



SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

“2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata”

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“CONSTRUCCIÓN DE UN JOYSTICK BASADO EN
UNA CELDA DE CARGA APLICADA EN EL CONTROL
DE FUERZA DE UN ROBOT PARALELO”.

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA
ELECTRÓNICA

PRESENTA:

Ing. Carlos Alberto Hernández Saldaña

DIRECTOR DE TESIS:

M.C. Blanca Estela González Sánchez

CODIRECTOR DE TESIS:

M.C. Ignacio Herrera Aguilar



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO.

JUNIO 2019



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

FECHA: 10/06/2019
DEPENDENCIA: POSGRADO
ASUNTO: Autorización de Impresión
OPCIÓN: I

C. CARLOS ALBERTO HERNANDEZ SALDAÑA
CANDIDATO A GRADO DE MAESTRO EN:
INGENIERIA ELECTRONICA

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

**"CONSTRUCCION DE UN JOYSTICK BASADO EN UNA CELDA DE CARGA
APLICADA EN EL CONTROL DE FUERZA DE UN ROBOT PARALELO".**

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E

[Handwritten Signature]
DR. RUBEN POSADA GOMEZ

JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO



Avenida Oriente 9 Núm. 852, Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz, México

Tel. 01 (272) 7 24 40 96, Fax. 01 (272) 7 25 17 28 e-mail: orizaba@itorizaba.edu.mx

www.orizaba.tecnm.mx





SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

FECHA : 30/05/2019

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

C. DR. RUBEN POSADA GOMEZ
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACION.
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C. :

CARLOS ALBERTO HERNANDEZ SALDAÑA

la cual lleva el título de:

"CONSTRUCCION DE UN JOYSTICK BASADO EN UNA CELDA DE CARGA APLICADA EN EL CONTROL DE FUERZA DE UN ROBOT PARALELO".

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : M.C. BLANCA ESTELA GONZALEZ SANCHEZ

SECRETARIO : DR. OSCAR OSVALDO SANDOVAL GONZALEZ

VOCAL : DR. JOSE DE JESUS AGUSTIN FLORES

VOCAL SUP. : DR. GERARDO AGUILA RODRIGUEZ

FIRMA

FIRMA

FIRMA

EGRESADO(A) DE LA MAESTRIA EN **INGENIERIA ELECTRONICA**

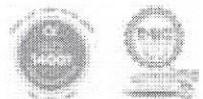
OPCION: I **Tesis**



Avenida Oriente 9 Núm. 852, Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz, México

Tel. 01 (272) 7 24 40 96, Fax. 01 (272) 7 25 17 28 e-mail: orizaba@itorizaba.edu.mx

www.orizaba.tecnm.mx



Agradecimientos

Primeramente, doy gracias a Dios, por iluminarme y darme la paciencia y sabiduría para poder llevar a cabo este trabajo de investigación. Agradezco a cada uno de los doctores que conforman el bloque de maestría en ingeniería electrónica (MIE) del área de posgrado del instituto tecnológico de Orizaba, por compartirme sus conocimientos acerca de la materia y por la dedicación de tiempo otorgado. Doy gracias al instituto tecnológico de Orizaba (ITO), a cada una de las personas que hacen de esta institución el alma mater del aprendizaje tecnológico. También agradezco al programa de consejo nacional de ciencia y tecnología (CONACYT) por mostrar interés para el desarrollo de profesionistas orgullosamente mexicanos. De igual manera doy mis agradecimientos a toda mi familia, por respaldarme no solamente en el grado de maestría, si no, desde el grado de ingeniería, siempre han sido mi aliento y mi guía para tomar buenas decisiones en la vida, en especial a mi madre y mi padre, porque sin ellos no hubiese sido posible realizar todos estos logros profesionales y de vida. Por último, pero sin duda con gran importancia en mi vida, doy gracias a ti mi esposa y a ti mi hija por ser ese respaldo, fuerza e inspiración para ser un profesionista, pero más aún un padre de familia, estoy realmente agradecido con Dios por darnos la dicha de ser padres en el transcurso de mis estudios de posgrado.

CONTENIDO

RESUMEN	9
ABSTRACT.....	10
Capítulo I ASPECTOS GENERALES DE LOS SENSORES DE FUERZA Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.1 PROBLEMÁTICA	11
1.2 REHABILITACIÓN EN MEXICO	12
1.3 HIPÓTESIS	14
1.4 OBJETIVO GENERAL.....	15
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.6 ESTRATEGIA DE PROCEDIMIENTO.....	16
1.7 AVANCES DE INGENIERIA MECATRONICA EN REHABILITACION	18
1.8 AVANCES TECNOLÓGICOS EN NEURORREHABILITACIÓN	19
1.9 ChARMin: UN ROBOT PARA LA REHABILITACION DE BRAZOS PEDIÁTRICOS.....	20
1.10 APLICACIONES DE ROBOTS EN REHABILITACION	28
1.10.1 MIT-MANUS	28
1.10.2 Extensión de MIT-MANUS.....	29
Capítulo II FUNDAMENTOS TEORICOS	33
2.1 ESTRUCTURA Y BIOMECANICA DE EXTREMIDAD SUPERIOR.....	33
2.1.1 Mano	33
2.1.2 Antebrazo	37
2.1.3 Brazo.....	38
2.1.4 Hombro	39
2.2 HIGIENE POSTURAL	41
2.2.1 DEFINICIÓN.....	41

2.3 FUERZA DE EXTREMIDAD SUPERIOR	43
2.3.1 Fuerza máxima de agarre	43
2.3.2 Medición de fuerza ejercida	44
2.3.3 ¿Qué utilizar para la medición de fuerza ejercida?	45
2.3.3.1 Celdas de carga	45
2.4 CARACTERISTICAS DEL SENSOR MECANICO DE FUERZA	46
2.4.1 Viga Cantiléver	46
2.4.2 Estado elástico y plástico de los materiales	47
2.4.2.1 Estado elástico	47
2.4.2.2 Estado plástico	48
2.5 ELECTRÓNICA EMPLEADA	49
2.5.1 Puente Wheatstone	49
2.5.1.1 Principio de funcionamiento del puente Wheatstone	50
2.5.1.2 Configuraciones del puente de Wheatstone	52
2.5.2 Galga extensiométrica	54
2.5.3 Acondicionamiento de señal	54
2.5.4 Amplificador de instrumentación	56
2.5.5 Psoc 5LP	57
2.5.6 Protocolos de comunicación	59
2.5.6.1 Bluetooth	59
2.5.6.2 i2c	60
Capítulo III DISEÑO Y SIMULACIÓN	62
3.1 SISTEMA DE SENSADO ELECTRÓNICO	62
3.1.1 Obtención de datos del sistema de sensado	69
3.2 SISTEMA MECÁNICO	74
3.3 DISEÑO Y MANUFACTURA DE LOS CIRCUITOS DE PUENTE WHEATSTONE	76

