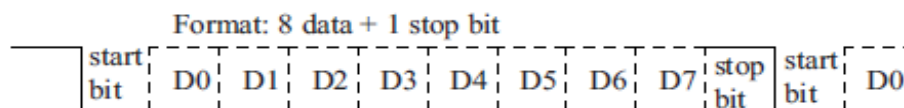


Figura 57: Transmisión UART.

El protocolo UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) o receptor/emisor asíncrono universal permite realizar una comunicación serial entre dos dispositivos el cableado, (ver Fig. 58).

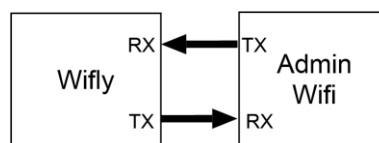


Figura 58: Comunicación UART Módulo Wifly y Admin. wifi en FPGA.

Debido a que la comunicación es asíncrona es decir no usa una señal de reloj implica que ambos dispositivos deben ser configurados a un flujo de datos predeterminados, es así como se puede decir que se realiza una sincronización, y se recomienda muestrear los bits al menos 16 veces más rápido que la velocidad de transferencia como se muestra en la figura 59 donde se muestrea el bit de inicio la mitad de su detección.

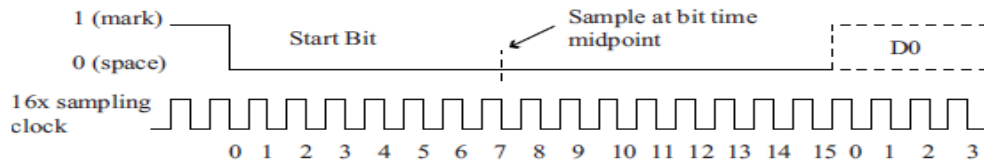


Figura 59: Muestreo de bits.

Al ser implementado el administrador de wifi dentro del FPGA que trabaja a una frecuencia de 100MHz se puede lograr el muestreo adecuado y permite la transmisión y recepción de los datos de manera serial, en la figura 60 se muestran las maquinas de estados del firmware correspondientes a los módulos de transmisión y recepción.

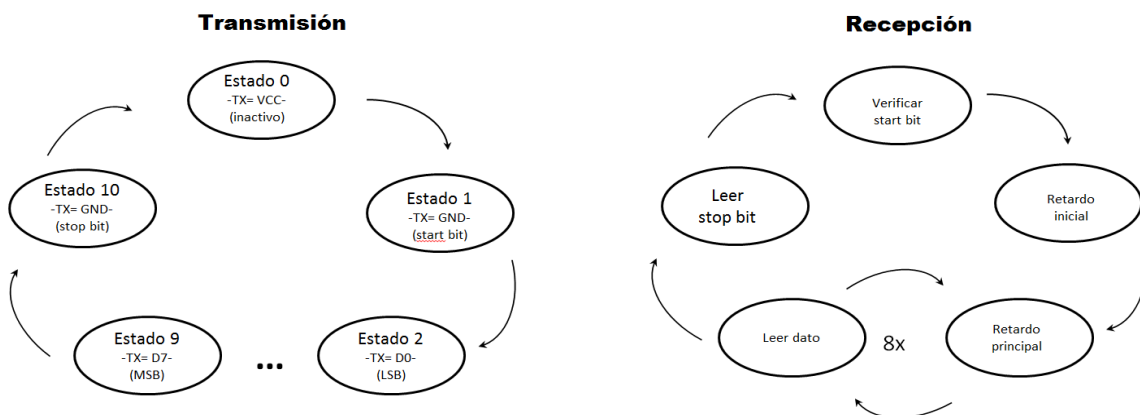


Figura 60: Máquinas de estados de transmisión y recepción UART.

El modulo de transmisión tiene un reloj a 460800 baudios el cual coincide con la configuración del wifly, y cuenta con una entrada de habilitación (enable), entrada de datos a enviar (dataIn[7..0]) y una salida (Busy) que indica que el modulo está ocupado, (ver Fig. 61).

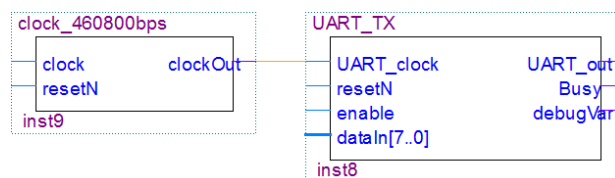


Figura 61: Módulo UART de Transmisión (TX).

Para enviar los datos procesados y guardados ($dataIn[31..0]$) en la RAM hacia la interfaz de Labview se realiza mediante el módulo testUART y la salida del bloque $dataOut[7..0]$ se conecta en el $dataIn[7..0]$ del módulo de transmisión (ver Fig 62).

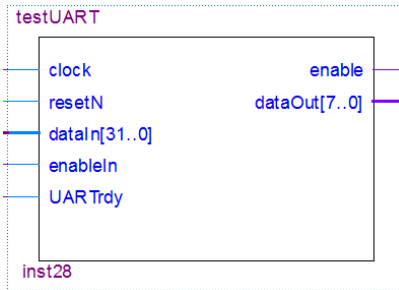


Figura 62: Módulo testUART.

El módulo de recepción adquiere los datos de manera serial a 100 Mhz sincronizándose a los baudios de transmisión mediante retardos y leyendo los datos en la mitad de transmisión de cada bit, y su salida es el byte recibido pero de forma paralela ($dataOutA[7..0]$) como se puede ver en la figura 63.

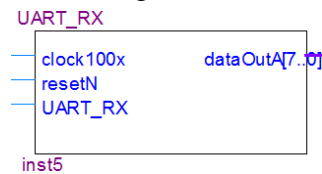


Figura 63: Módulo UART de Recepción.

5.2 Decodificador de posición.

Para la decodificación de la posición se necesita crear una señal de reloj a partir de las señales de los encoders en la figura 64 se muestra el diagrama a bloques de dicho proceso.

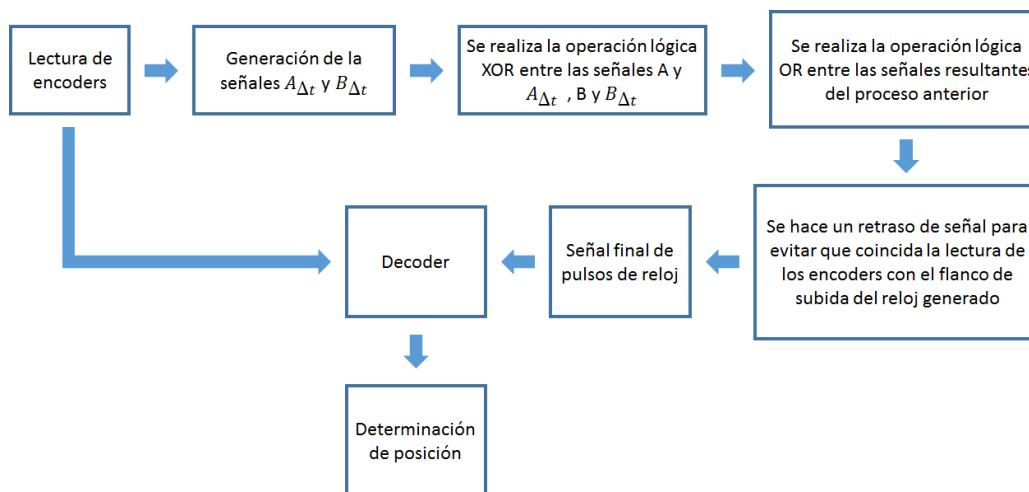


Figura 64: Generación de señal de reloj para maquina de estado.

En la figura 65 se muestra la obtención de la señal de reloj la cual variable y está sincronizada con la velocidad de los motores.

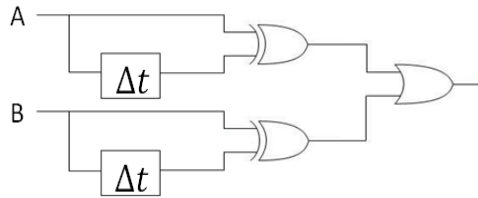


Figura 65: Circuito para la generación de la señal de reloj.

En el circuito anterior se muestra como se genera la señal de reloj para la máquina de estados a partir de las señales del encoder A y B. En la figura 66 se muestra la obtención de las señales A, $A\Delta t$, B y $B\Delta t$, con estas señales se realiza la función XOR y se obtienen $A \otimes A\Delta t$ y $B \otimes B\Delta t$, respectivamente. Después de esto se realiza la función OR para obtener la señal de reloj para la máquina de estados encargada de contar los pulsos.

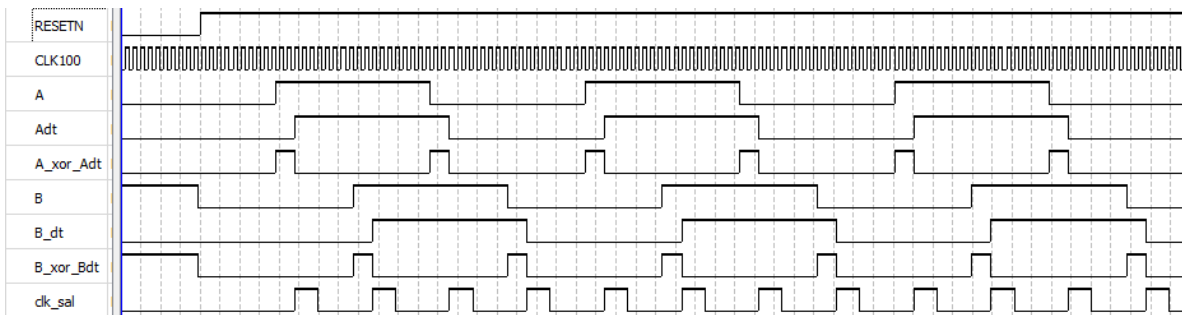


Figura 66: Señales para la obtención de reloj para maquina de estados.