3.3.1 Circuito para medición de compresión digito-palmar	76
3.3.2 Circuito para medición de fuerza aplicada.....	79
3.3.3 Circuito de procesamiento de señal.....	84
Capítulo IV INTEGRACIÓN DEL JOYSTICK AL ROBOT PLANAR Y PRUEBAS FINALES	87
4.1 MANUFACTURA DEL JOYSTICK.....	87
4.2 INTEGRACION DE SENSORES DE DEFORMACION.....	88
4.2.1 Adecuación de la superficie	88
4.2.2 Adhesión de los sensores de deformación	89
4.2.2 Metodología de galgas extensiométricas.....	95
4.3 PRUEBAS POR SENSOR DE FUERZA	96
4.3.1 Caracterización del joystick.....	97
4.3.2 Delimitación de la zona de impacto	99
4.3.3 Pruebas de sensibilidad del sistema	100
4.3.4 Prueba de repetibilidad del sistema	102
4.3.5 Error del sistema	103
4.3.6 Estudio de deriva temporal (Drift)	106
4.4 INTEGRACION DEL JOYSTICK AL ROBOT PLANAR.....	108
CONCLUSIONES	110
TRABAJO FUTURO	110
REFERENCIAS.....	112
Apéndice A Diagramas 2D manufacturación del Joystick	115
Apéndice B Diagrama de flujo con programación de Psoc Creator	118

TABLA DE FIGURAS

Figura 1 Porcentaje de población mundial con alguna discapacidad [20].....	12
Figura 2 Proceso de metodología del trabajo de investigación.	17
Figura 3 Metodología de funcionamiento del joystick.....	17
Figura 4 Sensor de fuerza Tekscan A201-25 usado en [2].	19
Figura 5 Diseño del robot ChARMin siendo equipado por un niño de aprox. 13 años [4]	20
Figura 6 Estructura desarrollada para el robot ChARMin del tipo compensación pasiva de gravedad [4].	21
Figura 7 Entrenador de brazos desarrollado por HESSE et al. en 2003 [6]	22
Figura 8 Entrenador de brazos desarrollado por HESSE et al. en 2003 [7].	23
Figura 9 Sensor de pulso y oxígeno en la sangre utilizado al sistema mecatrónico [7].	23
Figura 10 Diagrama del brazo robótico para personas con discapacidad [8].	24
Figura 11 Desmontaje del sistema de transmisión Harmonic Drive [8].....	25
Figura 12 Tabla de características técnicas del Harmonic Drive [8].....	25
Figura 13 Sistema vibro táctil [9].....	26
Figura 14 Imágenes de sistema de rehabilitación 2D y 3D respectivamente	26
Figura 15 Esquema completo del dispositivo múltiple de medición de fuerzas.....	27
Figura 16 Versión comercial Robot-Planar MIT-MANUS en terapia dentro del hospital de rehabilitación de Burke(White Plains,NY) [15].....	29
Figura 17 Fotografía de la estación de trabajo de rehabilitación de muñeca en el hospital de rehabilitación de Burke [16].....	30
Figura 18 Robot ARMEO [17].	31
Figura 19 Grafica del Índice de Barthel pacientes robot ARMEO [17].	31
Figura 20 Grafica del índice de Barthel TERAPIA CONVENCIONAL [17].....	31
Figura 21 Estructura de la mano humana.	34
Figura 22 Biomecánica de la mano [21].	35
Figura 23 Presa digito palmar [22].	36
Figura 24 Presa palmar a plena mano o a plena palma [22].	36
Figura 25 Estructura ósea del antebrazo [22].	37
Figura 26 Movimientos de supinacion y pronación del antebrazo y palma [22].	38
Figura 27 Estructura ósea del brazo con músculos importantes [22].	39
Figura 28 Estructura ósea del hombro y músculos de apoyo [22].	40

Figura 29 Movimiento de abducción horizontal del hombro [22].	41
Figura 30 Movimiento de aducción horizontal del hombro [22].	41
Figura 31 Posición de sedestación ideal [24].	42
Figura 32 Diagrama del área máxima de trabajo en sedestación [24].	43
Figura 33 Diagrama de fuerza máxima de agarre [25].	43
Figura 34 Diferentes tipos de celdas de carga comerciales [28].	46
Figura 35 Configuración de una viga en Cantiléver [29].	46
Figura 36 Viga en Cantiléver con apoyo articulado [29].	47
Figura 37 Viga en Cantiléver empotrada [29].	47
Figura 38 Grafica de comportamiento elástico y plástico de los materiales [30].	48
Figura 39 Diagrama eléctrico de puente de Wheatstone [26].	49
Figura 40 Configuraciones del puente Wheatstone [26].	52
Figura 41 Galga extensiométrica [27].	54
Figura 42 Diagrama básico de la instrumentación de señal de un puente Wheatstone [32].	55
Figura 43 Circuito de un amplificador de instrumentación con ganancia regulable [33].	57
Figura 44 Microcontrolador Psoc 5 LP de Cypress, usado en el sistema.	58
Figura 45 Diagrama del módulo de programación del Psoc 5 LP [34].	59
Figura 46 Módulo HC-05 de comunicación bluetooth usado.	60
Figura 47 Módulo con integrado PCF8574AT de comunicación i2c usado.	60
Figura 48 Diagrama de puente de Wheatstone en Multisim.	63
Figura 49 Diagrama de fuente de 5 volts con corriente ajustable.	63
Figura 50 Diseño de los circuitos en Ultiboard.	64
Figura 51 Gráficas de la variación de resistencia del sensor a diferentes corrientes de consumo.	65
Figura 52 Gráficas de consumo de corriente 10mA.	65
Figura 53 Gráficas de consumo de corriente 5mA.	66
Figura 54 Gráficas de consumo de corriente 1mA.	66
Figura 55 Circuito eléctrico del módulo de calibración.	67
Figura 56 Diseño de PCB en Ultiboard del amplificador y escalador de voltaje.	68
Figura 57 Prueba de funcionamiento PCB del amplificador y escalador.	68
Figura 58 Clúster para módulo de calibración.	69
Figura 59 Modulo de calibración con módulo de tensión.	70
Figura 60 Gráfica de salida de voltaje del módulo ajustado a 25 KgF.	70

Figura 61 Gráfica de salida de voltaje escalado del módulo ajustado a 25 KgF.....	71
Figura 62 Respuestas de voltajes del módulo a 5v, 3v y 1v de span.....	72
Figura 63 Gráfica de repetibilidad con span de 5v.....	72
Figura 64 Gráfica de repetibilidad con span de 3v.....	73
Figura 65 Gráfica de repetibilidad con span de 1v.....	73
Figura 66 Simulación de deformación en Fusión 360 a) En reposo b) Bajo estrés mecánico.....	74
Figura 67 Sensor de fuerza aplicada simulado en Fusion 360, a) En reposo b) Bajo estrés mecánico.	75
Figura 68 Joystick completo en Fusion 360, a) Vista frontal b) Vista trasera.	76
Figura 69 Diseño puente de Wheatstone.	77
Figura 70 Diseño pcb puente de Wheatstone en Ultiboard.	77
Figura 71 Soldado pcb puente de Wheatstone.....	78
Figura 72 Adhesión de circuito puente de Wheatstone a estructura mecánica.....	78
Figura 73 Diseño de 4 puentes de Wheatstone en Multisim.....	79
Figura 74 Cable plano flexible.	80
Figura 75 Placa soldada de 4 puentes de Wheatstone.	80
Figura 76 Pcb 4 puentes de Wheatstone adheridas a la estructura mecánica.....	81
Figura 77 Sensor de fuerza aplicada armado.....	81
Figura 78 Diseño de placa para los cinco sensores de fuerza en Ultiboard.	82
Figura 79 Manufactura del pcd de sensores de fuerza.....	82
Figura 80 Integración del pcb al Joystick.....	83
Figura 81 Cable AWG 30.....	84
Figura 82 Circuito eléctrico de pcb para el microcontrolador.	84
Figura 83 Diseño del pcb del microcontrolador en Ultiboard.....	85
Figura 84 Pcb manufacturado con Pso5 5LP y modulo HC-05.	85
Figura 85 Joystick manufacturado en aluminio 7071, a) Vista frontal b) Vista inferior.....	87
Figura 86 a) Pulido, b) Desbaste, c) Lijado de sensor de fuerza digito palmar.	88
Figura 87 Puntos de prueba de estrés sensor de fuerza digito palmar.	89
Figura 88 Gráfica posición de galga en sensor de fuerza digito palmar.....	90
Figura 89 Ubicación de la zona de adhesión de galga extensiométrica.....	91
Figura 90 Soldado de galga extensiométrica adherida.	92
Figura 93 Grafica de posición galga sensor de fuerza aplicada.....	94

Figura 95 Sensor de fuerza aplicada terminado.....	95
Figura 96 Mediciones de funcionamiento del joystick.....	97
Figura 97 Dinamómetro Mark-10 Series 5 Modelo M5-50.....	98
Figura 98 Prensa mecánica.....	98
Figura 99 Pruebas de fuerza máxima de agarre.....	99
Figura 100 Aplicación de fuerza por medio de prensa mecánica en el sensor de fuerza digito palmar.	100
Figura 101 Gráfica de prueba de sensibilidad del sistema.....	101
Figura 102 Pruebas de repetibilidad en el joystick.	102
Figura 103 Gráfica de repetibilidad del sistema, con desviación de señales.	103
Figura 104 Multímetro digital de alta resolución HP34401a	106
Figura 105 Cable de datos USB/GPIB Agilent Technologies 82357A.	106
Figura 106 Programación visual en LabVIEW para lectura de datos.....	107
Figura 107 Gráfica de deriva instrumental del sistema durante 5 min.....	107
Figura 108 Joystick integrado al robot planar.....	108
Figura 109 Fuerzas generadas sobre el joystick.....	109

RESUMEN

Dentro de este trabajo de investigación, se propone diseñar, fabricar y crear una celda de carga para la implementación en un robot del tipo robot-planar usado para aplicaciones de rehabilitación de extremidades superiores, la celda es ubicada en el agarre del usuario con la finalidad de otorgar información sobre la medición de fuerza aplicada y fuerza digito palmar que genere el paciente durante el uso del módulo robótico.

La celda carga que se utilizará para la medición de fuerza contará con galgas extensiométricas colocadas de una manera estratégica para obtener el valor real de la fuerza que se ejercerá sobre el mecanismo.

Inicialmente el robot fue construido para la rehabilitación de extremidades superiores por medio de ejercicios guiados a través de un software que muestra al paciente el camino a recorrer y corrigiendo la trayectoria del paciente a través de un guante con motores inerciales; con el prototipo propuesto en este trabajo de investigación se busca analizar el comportamiento del usuario al iniciar con la terapia del robot basado en la fuerza que el paciente ejerce sobre la maquinaria a la hora de ejecutar una sesión.

ABSTRACT

Within this research work, it is proposed to design, manufacture and create a load cell for the implementation in a robot of the robot-planar type used for applications of rehabilitation of upper extremities, the cell is located in the grip of the user with the purpose to provide information on the measurement of force applied and palmar digit force generated by the patient during the use of the robotic module.

The load cell that will be used for force measurement will have strain gauges placed in a strategic way to obtain the real value of the force that will be exerted on the mechanism. Initially the robot was built for the rehabilitation of upper extremities through exercises guided through a software that shows the patient the way to go and correcting the trajectory of the patient through a glove with inertial motors; With the prototype proposed in this research work, we seek to analyze user behavior when starting with robot therapy based on the force that the patient exerts on the machinery when executing a session.

Capítulo I ASPECTOS GENERALES DE LOS SENSORES DE FUERZA Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este capítulo inicial se plantea e identifica el tema del trabajo de investigación delimitado por una serie de hipótesis, objetivos generales y específicos, la problemática que impulso al desarrollo de este trabajo de tesis, entre otros. Cabe mencionar que también se obtiene un primer vistazo a investigaciones, artículos, publicaciones, etc., que desarrollan una similitud con el tema central de este trabajo de investigación.

Dentro del área de la rehabilitación se encuentran demasiadas investigaciones con un producto final del tipo mecatrónico, electrónico y robótico para asistir a esta ciencia. Los valores de referencia de la magnitud de fuerza que se genera durante un proceso de rehabilitación de un paciente en terapia, es un dato de suma importancia para el fisioterapeuta que otorga y a la vez evalúa el avance de la terapia.[1]

1.1 PROBLEMÁTICA

La problemática principal que motivó a la propuesta de la realización de esta tesis está centrada en que los robots dedicados a la rehabilitación que han sido presentado en congresos, artículos, tesis, revistas etc., muestran una maquina capaz de efectuar su trabajo sin ningún problema, disminuyendo el tiempo de la terapia y la programación de varias sesiones, pero a la hora que el fisioterapeuta busca otorgar un diagnóstico sobre el comportamiento del paciente interactuando con estas máquinas, se ve limitado ya que los robots solo realizan el servicio de ejecutar la terapia sin mostrar gráficos, resultados y mediciones realizadas de la sesión que en ese preciso momento se haya ejecutado y omite valores tan importantes como la fuerza que el paciente ejerce sobre la maquina a la hora de interactuar con ella. El prototipo propuesto en esta tesis busca otorgar la medición de fuerza real para que así el fisioterapeuta logre evaluar y otorgar un diagnóstico de la sesión del paciente con la máquina.

Optimización o mejora: Dentro de la optimización del robot para generar una solución de la problemática causa raíz del trabajo presentado, se propone diseñar y fabricar una celda de carga configurada como un joystick que será instalado en el agarre del robot, el cual por medio de galgas extensiométricas, al momento de deformarse por el movimiento que imprima el usuario en el mecanismo, se obtendrá la medida de las fuerzas ejercidas y así se otorgara al fisioterapeuta los gráficos de medidas de la sesión del paciente.

Un segundo detonante de la problemática central es que la celda de carga con que se contaba en el momento no cumplía con las especificaciones necesarias como el rango de fuerzas de trabajo, la dimensión de la estructura mecánica, la geometría para llevar a cabo la adaptación al robot paralelo; se requería como tal un sensor de fuerza que cumpliera con todas esas características, además de que los valores de salida del sistema sean valores confiables.

1.2 REHABILITACIÓN EN MEXICO

De acuerdo con la organización mundial de la salud (OMS) más de mil millones de personas, o sea, un 15% de la población mundial, padece alguna forma de discapacidad y requieren de algún tipo de rehabilitación asistida para su recuperación, de la cual un 3% es dedicado a personas que requieren rehabilitación de extremidades superiores, según datos del primer informe mundial sobre la discapacidad de la organización mundial de la salud (OMS) realizado en enero 2018[20], cuya información se aprecia en la figura 1. Por lo tanto, el tener una herramienta de trabajo que sea de gran apoyo a los fisioterapeutas para otorgar diagnósticos precisos a la gran demanda de consultas para terapias de rehabilitación es sumamente necesaria.