Para el conteo de las señales A y B así como el sentido de giro se realiza mediante la detección de las configuraciones lógicas de la figura 67.

	Estado 1	Estado 2	Estado 3	Estado 4	Estado 1
Encoder A	0	1	1	0	0
Encoder B	0	0	1	1	0

Figura 67: Combinaciones lógicas de señales de encoder.

De esta forma se implementa la máquina de estados de la figura 68 que contará los pulsos y detectara el sentido de giro del encoder.

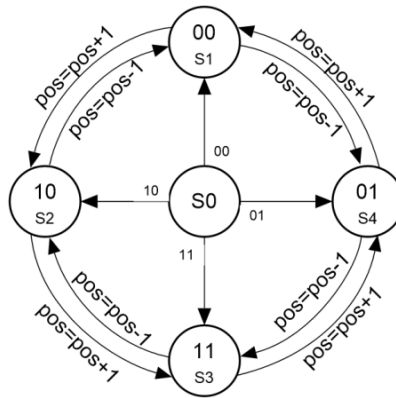


Figura 68: Diagrama de máquina de estados para decodificar el encoder.

Por lo tanto el módulo para la decodificación de las señales de los encoders se muestra en la figura 69

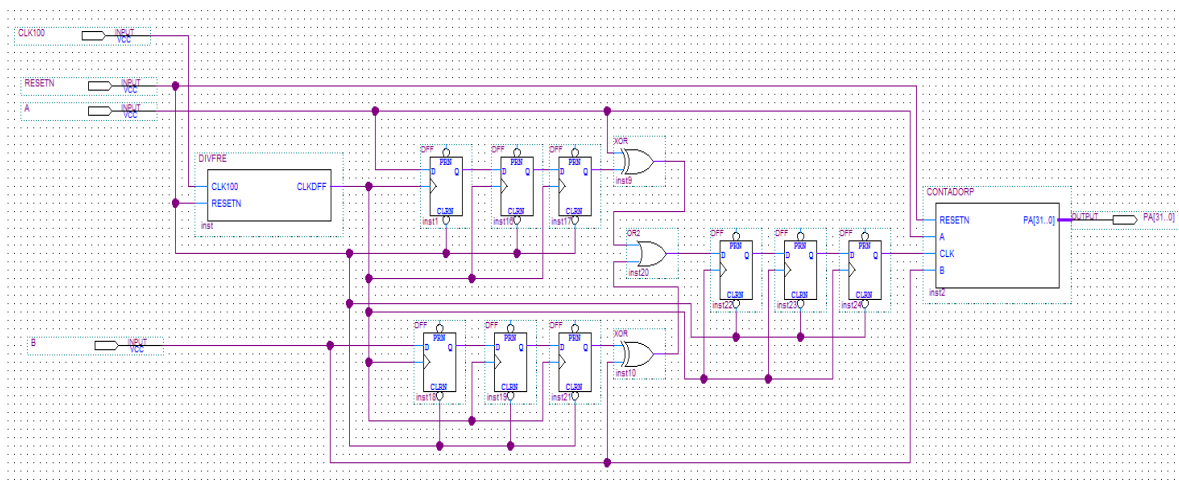


Figura 69: Módulo decodificador de posición.

5.3 Generación de PWM

La modulación por ancho de pulso o PWM (Pulse Width Modulation) es una técnica muy usada para regular la velocidad de giro de motores, en la caracterización de los motores vistas en el capítulo 4 se encontraron sus respectivas frecuencias y se obtiene la tabla 12 de frecuencias a generar para los respectivos actuadores.

Actuador	Frecuencia (Hz)
Motor 1	220
Motor 2	210
Motor 3	200
Motor 4	200
Motor 5	100

Tabla 12: Frecuencias características de motores.

Para generar la señal de reloj para el respectivo PWM y que el bloque realice las frecuencias vistas en la tabla 12 se tiene que calcular un divisor de frecuencia para el PWM de la siguiente forma:

$$frec_{DIVPWM} = frec_{motor} * 255 \quad (50)$$

Dónde:

$frec_{motor}$ es la frecuencia obtenida del motor correspondiente en la caracterización.

255 equivale al máximo valor de PWM.

El periodo del PWM es:

$$Periodo_{DIVPWM} = \frac{1}{frec_{PWM}} \quad (51)$$

Al obtener el periodo del PWM y dividirlo entre el periodo de la señal de reloj de trabajo FPGA se puede obtener el número de cuentas para el divisor de frecuencia.

$$\#cuentas = \frac{Periodo_{DIVPWM}}{Periodo_{FPGA}} \quad (52)$$

Donde el $Periodo_{FPGA}$ equivale a 10nseg.

Realizado los respectivos cálculos se obtiene la tabla 13 que contiene el número de cuentas para los divisores de frecuencia respectivos de los bloques de PWM Y los diagramas de flujo para los divisores de frecuencia.

Motor 1	1782
Motor 2	1867
Motor 3	1960
Motor 4	1960
Motor 5	3921

Tabla 13: Valores de cuentas máximos para divisores de frecuencia.

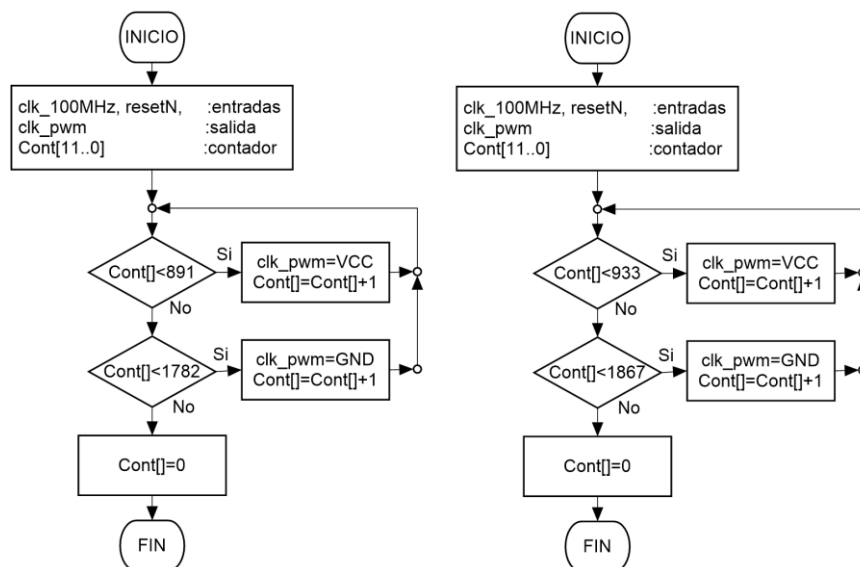


Figura 70: Divisores de frecuencia para motor 1 (220Hz) y motor 2 (210Hz).

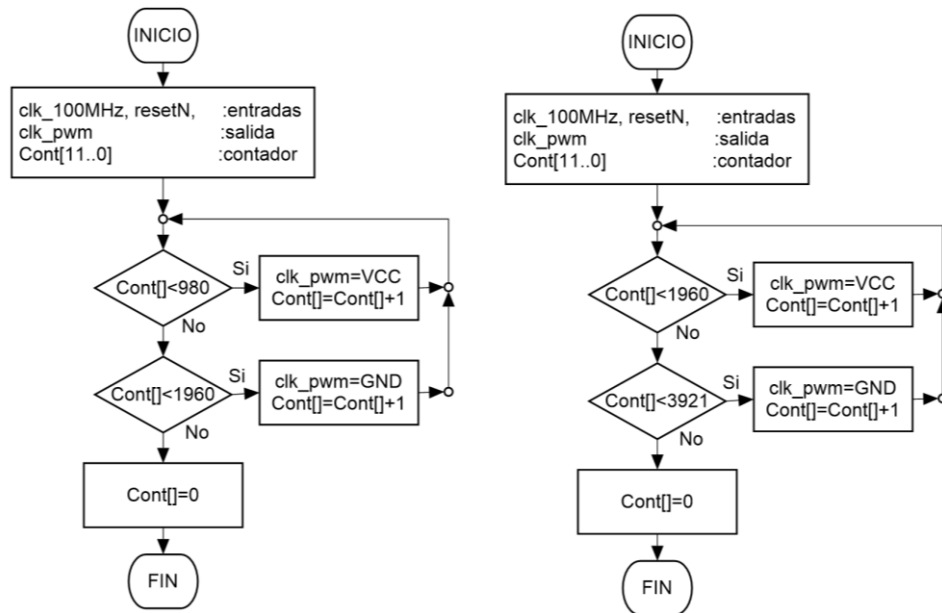


Figura 71: Divisores de frecuencia para motor 3,4 (200Hz) y motor 5 (100Hz).

El Bloque que genera la señal PWM y sentido de giro se muestra en la figura 72.

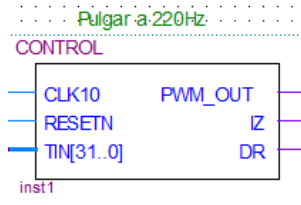


Figura 72: Bloque generador de señales de control PWM Izquierda y Derecha

5.4 Microprocesador.

El firmware cuenta con la implementación de un microprocesador que se encarga de realizar el algoritmo de control mediante su propio conjunto de instrucciones precompiladas, el conjunto de bloques que componen al microprocesador se muestra en la figura 73.

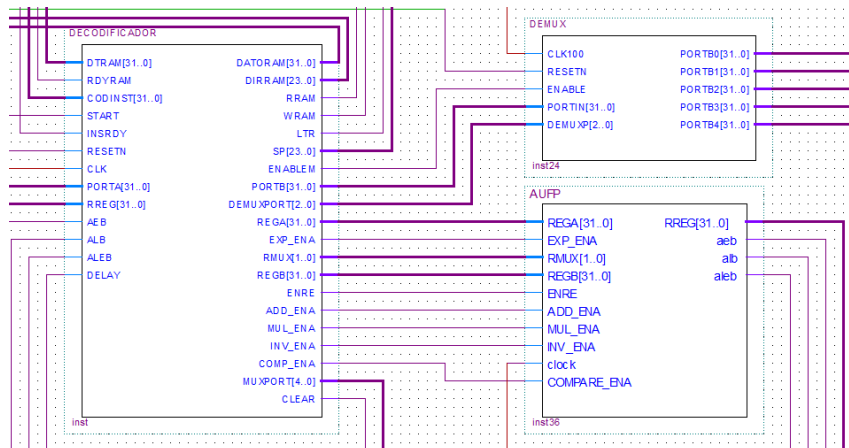


Figura 73: Bloques que componen el microprocesador.

En la tabla 14 se muestra el conjunto de instrucciones que puede ejecutar el microprocesador.

INSTRUCCIONES CODIGO ENSAMBLADOR								
INST.	COD. INST.	REG. F1	REG F2	REG. D	SHAMT	FUNC.	FORMATO	DESCRIPCIÓN
MOV.S	110010	XXXXX	00000	XXXXX	00000	000000	I	X->Y
MOVC.S	110010	00000	00000	XXXXX	00000	000001	I	MC->X
RIO.S	110010	XXXXX	00000	XXXXX	00000	000010	I	PORTIN->X
WIO.S	110010	XXXXX	00000	XXXXX	00000	000011	I	X->PORTOUT
MOV.RX	100011	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXXX	I	X =MEMORIA RAM[DIR]
MOV.WX	101011	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXXX	I	MEMORIA RAM[DIR]=X
C.EQ.S	000100	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXXX	I	IF (X==Y) SI PC=PC+4+L, NO PC=PC+4.
C.LE.S	000101	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXXX	I	IF (X<=Y) SI PC=PC+4+L, NO PC=PC+4.
C.LT.S	000110	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXXX	I	IF (X<Y) SI PC=PC+4+L, NO PC=PC+4.
ADD.I	001000	XXXXX	XXXXX	XXXXX	00000	000000	R	x=x+y
SUB.I	001000	XXXXX	XXXXX	XXXXX	00000	000001	R	x=x-y
ADD.S	010001	XXXXX	XXXXX	XXXXX	00000	000000	R	X=X+Y
SUB.S	010001	XXXXX	XXXXX	XXXXX	00000	000001	R	X=X-Y
MUL.S	010001	XXXXX	XXXXX	XXXXX	00000	000010	R	Z=X*Y
DIV.S	010001	XXXXX	00000	XXXXX	00000	000011	R	Y=1/X
EXP.S	010001	XXXXX	00000	XXXXX	00000	000101	R	Y=exp(X)
JUMP	000010	00XXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXX	XXXXXXX	J	IR A DIR

Tabla 14: Conjunto de instrucciones de microprocesador.

5.5 Controlador Proporcional (Firmware de algoritmo de control)

El algoritmo de control proporcional para el movimiento del dedo índice se muestra en la figura 74 y el código que realiza el controlador se muestra en la tabla 15.

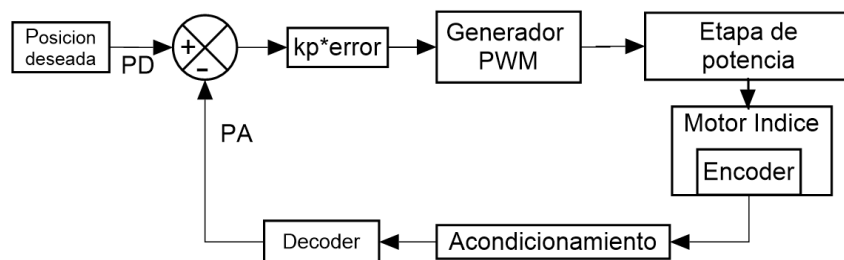


Figura 74: Lazo cerrado de control Kp para cada uno de los dedos.

El puerto 2 corresponde al puerto de entrada de las señales de encoder al que el motor del dedo índice está colocado y los puertos donde se envían la posición deseada y la ganancia corresponden a los puertos 13 y 12 respectivamente, en el puerto 2 de salida manda el torque hacia el pwm correspondiente.

Dirección	Instrucción	Descripción
0	MOVC.S R7	
4	CTE.S 255	R7=255
8	MOVC.S R8	
12	CTE.S -255	R8=-255
16	RIO.S PT13 R1	R1=Pos_des
20	RIO.S PT12 R2	R2=Kp
24	RIO.S PT2 R3	R3=Pos_act
28	SUB.S R1 R3 R1	R1=Pos_des-Pos_act=error
32	MUL.S R2 R1 R0	R0=Kp*error
36	C.LE.S R0 R7 L8	Si R0 <=255 entonces salta a 48 si no entonces ejecuta 40
40	MOV.S R7 R0	R0=255
44	JUMP 60	salta a 60
48	C.LE.S R0 R8 L4	si R0 <= -255 entonces salta a 56 si no entonces ejecuta 52
52	JUMP 60	salta a 60
56	MOV.S R8 R0	R0=-255
60	WIO.S R0 PT2	PT2=R0
64	DELAY	retardo 2.5ms
68	JUMP 16	salta a 16

Tabla 15: Código en ensamblador de control proporcional.

En el Apéndice D se encuentra el código para controlar 5 grados de libertad.

5.6 Compilador.

En la figura 75 se muestra el compilador que se encarga de traducir del lenguaje ensamblador a hexadecimal.

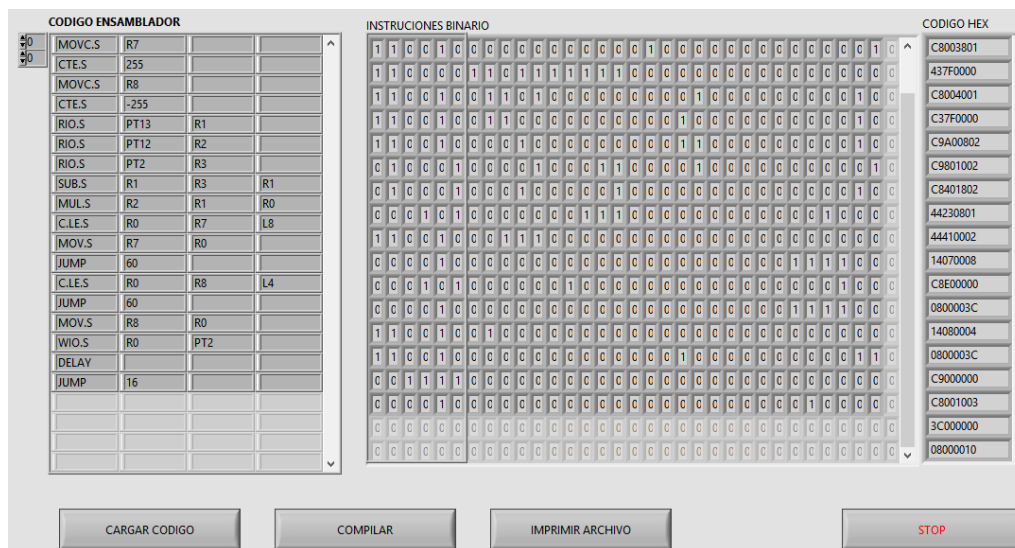


Figura 75: Compilador de instrucciones.

Los pasos a seguir para el compilado son:

1. Crear un archivo de texto con las instrucciones para realizar el algoritmo de control.
2. Ejecutar el compilador y presionar “cargar el código”
3. Elegir el archivo a compilar.
4. Presionar “compilar”.
5. Guardar el archivo con el botón “imprimir a archivo”.

5.7 Software.

Para poder manipular la posición deseada de la mano mecatrónica se realizó una interfaz de usuario mediante la plataforma LabView en la Fig 76 se muestra la interfaz desarrollada.

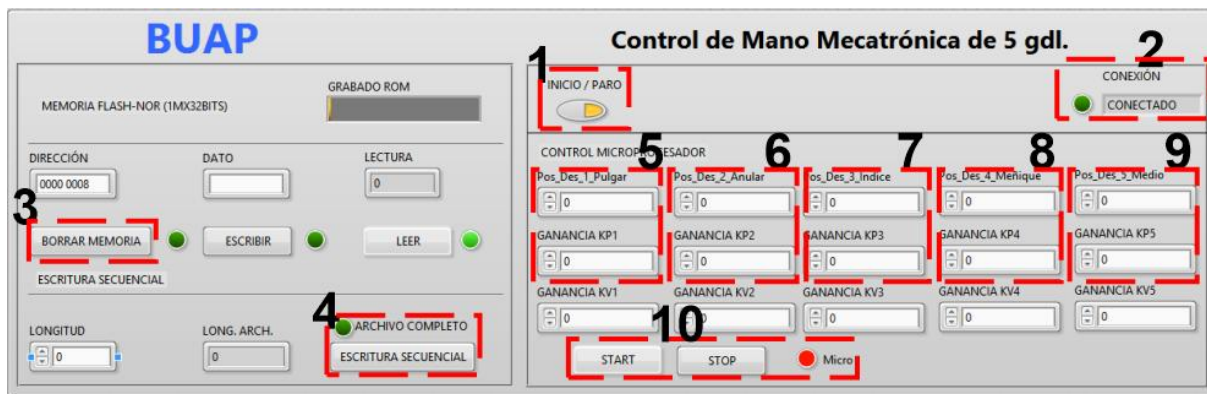


Figura 76: Interfaz de usuario para mandar las posiciones deseadas.