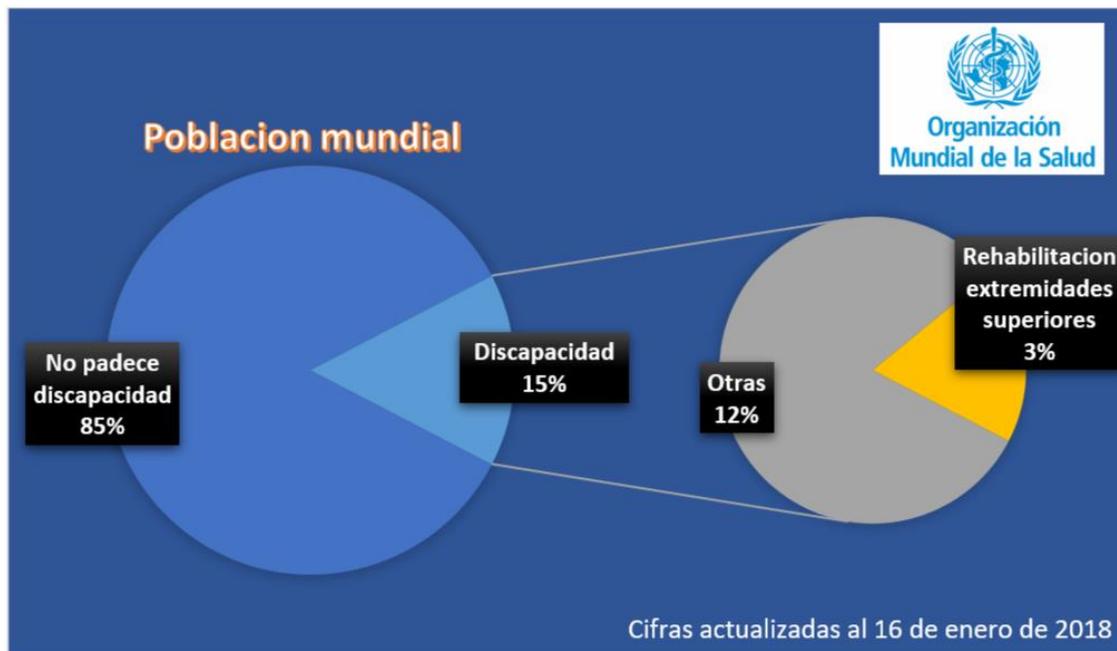


Figura 1 Porcentaje de población mundial con alguna discapacidad [20].

Con el método convencional, el fisioterapeuta ejerce una consulta que abarca desde tomar apuntes sobre el historial de sus pacientes y posteriormente aplicar ejercicios repetitivos sobre la zona

afectada o la zona a rehabilitar; al momento de que el fisioterapeuta efectúa la rehabilitación no tienen conocimiento de datos importantes del paciente por ejemplo, sus signos vitales para observar si es que se está sometiendo a algún tipo de dolor al paciente o solo para observar su comportamiento durante la rehabilitación, otros datos importantes que desconoce el fisioterapeuta de su paciente durante la sesión es la fuerza que ejerce el usuario al momento de someterle a pruebas, teniendo en cuenta que la fuerza que el paciente logra ejercer para realizar algún esfuerzo o trabajo está relacionado directamente con el estado físico del usuario, por lo tanto el tener un sistema robótico como el que se propone en este trabajo de investigación, se vuelve una necesidad para el área de la fisioterapia debido a que el joystick logra otorgar datos importantes generados durante una rehabilitación de algún paciente y comportarse como una herramienta totalmente completa, ya que disminuirá el trabajo de asistencia por parte del fisioterapeuta logrando acortar el tiempo de rehabilitación del paciente y más que nada, generar un seguimiento e historial de la recuperación de los pacientes, contado con datos desde la primera sesión de rehabilitación hasta la última sesión de recuperación total.

Los centros de rehabilitación situados en México no llegan a contar con los recursos suficientes para adquirir las maquinarias necesarias para una rehabilitación completa por lo tanto el elaborar un robot a un coste considerablemente bajo y que se comporte a la altura de máquinas adquiridas por proveedores con altos precios suele ser una opción de gran ayuda y es allí donde entra el robot planar siendo una opción de bajo costo con la capacidad para el uso dentro de centros de rehabilitación y más que nada siendo una mano derecha al momento de otorgar mediciones de fuerzas de los pacientes.

1.3 HIPÓTESIS

Tomando en cuenta los resultados previos relacionados con el diseño y manufactura de una celda de carga para medir fuerzas multiaxiales, y un conjunto de restricciones mecánicas para el robot planar de configuración paralela, es posible diseñar y manufacturar un joystick con la capacidad para medir fuerza digito palmar y fuerza aplicada sobre el joystick, que se adapte de forma natural al robot ya existente.

1.4 OBJETIVO GENERAL

Implementar un sistema mecatrónico con un agarre que cuente con galgas extensiométricas para la medición de fuerzas ejercidas por los usuarios de un robot-planar de configuración paralela.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Diseñar y simular una celda de carga capaz de medir fuerza digito palmar y fuerza aplicada
- ✓ Manufacturar una celda de carga e integrar sensores de deformación a ella
- ✓ Realizar sesiones de prueba de la celda, así como su llevar a cabo su calibración
- ✓ Realizar la integración del joystick al robot planar.

1.6 ESTRATEGIA DE PROCEDIMIENTO

El presente estudio hace uso de una investigación de método hipotético-deductivo[2], el cual se enfoca en resolver la problemática de desarrollar un conjunto de celdas de carga integradas y configuradas como un joystick, para medir la fuerza generada para manipular un robot del tipo planar. El cual se desarrollará partiendo de la hipótesis anteriormente propuesta y llevando a cabo una investigación del tipo cualitativa para obtener datos y referencias acerca de los valores nominales de fuerza de la extremidad superior, generando las restricciones iniciales como lo son el rango de fuerza de trabajo del joystick, dimensiones que respeten la antropometría de la mano humana y la postura corporal que toma el usuario al interactuar con el robot planar y por último el diseño del joystick para llevar a cabo un correcto ensamble con el robot planar.

A posteriori se continua con una investigación del tipo cualitativa dentro del área de la extensiométrica para obtener datos acerca de la geometría necesaria para la interpretación de fuerza por medio de sensores de fuerza y tomar una decisión acerca de la geometría a considerar, se realizan diseños y simulaciones con programas CAD para comenzar con una investigación del tipo cuantitativa donde se obtienen graficas con valores del estrés de la geometría con diferentes materiales y poder así determinar el material de construcción del joystick así como sus puntos de mayor estrés.

Se continua con la manufactura y la integración de los sensores de fuerza al joystick. Se realiza una investigación del tipo cuantitativa, en el cual es sometido a pruebas experimentales donde se aplican fuerzas conocidas, por medio de métodos numéricos y graficas con los valores de fuerza, se logra interpretar y hacer un replanteamiento de la hipótesis inicial. En la figura 2 se muestra un esquema con cada una de las etapas que da origen a la metodología del proyecto, mostrando en la sección de pruebas experimentales el enlace a otro proceso “Programación Psoc 5LP” el cual consiste en la programación y manufactura del circuito de control que realiza la adquisición de datos y la transmisión de datos a la interfaz gráfica.