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

1. Botón de Inicio de comunicación wifi y paro de emergencia.
2. Indicador de conexión visual.
3. Borrado de memoria ROM.
4. Escritura de memoria ROM con algoritmo compilado en hexadecimal.
5. Posición deseada en cuentas y ganancia proporcional para dedo Pulgar.
6. Posición deseada en cuentas y ganancia proporcional para dedo Anular.
7. Posición deseada en cuentas y ganancia proporcional para dedo Índice.
8. Posición deseada en cuentas y ganancia proporcional para dedo Meñique.
9. Posición deseada en cuentas y ganancia proporcional para dedo Medio.
10. Botones de Inicio y paro de ejecución de algoritmo de control e indicador.

Para poder ejecutar el algoritmo de control es necesario realizar los siguientes pasos:

1. Iniciar comunicación con modulo wifi botón “inicio/paro”
2. Tener el archivo precompilado del algoritmo de control haciendo uso del compilador.

3. Presionar botón 3 “borrar memoria”.
4. Presionar indicador “archivo completo” seguido de “escritura secuencial”.
5. Colocar posición deseada y ganancia k_p a controles.
6. Ejecutar el algoritmo mediante el botón “start”

5.8 Conclusiones.

El firmware para el sistema de la mano mecatrónica se realizó en Quartus II mediante el uso de un microprocesador[1] implementado en FPGA el cual fue modificado para controlar cinco gdl. El microprocesador recibe los parámetros de posiciones deseadas y ganancias desde LabView de manera inalámbrica por medio del protocolo TCP/IP hacia el módulo wifly los cuales se decodifican y se ejecuta el control proporcional mediante el código del algoritmo de control k_p precompilado es así como la interfaz graba el código hexadecimal en la memoria ROM del FPGA para ser ejecutado, el software se realizó en Labview 15.

Capítulo VI: Resultados Experimentales.

En este capítulo se presentan los resultados experimentales tales como la caracterización de los motores, las señales de cuadratura de encoder, las señales de pwm generadas para controlar a los actuadores por medio de las etapas de potencia, los resultados de posiciones deseadas mediante el uso del analizador lógico en Quartus, el sistema mecatrónico finalizado y las etapas que lo conforman así como la interfaz

6.1 Resultados de la caracterización de los motorreductores CGM12N20VA.

Se realizó la caracterización de los motores y el voltaje nominal en todos fue de 5v así como también se encontraron las frecuencias respectivas: motor 1 (220Hz) motor 2 (210Hz), motor 3 (200Hz), motor 4 (200Hz), y motor 5 (100Hz) el resultado de los datos de torque respecto al ciclo de trabajo se muestran en la tabla 16.

Ciclo trabajo	motor 1 (220 Hz)	motor2 (210 Hz)	motor 3 (200 Hz)	motor 4(200 Hz)	motor 5 (100 Hz)
	Torque (Nm)	Torque (Nm)	Torque (Nm)	Torque (Nm)	Torque (Nm)
10%	0.004905	0.004905	0.005886	0.005886	0.005886
20%	0.01987114	0.01987114	0.01987114	0.01987114	0.02235503
30%	0.03477449	0.03601643	0.03601643	0.03477449	0.03850033
40%	0.04967784	0.05340368	0.05340368	0.04967784	0.05837146
50%	0.06954898	0.07203287	0.06830703	0.07079092	0.07079092
60%	0.08196844	0.08445233	0.08569427	0.08196844	0.08817817
70%	0.09066206	0.09687179	0.09811373	0.09935568	0.10680736
80%	0.10680736	0.11425903	0.11301709	0.10680736	0.11798487
90%	0.12295265	0.12916238	0.13164628	0.12295265	0.13288822
99%	0.14779157	0.1403399	0.1403399	0.1403399	0.1403399

Tabla 16: Datos obtenidos de torques contra ciclo de trabajo para cada motor.

Y Las gráficas de Torque vs Ciclo de Trabajo de los motores se muestra en la figura 77 donde se observa la respuesta lineal respecto a la frecuencia encontrada dando como resultado que los motores fueran de transmisión directa.

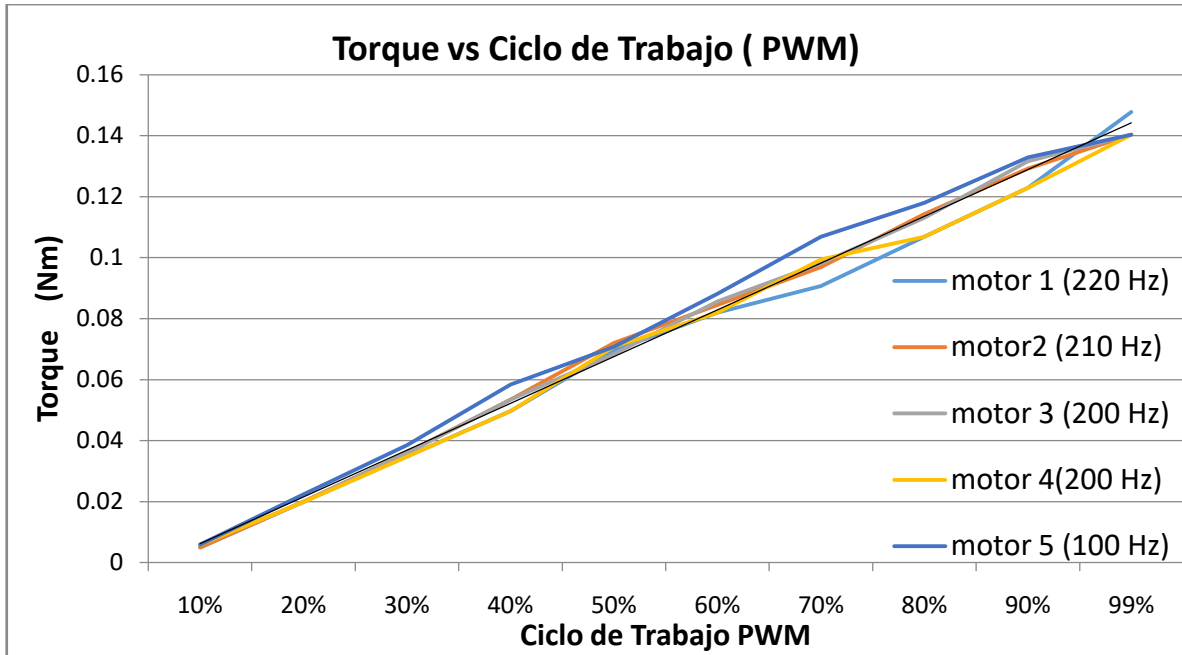


Figura 77: Grafica de linealidad torque vs Ciclo de Trabajo de 5 motores.

6.2 Resultado de las señales de encoder.

En la figura 78 se muestran las pruebas que se realizaron al encoder donde las señales A y B resultantes tienen un desfase de 90° proporcionando los estados lógicos para realizar el conteo y cambio de giro para llegar a la posición deseada.

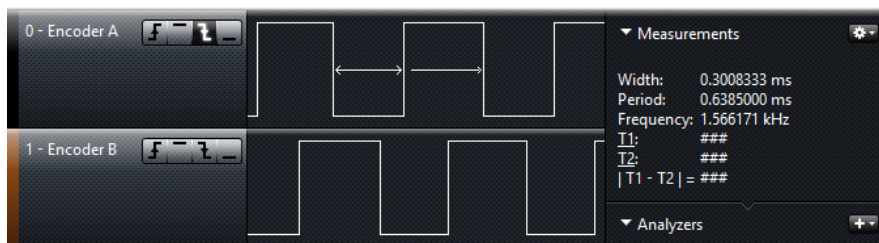


Figura 78: Señales de Encoder.

6.3 Resultados de las señales de PWM.

En la figura 79 se muestran las señales correspondientes de pwm para cada motor para que trabajen en su zona lineal, mediante el uso de un analizador lógico saleae.



Figura 79: Señales PWM obtenidas para el control de los motores.

6.4 Resultados de las etapas que conforman el sistema electrónico.

En la figura 80 se muestra la conexión de cinco placas o módulos los cuales cuentan cada uno con su respectiva etapa de potencia protección y acondicionamiento de señales para el control del sistema de la mano mecatrónica, las cinco placas se conectan a una tarjeta de expansión y la tarjeta se conecta mediante un cable plano hacia el FPGA que contiene las señales de Encoders, señales PWM así como también consta de un conector para las alimentaciones a las etapas de potencia para los motores.

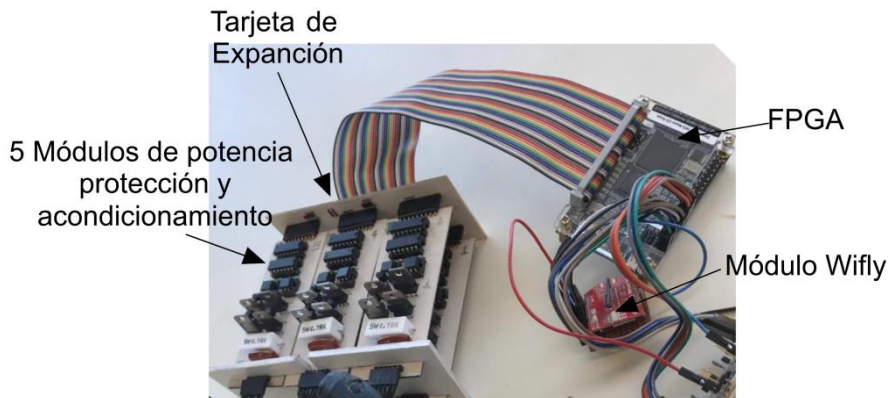


Figura 80: Sistema electrónico implementado.