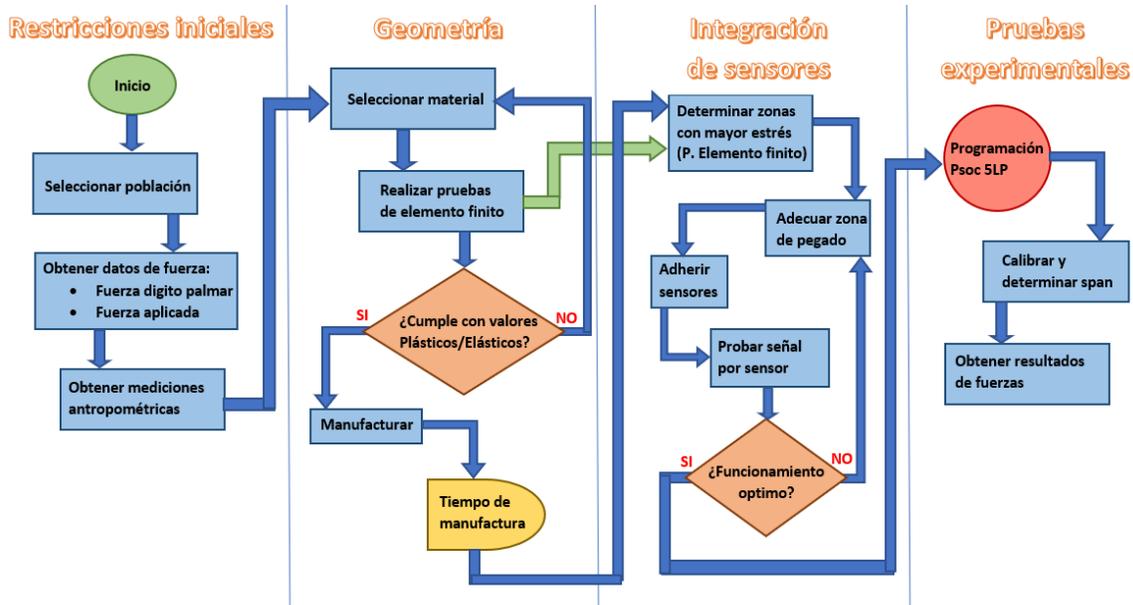


Figura 2 Proceso de metodología del trabajo de investigación.

La metodología del funcionamiento del programa del microcontrolador se muestra en la figura 3, en la cual se observa que se requiere una variable física inicial que es la fuerza detectada por los sensores de deformación y circuitos electrónicos, luego, es amplificada y enviada al microcontrolador en el cual las señales son situadas en un multiplexor que envía las señales conmutadas a un escalador de voltaje para calcular el span de la señal, luego, es enviado a un convertidor analógico-digital, por último se crean dos protocolos de comunicación uno dado en i2c y el otro por bluetooth para interpretar los valores en las interfaces graficas correspondientes.

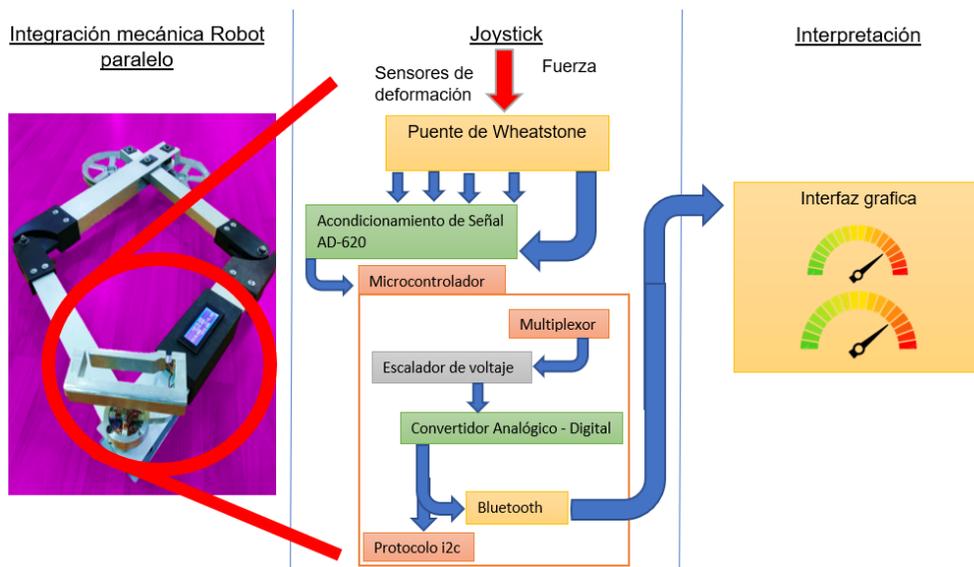


Figura 3 Metodología de funcionamiento del joystick.

1.7 AVANCES DE INGENIERIA MECATRONICA EN REHABILITACION

Hoy en día existen un sin fin de proyectos, artículos, tesis etc. enfocados a la rehabilitación de personas con capacidades diferentes por medio de estructuras mecatrónicas, exoesqueletos al igual que robots, todos ellos dando un aporte al área de la fisioterapia visto desde una perspectiva tecnológica, pero en especial en el área de la electrónica, por lo que a continuación se enuncian algunos artículos que comparten una similitud debido a que son prototipos dedicados a la medición de fuerzas y la rehabilitación de extremidades superiores.

La potencia que podemos llegar a generar con un robot manejado dentro de centros de estudio o clínicas ya sean de rehabilitación o de cualquier centro de salud, tiende a crear la fuerza necesaria para realizar el trabajo sin ningún problema y en algunas ocasiones solo es usado tres cuartas partes o hasta la mitad de su potencia real de la maquina dejando al usuario o al investigador con el interés de conocer la utilización de estas máquinas con potencias fuera de lo común, tal cual se muestra en el artículo [3], el cual expone la adaptación de sensores de fuerza a un robot industrial llamado PUMA 560 con el que se realizaron movimientos acomodaticios para obtener valores de la trayectoria nominal programada en función de las fuerzas con relación posición/velocidad.

Como resultado de esta tesis citada, se logra concluir que es posible utilizar robots con una potencia considerablemente alta en tareas que se necesite mucha precisión, por lo que en el tema de suministro de potencia para el robot de esta tesis no será de mucha relevancia.

Existe una gran relación entre el robot-planar a implementar en este trabajo y el sector salud orientado a la rehabilitación, ya que este prototipo puede llegar a aplicarse en rehabilitaciones de extremidades superiores, por lo tanto, se citan algunos proyectos que compartan esta similitud.

Para la medición de fuerzas que puede llegar a generar el usuario durante la manipulación del robot-planar, es usado en una extremidad, una estructura mecánica con galgas adicionadas en lugares estratégicos para obtener el valor de las fuerzas ejercidas en el dispositivo. Para llevar a cabo la realización de un instrumento capaz de obtener estos valores es necesario realizar diversos estudios los que se presentan en el artículo [4] en el cual se desarrolla un sistema mecatrónico capaz de llevar a cabo la medición de fuerza al igual que la velocidad para romper el tejido de una pechuga de pollo realizado con un robot del tipo escalpelo para simular intervenciones quirúrgicas. Dentro la electrónica que se aplica al sensor de fuerza (figura 4) usado en el artículo citado, fue necesario el acondicionamiento de las señales ocupadas, por ejemplo, el corrimiento de fuerza que mide el

sensor la cual es de cero a once kilogramos con una señal de salida de cero a cinco volts y convirtiendo la señal de analógica a digital para pasar posteriormente a la adquisición de datos hacia un ordenador.

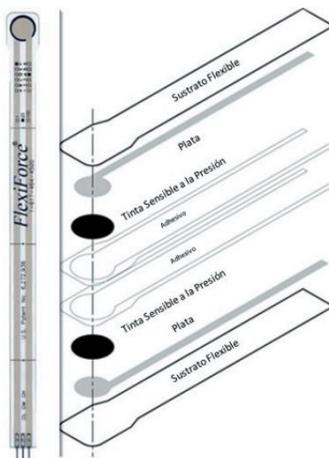


Figura 4 Sensor de fuerza Tekscan A201-25 usado en [2].