En la figura 81 se muestra el sistema completo de la mano mecatrónica la cual tiene 5 actuadores para el movimiento en flexión correspondientes a los cinco dedos de la mano y los

actuadores se conectan a su respectiva etapa de potencia, protección y acondicionamiento hacia el FPGA por medio de un cable plano permitiendo realizar la conexión entre las señales que nos interesan para el control el cual se realiza mediante la programación mediante un módulo wifly rn-xv.

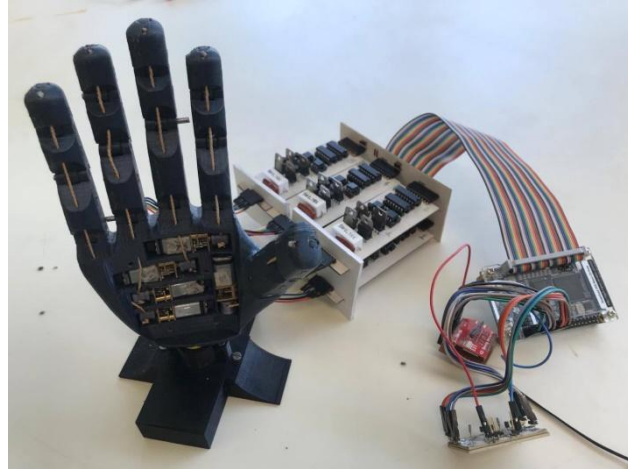


Figura 81: Sistema completo de la mano mecatrónica.

6.5 Resultados de la modificación del firmware en Quartus.

Se realizaron modificaciones al firmware de Quartus para controlar 5gdl como se muestra en la fig. 82.

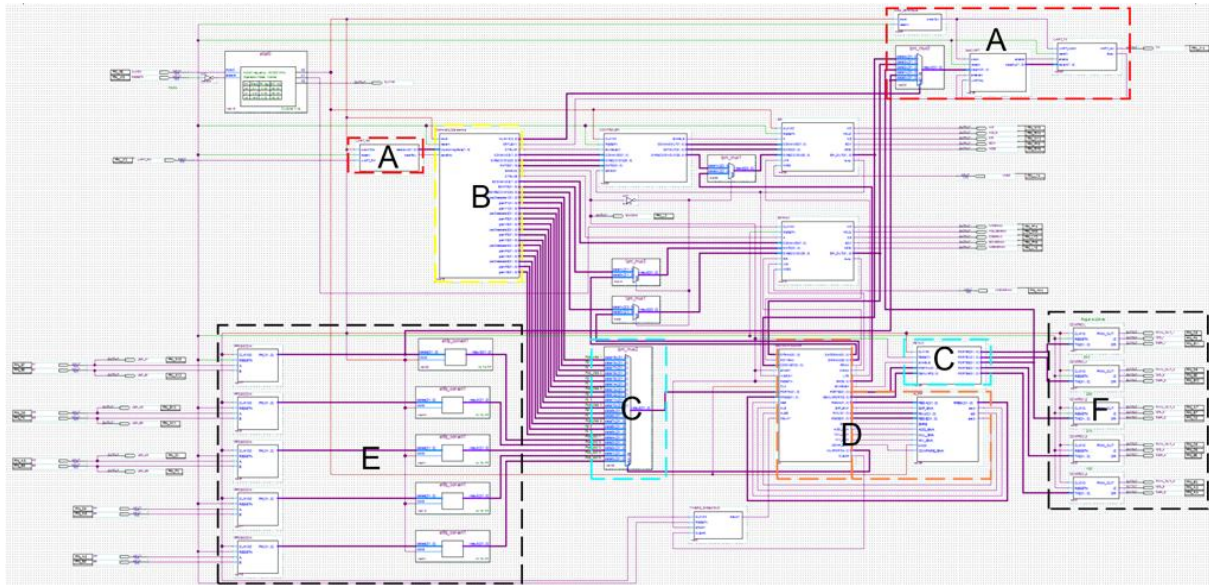


Figura 82: Firmware de microprocesador implementado y modificado para 5gdl.

De donde A corresponde a el administrador de wifi, B es la etapa de decodificador de comandos, C es el puerto de entrada y salida, D son los bloques que componen el microprocesador, E es el bloque de decodificación de posiciones actuales, y F son los bloques de PWM.

6.6 Resultados de la interfaz en LabView.

Mediante la interfaz en LabView fue posible enviar las posiciones deseadas a cada uno de los actuadores para la flexión de los dedos, (ver Fig.83).



Figura 83: Interfaz gráfica realizada en LabView.

En la figura 84 se muestra el resultado del analizador lógico herramienta de Quartus.

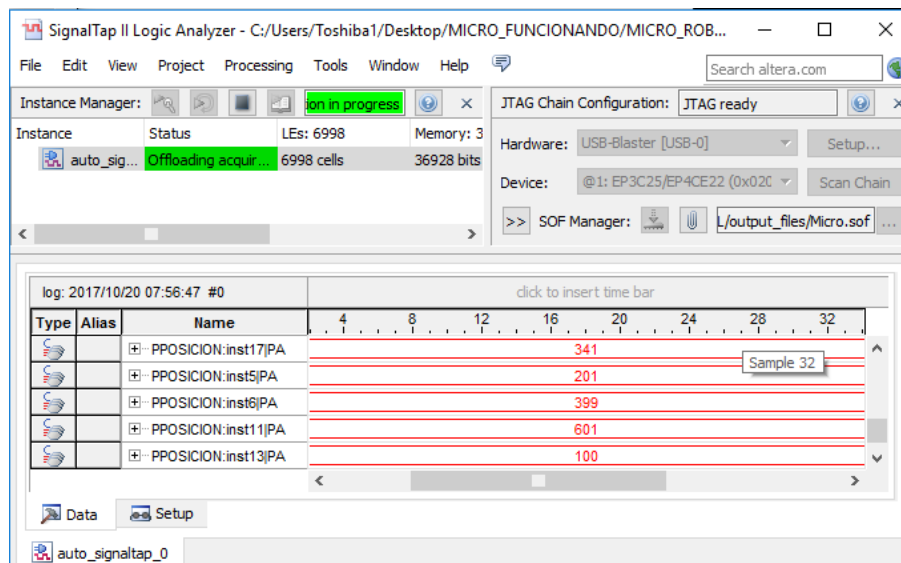


Figura 84: Posiciones deseadas alcanzadas +/- 1 cuenta.de error

Las graficas correspondientes al error de posición para una posición deseada a 180 grados para el motor 1 (pulgar), el torque calculado y la velocidad estimada se muestra en la figura 85.

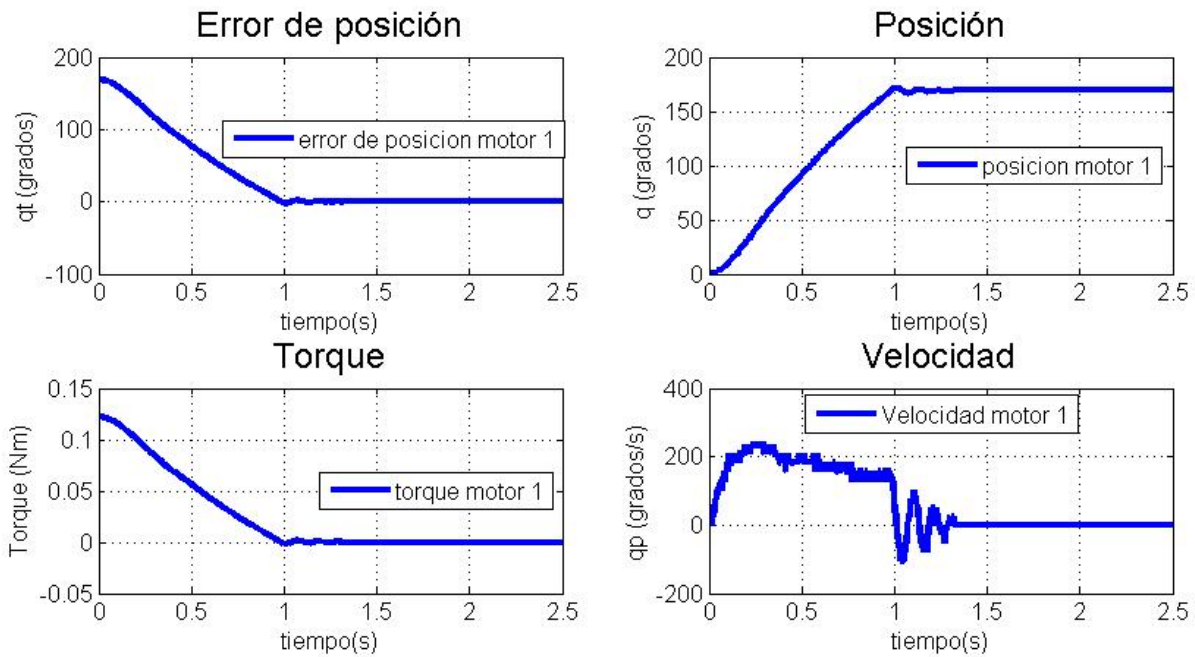


Figura 85: Gráficas para el motor 1 (pulgar).