1.8 AVANCES TECNOLÓGICOS EN NEURORREHABILITACIÓN

En este artículo citado tenemos una investigación evaluada por la División de Rehabilitación Neurológica dentro del Instituto Nacional de Rehabilitación (INR) [18] y el programa de rehabilitación APORTA con instalaciones en Torreón, Coahuila [19], ubicado en la delegación de Tlalpan en la CDMX que profundiza su estudio en los progresos que se han obtenido hasta ahora dentro de la neurorrehabilitación, recalando los inicios de este tipo de rehabilitación a comienzos de los años 60; cómo se puede notar el artículo redacta que la neurorrehabilitación ha dado un giro completo estas dos últimas décadas con la incorporación de dispositivos electrónicos al igual que la elaboración de robots enfocados a corregir y generar un cambio dentro del mundo de la fisioterapia, por último el artículo muestra que las tecnologías enfocadas a la neurorrehabilitación aprovechan las estructuras neuro-musculares funcionales conservadas en los pacientes con trastornos, para que estas funciones compensen o re-aprendan las tareas que antes solían realizar las zonas dañadas y así crear una mejora notable del tipo sensorio-motora [5].

Es necesario mencionar que existen varias estructuras robóticas utilizadas en la rehabilitación de extremidades superiores que no siguen un patrón en su diseño mecánico presentando una variedad en sus estructuras pero que apuntan a un mismo objetivo en común. A continuación, se muestran diversos artículos que cumplen con estas características:

1.9 ChARMin: UN ROBOT PARA LA REHABILITACION DE BRAZOS PEDIÁTRICOS

En este artículo se vuelve a recalcar el aumento de la presencia de robots enfocados en la recuperación motora con personas con algún tipo de deterioro neurológico, pero usa como pieza clave, la falta de robots para la recuperación de extremidades superiores en el área de pediatría (pacientes jóvenes) que es ahí el área en que se enfoca su prototipo.

El diseño desarrollado en el artículo consiste en un robot de brazo tomando la estructura del tipo exoesqueleto llamado ChARMin, el cual fue puesto en disputa en el International Conference on Robotics and Automation (ICRA) en Karlsruhe, Alemania del 6 al 10 de mayo del 2013. En la figura 5 se muestra un esquema del robot y el cual presenta cuatro grados de libertad para guiar y asistir los movimientos hombro-codo. Adicionalmente al robot le es implementada una estructura mecánica con sensores de fuerza de seis grados de libertad, esto para confirmar un funcionamiento seguro ya que hablamos de pacientes jóvenes [6].

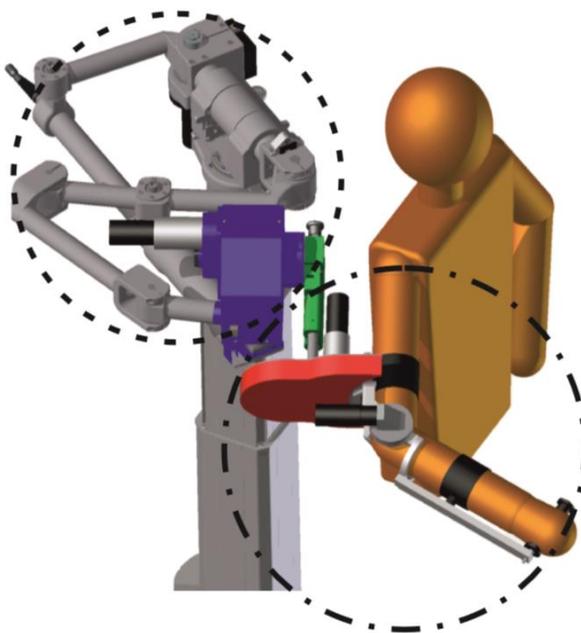


Figura 5 Diseño del robot ChARMin siendo equipado por un niño de aprox. 13 años [4]

Algo que logra captar la atención de los diseñadores que trabajan con robots dedicados a la recuperación motora de pacientes, es que ChARMin cuenta con su compensación de gravedad del robot mostrado en la figura 6, el artículo respalda que este sistema es capaz de mantener en una posición firme y segura del robot, aunque llegue a existir una pérdida de potencia en el sistema lo cual lo hace seguro para el usuario.

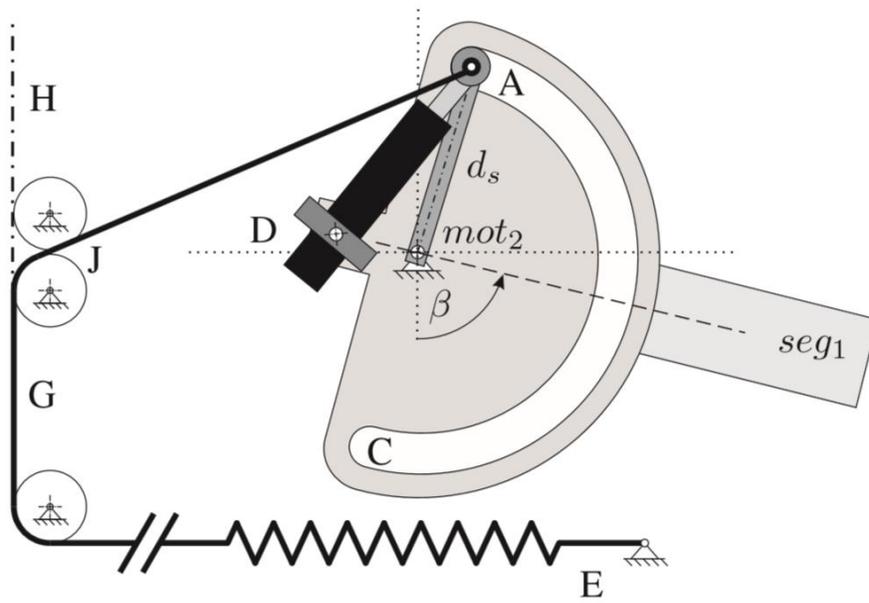


Figura 6 Estructura desarrollada para el robot ChARMin del tipo compensación pasiva de gravedad [4].

Dentro de la rehabilitación tanto a nivel neuronal como motriz de los pacientes se guardan casos específicos para cada uno de ellos, esto quiere decir que no todos los pacientes presentaran el mismo nivel de intervención del robot que los asista en su terapia, es por ello, que se necesita de un sistema el cual sea capaz de adaptarse a las necesidades de cada uno de los pacientes, y este tipo de inteligencia fue desarrollado en el proyecto de “Robot biocooperativo con modulación háptica para tareas de neurorrehabilitación de los Miembros superiores” [7] desarrollado por centro tecnológico fundación CARTIF, en la división de ingeniería biomédica en Valladolid. Lo que presenta este artículo, es la solución a lo antes mencionado a partir de análisis previos efectuados a los pacientes para otorgar el grado de asistencia que el robot de rehabilitación debe proporcionar.

Como logramos notar hay una similitud en todos los artículos que se han mostrado previamente, y esta relación está situada en el paciente, ya sea que el paciente presente una corta, media o larga edad, el siempre será el objetivo principal dentro de los proyectos que se desarrollan dentro de la electrónica en específico de la robótica aplicada a la recuperación motriz.