Las graficas correspondientes al error de posición para una posición deseada a -210 grados para el motor 2 (Anular), el torque calculado y la velocidad estimada se muestra en la figura 85.

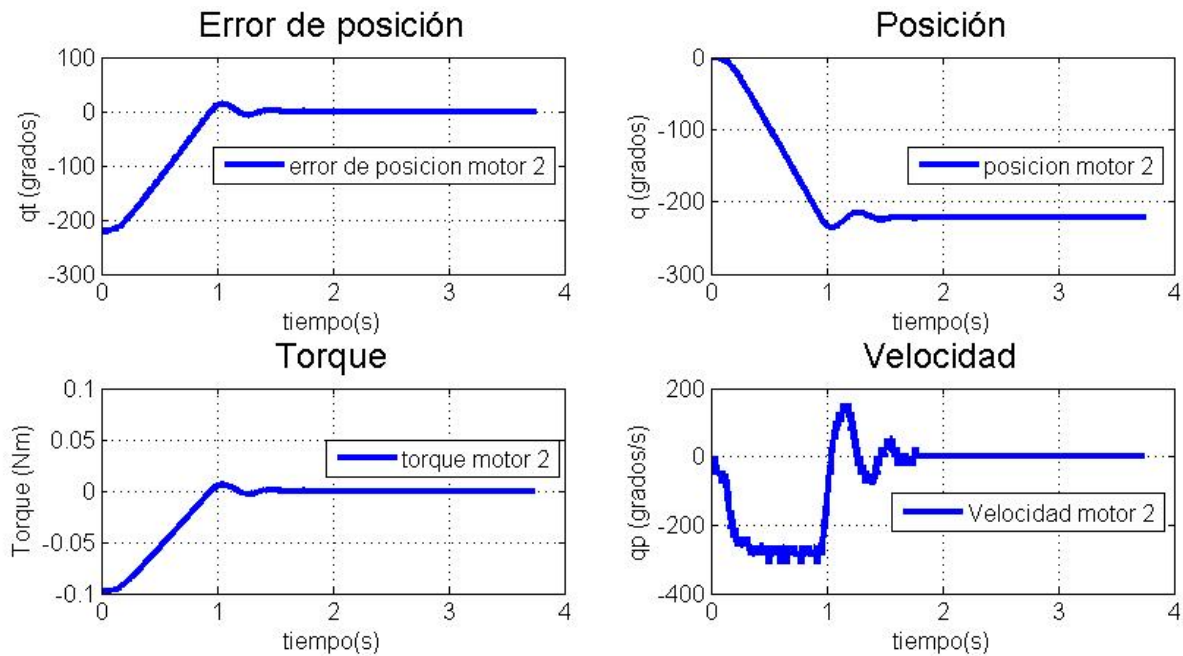


Figura 86: Gráficas para el motor 2 (Anular).

En la figura 87 se muestran las gráficas de error de posición, posición, torque, y velocidad para una posición deseada de 280° para el motor 3 (índice), el Torque aplicado mediante el algoritmo de control proporcional realizado de esta gráfica se puede deducir que a medida que el error es muy grande el torque o par es máximo y a medida que el error tiende a cero el torque se mantiene al mínimo sin llegar a ser cero para mantener la posición deseada.

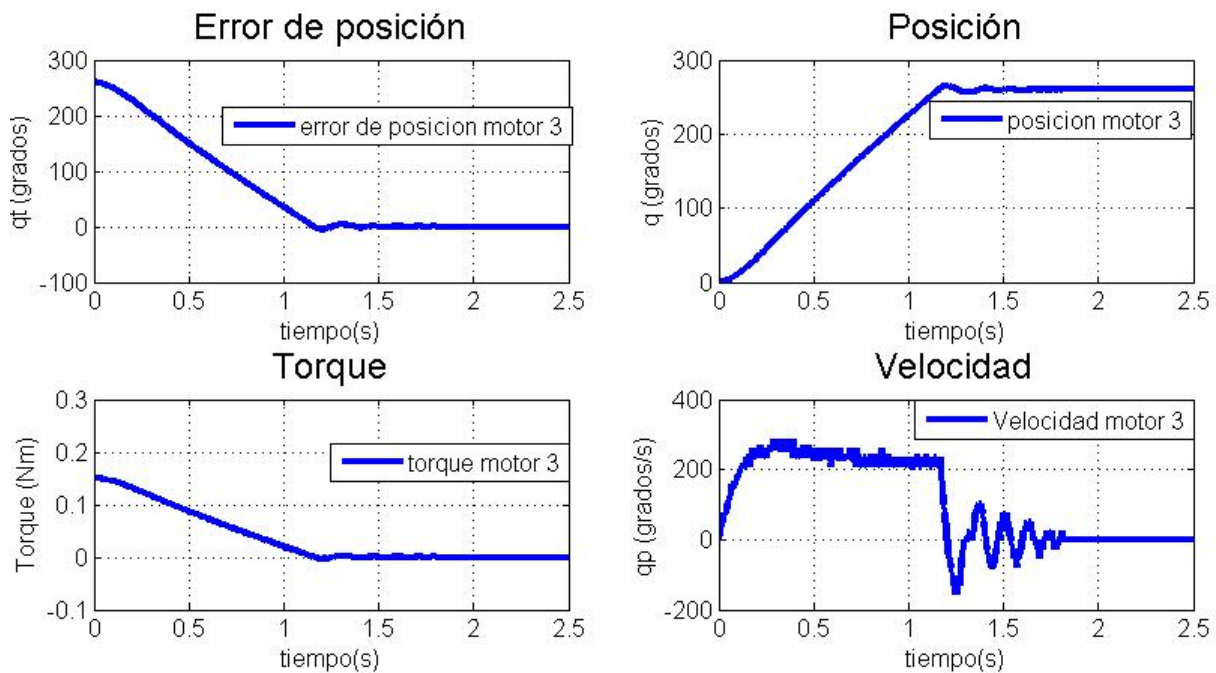


Figura 87: Gráficas de motor 3 (Índice).

6.6 Conclusiones.

Mediante la correcta caracterización de los motores garantizamos que el torque aplicado es directamente proporcional a la energía aplicada y tener un buen funcionamiento, se construyó el sistema mecánico de la mano así como también se realizaron los pertinentes acoples para poder realizar la flexión de los dedos las dimensiones de la mano y el diseño podría ser un prototipo de prótesis.

Conclusiones Generales.

El objetivo general de esta tesis al igual que los objetivos particulares se han completado ya que desarrolla un sistema mecatrónico para una mano robótica que se puede acoplar a un robot humanoide, en su construcción cuenta con cuatro dedos y un pulgar, tiene la apariencia y dimensiones de una mano humana, se realizó el estudio de la cinemática y dinámica, así como también es controlado mediante una interfaz de manipulación por medio de LabView (en tiempo real) que implementa el paro de emergencia y se tomaron en cuenta etapas de protección y aislamiento para proteger los servomecanismos evitando los daños.

Gracias al diseño en SolidWorks de la mano y mediante impresión 3D se pudo construir el diseño, con ciertas restricciones para el movimiento de los dedos estas restricciones fueron un punto primordial para no sobrepasar los parámetros en el algoritmo de control.

La etapa de potencia permite entregar la energía necesaria mediante las señales de salida procesadas por el algoritmo de control y permitió que los motores trabajen en su zona lineal convirtiendo los motores en transmisión directa, la etapa de aislamiento permite proteger a las etapas digitales (FPGA, compuertas lógicas), la etapa de protección permite que nuestros motores no sufrieran ningún daño y la etapa de acondicionamiento permitió recibir las señales de los encoders para poder cerrar los cinco lazos de control

Para el firmware del FPGA se hizo uso de un microprocesador [1] desarrollado en la Maestría en Ciencias de la Electrónica opción Automatización de la Benemérita universidad Autónoma de Puebla al cual se le realizaron modificaciones en los bloques de entrada salida y decodificación respectivamente.

El algoritmo de control implementado fue uno de tipo proporcional mediante instrucciones en ensamblador el cual fue compilado, con el compilador desarrollado en la Maestría en Ciencias de la Electrónica opción Automatización de la Benemérita universidad Autónoma de Puebla y posteriormente ser ejecutado dentro del FPGA mediante comunicación wifi.

El control de la mano mecatrónica fue desarrollado en LabView y se encarga de enviar las posiciones deseadas y ganancias para ser ejecutadas en el algoritmo de control y cerrar los cinco grados de libertad con los que cuenta la mano.

Como trabajo a futuro se implementarán sensores de fuerza a la mano mecatrónica y posteriormente el sistema para el movimiento de la muñeca y brazos.

Apéndice A



Diseño de una mano mecatrónica para un robot humanoide

Fernando Herrera Arroyo.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ciencias de la Electrónica. México.
Email: fa_hce@gmail.com

Sergio Vergara Limón.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ciencias de la Electrónica. México.
Email: svergara2@hotmail.com

M. Aurora Dioncira Vargas Treviño.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ciencias de la Electrónica. México.
Email: auroravargast@hotmail.com

Darnes Vilarino Ayala.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ciencias de la Computación. México.
Email: darnes@cs.buap.mx

David Eduardo Pinto Avendaño

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ciencias de la Computación. México.
Email: dpinto@cs.buap.mx y darnes@cs.buap.mx

Resumen: El objetivo principal de este trabajo es presentar el diseño y modelado de una mano mecatrónica con cualidades antropomórficas la cual será acoplada a un robot humanoide para propósitos de agarre, los puntos que se abordan principalmente son el estudio de la anatomía de la mano humana desde sus aspectos de funcionamiento hasta las medidas y ángulos de flexión para posteriormente realizar la construcción de la mano y los materiales empleados mediante el uso del programa CAD SolidWorks e impresión 3D, también se realiza la obtención de la cinemática de un dedo por los parámetros Denavit-Hartenberg así como la dinámica por la metodología de Euler Lagrange, de la misma forma se menciona la caracterización de los motores que serán los responsables del movimiento para que trabajen en su zona lineal, la descripción del firmware dentro de un FPGA del fabricante ALTERA de la familia Cyclone III con la cual se realiza la comunicación de la mano mediante una interfaz con un pic18F4550 hacia la pc.