Otra similitud que guardan los robots que son enfocados al área de interés de la rehabilitación, está dado por la rama de la fisioterapia, la cual propone como método de recuperación de personas con trastornos neurológicos, el cual es la repetitividad de movimientos físicos en los pacientes produciendo una mejora en la fuerza muscular y la coordinación del movimiento y que mejor que efectuarlos en tareas que hagan las sesiones más entretenidas para los usuarios y aceleren el tiempo

de rehabilitación que se lleva una recuperación con una terapia con el método convencional. Este método de recuperación y la ventaja del tiempo en efectuar la rehabilitación están ejemplificados en el artículo [8], proporcionando una información clara y general de los dispositivos existentes para la terapia del movimiento pero más que nada enfocado en extremidades superiores del cuerpo humano. Uno de los ejemplos que ocupa este artículo está mostrado en la figura 7.

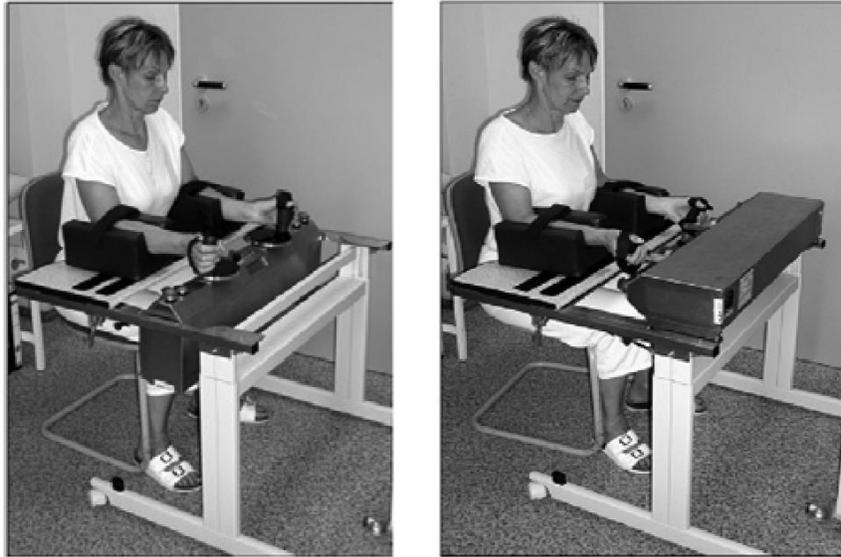


Figura 7 Entrenador de brazos desarrollado por HESSE et al. en 2003 [6]

Es necesario mencionar que en ocasiones la parálisis que pueden llegar a presentar los pacientes puede denominarse como parálisis parcial o en extremas ocasiones parálisis total, el cual se vuelve otro factor más de suma importancia a la hora de proponer el desarrollo de un robot para efectuar una solución, en el artículo [9] se presenta un sistema mecatrónico destinado a efectuar una solución al problema ya planteado. Basándose en el grado de la parálisis del paciente y en el efecto psicológico que este desarrolla en la persona durante una lesión de este tipo, el artículo propone el diseño de un sistema mecatrónico el cual será sometido a prácticas experimentales para evitar que la lesión en el usuario sea del tipo degenerativa y se complique con el paso del tiempo.

El robot que propone el artículo [9] soporta un peso aproximado de 70 kg, la estructura del sistema se muestra en la figura 8, esto debido a que los pacientes en recuperación pesan por debajo del promedio del peso habitual, ya que su volumen de masa muscular disminuye y esto quita peso; por otro lado el sistema mecatrónico que propone el artículo es usado dentro del agua, manteniendo al paciente sentado en una posición cómoda dentro del ambiente húmedo y aplica los movimientos que usualmente se emplean en la terapias.

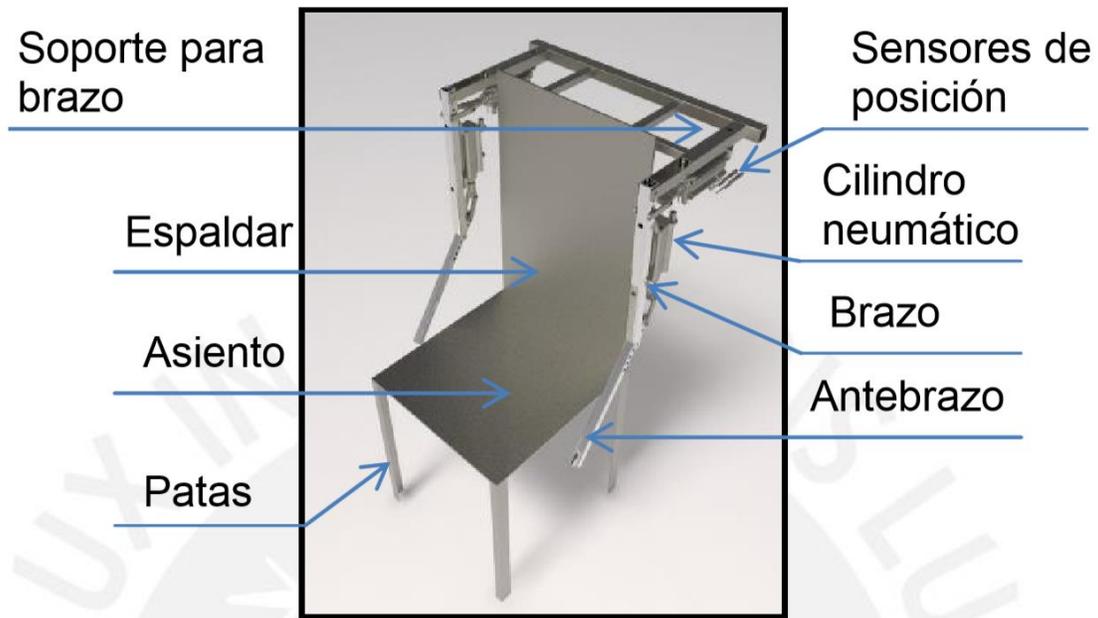


Figura 8 Entrenador de brazos desarrollado por HESSE et al. en 2003 [7].

El sistema cuenta con un sensor de pulso y oxígeno (SpO2) el cual es enlazado a un microcontrolador Arduino para la adquisición de datos y así mostrar al especialista información de la terapia sobre si está o no cansado el usuario y de igual manera es utilizado para medir los signos vitales del paciente, el sensor se muestra a continuación en la figura 9.



Figura 9 Sensor de pulso y oxígeno en la sangre utilizado al sistema mecatrónico [7].

Dentro de la fisioterapia existe una gran demanda de pacientes con habilidades diferentes al igual que diferentes historias detrás de sus lesiones musculares o neurológicas, existen pacientes que

tienen la desventaja de tener un problema motriz desde la infancia o desafortunadamente desde su nacimiento y pacientes con algún tipo de enfermedad crónica la cual los debilita hasta llegar al punto de necesitar ayuda externa para la recuperación y la reincorporación de sus actividades diarias. Es considerable decir que cada uno de ellos responderá de una forma diferente al proceso de la rehabilitación, hay pacientes que cuentan con varios problemas motrices, en el artículo [10] se muestra a un paciente diagnosticado con el síndrome de flaim arm o síndrome de diplejía braquial amiotrofia, por lo tanto el paciente se presenta con una atrofia muscular progresiva (AMP), esta enfermedad en particular se caracteriza por la falta de tono muscular en las extremidades superiores, por lo tanto el prototipo electrónico desarrollado por el artículo citado fue elaborado con la finalidad de implantarse en el paciente y así permitirlo realizar las funciones más básicas de su vida cotidiana, en la figura 10 se muestra una vista del brazo robot del articulo ya mencionado con una tabla con las descripción de sus partes mecánicas.