Abstract: The main goal of this paper is present the design and modeling of a mechatronics hand with anthropomorphic qualities which will be coupled to a humanoid robot for gripping purposes, the main points that will be shown are the study of the anatomy of the human hand from its aspects of operation up to the measurement and flexion angles to the construction of the hand and the materials used by the use of CAD software SolidWorks and 3D printing, also we obtain the kinematics of a finger by the Denavit-Hartenberg parameters, and the Dynamics by Lagrange equations, we characterize the actuators (Gear-motors) that will be responsible for the movement of the hand to be able to work in their linear zone, we describe the firmware implemented in a FPGA from ALTERA Cyclone III family with which the communication of the hand is made through an interface using a microcontroller pic 18F4550 to the pc.

Keywords:—mano, robótica, mecatrónica, robot humanoide

I. INTRODUCCIÓN

Un campo de estudio entre la robótica se ha enfocado en la emulación de los movimientos del ser humano en específico respecto a las extremidades, ya que sus aplicaciones son extensas desde terapias, prótesis, herramientas manipuladoras, hasta construcción de robots humanoide, esto con la finalidad de dar una mejor calidad de vida al usuario, reducir el esfuerzo humano para implementar ciertas tareas, o con fines de investigación.

En el laboratorio de ingeniería del lenguaje y conocimiento de la facultad de ciencias de la computación de la BUAP se adquirió un robot humanoide de la empresa hanson robotics con la capacidad de realizar expresiones faciales, sin embargo este robot cuenta con el torso robotizado, se desea desarrollar de manera gradual otras partes del cuerpo, por lo tanto se desarrollará una mano mecatrónica con la finalidad de agarre de objetos y a trabajo futuro se intentará contar con un sentido del tacto.

Es así como este trabajo se enfoca principalmente en la construcción de la mano mecatrónica la cual debe de constar de un sistema de control para poder acceder a los movimientos de los actuadores del sistema considerando los mecanismos de seguridad que eviten daños a las diferentes etapas que lo constituyen.

Las características del sistema son:

- Cuatro dedos y un dedo pulgar.
- Está basado en la cinemática y dinámica de los seres humanos.
- Contará con un control efectivo para la manipulación desde herramientas de software (en tiempo real).

Apéndice B

Código de Cinemática y Dinámica.

```
clc;clearall;closeall;formatshort;
symsq1ppq2pp111213lc11c21c3; %declaración de variables
symsq1q2q3;
symsq1pq2pq3p;
symsM1M2M3I1I2I3G;

%A=DH(teta,d,a,alfa)%
A01=DH(q1,0,l1,0);
A12=DH(q2,0,l2,0);
A23=DH(q3,0,l3,0);

%Matrices de transformación para cada eslabón%
T1=simplify(A01);
T2=simplify(A01*A12);
T3=simplify(A01*A12*A23);

%Cinemática directa de cada eslabón respecto al centro de masa%
pos1=[l1*cos(q1);
      l1*sin(q1);
      T1(3,4)];

pos2=[l1*cos(q1)+l2*cos(q1+q2);
      l1*sin(q1)+l2*sin(q1+q2);
      T2(3,4)];

pos3=[l1*cos(q1)+l2*cos(q1+q2)+l3*cos(q1+q2+q3);
      l1*sin(q1)+l2*sin(q1+q2)+l3*sin(q1+q2+q3);
      T3(3,4)];

%Cálculo de velocidades para cada eslabón%
vel1=diff(pos1,q1)*q1p;
vel1_t=[vel1(1),vel1(2),vel1(3)];
vel2=diff(pos2,q2)*q2p + diff(pos2,q1)*q1p;
vel2_t=[vel2(1),vel2(2),vel2(3)];
vel3=diff(pos3,q3)*q3p + diff(pos3,q2)*q2p + diff(pos3,q1)*q1p;
vel3_t=[vel3(1),vel3(2),vel3(3)];

%Cálculo de rapidez de cada eslabón%
rap1=simplify(vel1_t*vel1);
rap2=simplify(vel2_t*vel2);
rap3=simplify(vel3_t*vel3);

% %%% Energía Cinética %%%
K1=((1/2)*M1*rap1)+((1/2)*I1*(q1p)^2);
K2=((1/2)*M2*rap2)+((1/2)*I2*(q1p+q2p)^2);
K3=((1/2)*M3*rap3)+((1/2)*I3*(q1p+q2p+q3p)^2);

%Energía cinética total%
K=K1+K2+K3;

% Energía Potencial %
U1=M1*G*(l1*sin(q1));
U2=M2*G*(l1*sin(q1)+l2*sin(q1+q2));
```

```

U3=M3*G*(l1*sin(q1)+l2*sin(q1+q2)+lc3*sin(q1+q2+q3));

%Energía potencial total%
U=U1+U2+U3;

% Lagrangiano %
L=simplify(K-U);

% Derivada parcial de posición %
L_q1=diff(L,q1);
L_q2=diff(L,q2);
L_q3=diff(L,q3);

% Derivada parcial de velocidad %
L_q1p=simplify(diff(L,q1p));
L_q2p=simplify(diff(L,q2p));
L_q3p=simplify(diff(L,q3p));

% Derivada temporal de la derivada parcial de velocidad %%%
L_dt_q1p=simplify(diff(L_q1p,q1)*q1p + diff(L_q1p,q2)*q2p + diff(L_q1p,q3)*q3p);
L_dt_q2p=simplify(diff(L_q2p,q1)*q1p + diff(L_q2p,q2)*q2p + diff(L_q2p,q3)*q3p);
L_dt_q3p=simplify(diff(L_q3p,q1)*q1p + diff(L_q3p,q2)*q2p + diff(L_q3p,q3)*q3p);

% Torques
Tor1=simplify(L_dt_q1p - L_q1);
Tor2=simplify(L_dt_q2p - L_q2);
Tor3=simplify(L_dt_q3p - L_q3);

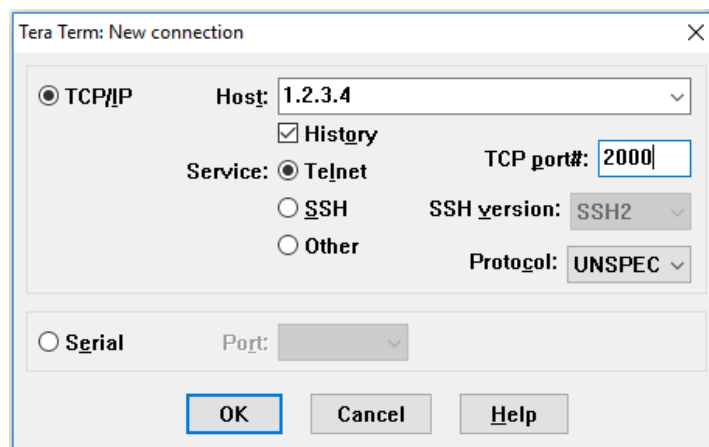
```

Apéndice C

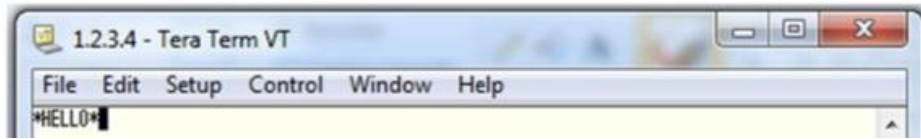
Configuración del módulo WiFly

El modulo wifi se alimenta a 3.3v, crea una red llamada wifly-EZX-f8, conectarse a esa red con la PC, se realiza la configuración en Tera Term de la manera siguiente.

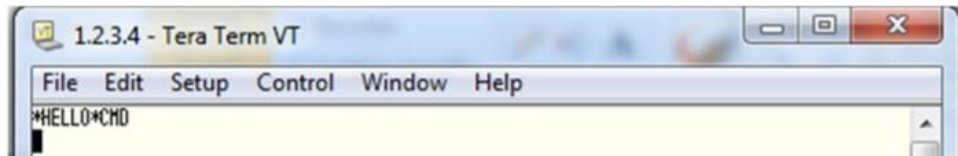
Abrir Tera Term, y aparece la siguiente pantalla:



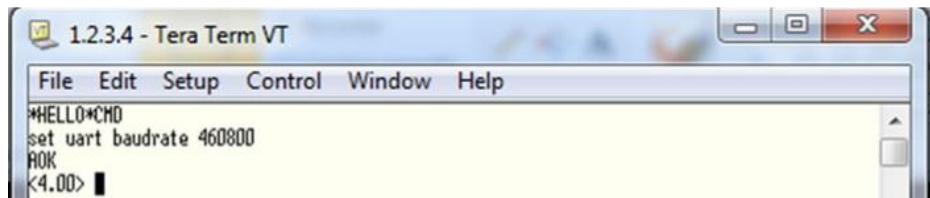
Seleccionar TCP/IP colocar la dirección 1.2.3.4 activar Telnet y en TCP port# colocar 2000 como se muestra en la figura, dar click en OK y se mostrará la siguiente pantalla:



Al ser realizada la conexión entre la PC y el módulo con éxito la pantalla muestra HELLO, escribir \$\$\$ para configurar el módulo, la ventana desplegara lo siguiente:

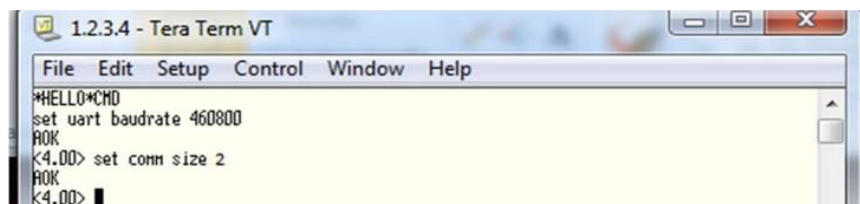


Se procederá a ingresar los comandos siguientes para configurar el módulo escribir comando set uart baudrate 460800 presionar tecla enter y el módulo responderá AOK, la respuesta indica que el comando se introdujo de forma correcta, como se muestra:



De esta forma se configuro la tasa de transmisión a 460800 baudios del módulo.

Se configura el número de bytes el cual es de 3 bytes, introducir el siguiente comando: set comm size 3 y presionar tecla enter, como se ve en la siguiente figura:



Si se desea cambiar el canal de transmisión del módulo se realiza con el siguiente comando: set wlan channel 7, y presionar enter, los canales disponibles son del 1 y 14. Para poder guardar la configuración escribir save, seguido de enter y reiniciar el módulo con el comando reboot seguido de enter, la ventana de Tera Term se cierra y el módulo queda correctamente configurado.

Apéndice D

Código en ensamblador que permite realizar el control de 5 grados de libertad.

```
MOVC.S R7
CTE.S 255
MOVC.S R8
CTE.S -255
RIO.S PT19 R1
RIO.S PT18 R2
RIO.S PT4 R3
SUB.S R1 R3 R1
MUL.S R2 R1 R0
C.LE.S R0 R7 L8
MOV.S R7 R0
JUMP 60
C.LE.S R0 R8 L4
JUMP 60
MOV.S R8 R0
WIO.S R0 PT0
RIO.S PT16 R1
RIO.S PT15 R2
RIO.S PT3 R3
SUB.S R1 R3 R1
MUL.S R2 R1 R0
C.LE.S R0 R7 L8
MOV.S R7 R0
JUMP 108
C.LE.S R0 R8 L4
JUMP 108
MOV.S R8 R0
WIO.S R0 PT1
RIO.S PT13 R1
RIO.S PT12 R2
RIO.S PT2 R3
SUB.S R1 R3 R1
MUL.S R2 R1 R0
C.LE.S R0 R7 L8
MOV.S R7 R0
JUMP 156
C.LE.S R0 R8 L4
JUMP 156
MOV.S R8 R0
```

```

WIO.S R0 PT2
RIO.S PT10 R1
RIO.S PT9 R2
RIO.S PT1 R3
SUB.S R1 R3 R1
MUL.S R2 R1 R0
C.LE.S R0 R7 L8
MOV.S R7 R0
JUMP 204
C.LE.S R0 R8 L4
JUMP 204
MOV.S R8 R0
WIO.S R0 PT3
RIO.S PT7 R1
RIO.S PT6 R2
RIO.S PT0 R3
SUB.S R1 R3 R1
MUL.S R2 R1 R0
C.LE.S R0 R7 L8
MOV.S R7 R0
JUMP 252
C.LE.S R0 R8 L4
JUMP 252
MOV.S R8 R0
WIO.S R0 PT4
DELAY
JUMP 16

```

Apéndice E

Código en Matlab para graficar.

```

format short; close all; clear all; clc;

q_dat=load('datos_m1.dat');

primer_columna=q_dat(:,1); %datos de error de posición y torque%
mt=length(primer_columna); %muestras totales%
m_p_t=mt/2; %muestras de posición o torque%
h=0.0025; %periodo de muestreo

pos_data=zeros(m_p_t,1); %variable para guardar datos de posición%
k=0;
for i=1:2:mt
    k=k+1;
    pos_data(k)=primer_columna(i); %datos de posición guardados%
    pos_data(k)=(pos_data(k)*360)/2770; %conversion a grados
end

%Se crea archivo con datos de error de posición y se guardan

```

```

max_x_pos=h*length(pos_data)-h;
x_pos = 0:h:max_x_pos;

datos_posicion=[x_pos; pos_data']; %pos_data es transpuesto si no da error%
fid=fopen('posicion_m1.dat','w');
fprintf(fid,'%f %f\r\n',datos_posicion);
fclose(fid);

tor_data=zeros(m_p_t,1); %variable para guardar datos de torque%
k=0;
for i=2:2:mt
    k=k+1;
tor_data(k)=primer_columna(i); %datos de torque guardados%
if (tor_data(k)>=255)
tor_data(k)=255;
elseif (tor_data(k)<=-255)
tor_data(k)=-255;
end
end
tor_data(k)=(tor_data(k)*0.16)/255;
end

%Se crea archivo con datos de torque y se guardan%
max_x_tor=h*length(tor_data)-h;
x_tor = 0:h:max_x_tor;

datos_torque=[x_tor; tor_data']; %tor_data es transpuesto si no da error%
fid=fopen('torque_m1.dat','w');
fprintf(fid,'%f %f\r\n',datos_torque);
fclose(fid);

% se cargan los archivos creados%
pos_dat=load('posicion_m1.dat');
tor_dat=load('torque_m1.dat');

%Se grafica%
figure
plot(x_pos,pos_data,'LineWidth',3);
title('Gráfica error de posicion motor 1')
legend('posicion motor 1');
xlabel('tiempo(seg)'); ylabel('q (grados)'); grid on;

figure
%plot(x_tor,tor_data,'LineWidth',3);
plot(tor_dat(:,1),tor_dat(:,2),'LineWidth',3);
title('Gráfica de torque motor 1')
legend('torque motor 1');
xlabel('tiempo(seg)'); ylabel('Torque (Nm)'); grid on;

posicion=primer_columna(1);
pos_r_data=zeros(m_p_t,1); %variable para guardar datos de posicion%
k=0;
for i=1:2:mt
    k=k+1;
posr_data(k)=-primer_columna(i)+posicion; %datos de posicion guardados%
posr_data(k)=(posr_data(k)*360)/2770;
end

figure
plot(x_pos,posr_data,'LineWidth',3);
title('Gráfica de posicion real motor 1')
legend('posicion motor 1');
xlabel('tiempo(seg)'); ylabel('q (grados)'); gridon;

```

Bibliografía

- [1] Giovanni Zepeda Arce “Diseño de una tarjeta con RAM y ROM Externas”, Tesis de maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla Diciembre 2017.
- [2] Fernando, Reyes Cortes. *Mecatrónica control y automatización*. s.l. : Alfaomega. Capitulo 1
- [3] Rosheim, Elling Mark. “Leonardo's Lost Robots” Springer, 2006
- [4] Paré, Ambroise. “Les oeuvres d'Ambroise Paré” Lyon : Chez la vefve de Claude Rigaud et Claude Obert, en rue Merciere, à la Fortune,1633.
- [5] S.C Jacobsen, E. K. Iversen D.F Knutti, R.T Johnson and K.B. Biggers “Design of the UTAH/MIT dextrous hand”, IEEE International Conference of Robotics and Automation., San Francisco, CA, USA, 1986.
- [6] J.K Salisbury and J. J. Craig "Articulated hands:Force control and kinematic issues" The International Journal of Robotics Research 1982.
- [7] Gray, Richard L, Vogl, A waygne y Mitchell, Adam W M. “*Anatomia de Gray para estudiantes*” 3a ed. España : Elsevier, 2015.
- [8] Frank H Netter “*Atlas de anatomía*” 4a edicion Elsevier Masson.
- [9] Henry Rouiere, André Delmas, “*Anatomia Humana*” 11a Edicion.
- [10] MARGARETA NORDIN; VICTOR FRANKEL “Biomecanica básica del Sistema Muscoesquelético“ McGraw-Hill.
- [11] Mallon WJ, Brown HR, Nunley JA, "Digital ranges of motion: normal values in young adults" Duke University Medical Center, Durham, N.C., USA,September 1991.
- [12] Subir Kumar Saha “Introduccion a la Robótica”, McGraw-Hill, 2008 pag 121.
- [13] Fernando Reyes Cortes, "*Robótica control de robots manipuladores*", alfa omega, 1er edición
- [14] Mark W Spong, Seth Hutchinson, and M Vydsiagar “*Robot Modelling and Control*” First Edition, John Wiley & Sons.
- [15] Vergara S., Vargas M.A., Paic G., Tejeda G., Fernandez A., León I., Reyes F., and Villasenor L. Characterization of the ACORDE scintillator counters using a PCI electronic card, volume 53 (2) 120-125. Revista Mexicana de Física, México, Abril 2007
- [16] Alberto de Jesús Lagunes limon, “*Diseño y construccion de un guante sensor de posiciones*” , Tesis de maestria, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Junio 2009.
- [17] Buckley, David. <http://www.davidbuckley.net/>. 01 de 05 de 2012. <http://www.davidbuckley.net/RS/HandResearch.htm> (último acceso: 29 de 09 de 2017)
- [18] Biologico, Instituto Quimico. <http://www.iqb.es/>. 14 de 02 de 2004. <http://www.iqb.es/cbasicas/anatomia/es004.htm> (último acceso: 30 de 09 de 2017).