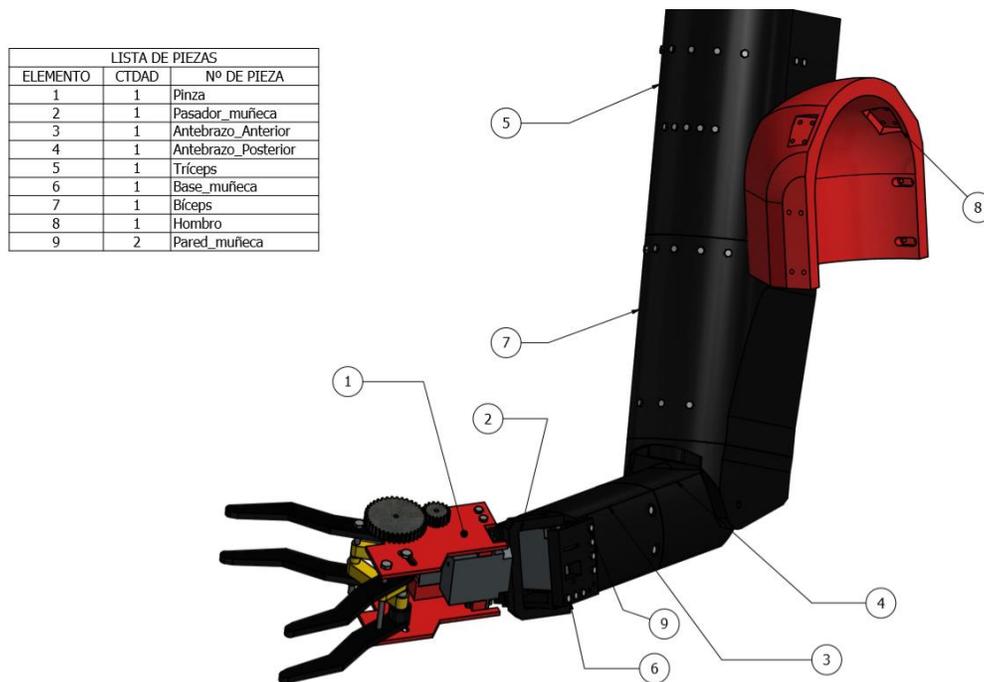


Figura 10 Diagrama del brazo robótico para personas con discapacidad [8].

Para la fabricación del brazo robótico se emplearon varios servomotores con una alta capacidad de carga debida al trabajo que realizarían y moto-reductores de corriente directa con alta potencia de torsión. Un dispositivo que sobresale en la construcción del brazo robótico es el Harmonic Drive, figura 11, el cual consiste en un sistema de transmisión de potencia que puede ser capaz de llegar a generar relaciones de transmisión muy elevadas, disminuyendo el problema que se genera por el

peso del brazo del paciente, ya que logra sostener la extremidad superior sin ningún problema; en la figura 12, se muestran los valores nominales y especificaciones técnicas del sistema de transmisión.

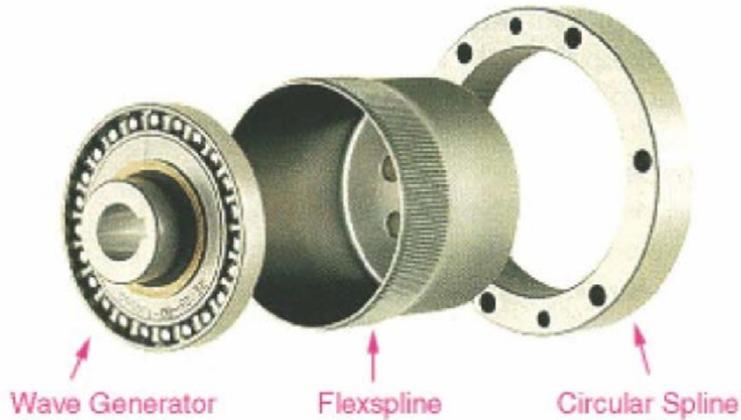


Figura 11 Desmontaje del sistema de transmisión Harmonic Drive [8].

Tipo	50 L70C
Relación de reducción	70
Torque	6 NM
Torque max.	16 N
Eficiencia	Ca. 61 %
Velocidad nominal de entrada	3000 rpm
Velocidad máxima de entrada	4000 rpm
Peso	149 g

Figura 12 Tabla de características técnicas del Harmonic Drive [8]

El robot tipo planar contiene un guante equipado (figura 13) con motores inerciales los cuales indican por medio de vibración al paciente cuando este se ha desviado de la ruta de la imagen que se le pide dibujar. Esta adaptación se logra apreciar en el artículo [11] en el cual la idea principal es proporcionarle estímulos apticos al paciente y al mismo tiempo el sistema obtiene información de las posiciones que realizan los pacientes durante su rehabilitación.



Figura 13 Sistema vibro táctil [9]

El sistema completo del robot-planar anterior cuenta con dos pantallas, una dedicada para mostrar al usuario la ruta que debe seguir y otra dedicada hacia el fisioterapia para cambiar valores de la simulación de la terapia, teniendo dos tipos de estimaciones muy importantes las cuales son la estimación física por medio del robot y la estimación visual, el usar este tipo de métodos para la estimulación del paciente suele ser una manera muy entretenida y eficaz según el artículo [12] en el cual se ejecutaron pruebas para la rehabilitación de extremidades superiores por medio de laberintos virtuales 2D y 3D mostrados en la figura 14 y promueve al estímulo visual como una opción más para la rehabilitación.

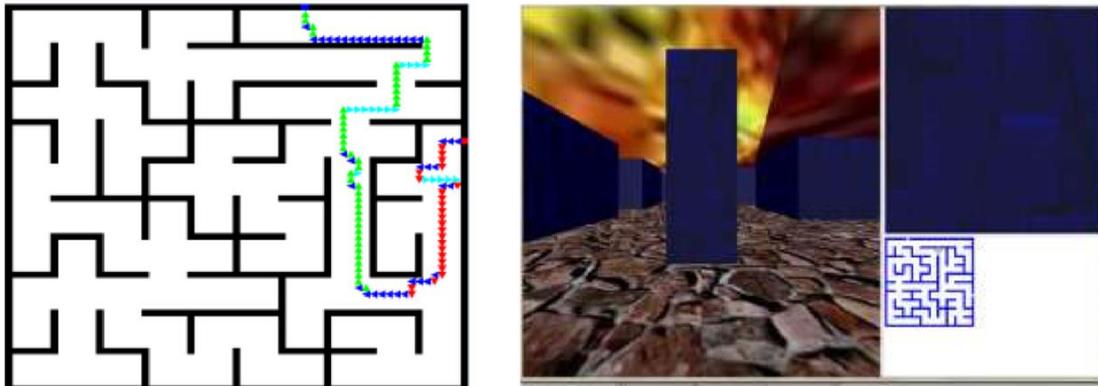


Figura 14 Imágenes de sistema de rehabilitación 2D y 3D respectivamente

Dentro de los resultados de estos trabajos citados, en ninguno logramos apreciar la medida del comportamiento del usuario trabajando con sus prototipos finales o que el prototipo sea capaz de otorgar información como signos vitales etc., por lo cual, es necesario decir que hace falta un sistema que sea capaz de cumplir con esa necesidad.

Ya hemos abarcado un gran número de proyectos y más que nada estructuras robóticas dedicadas a asistir la rehabilitación de extremidades superiores, haciendo falta citar prototipos clasificados en estructuras de exoesqueletos como los que podemos observar en [13]–[15] y aunque siendo estructuras mecatrónicas diferentes al de la propuesta, son diseños que buscan

Dispositivo múltiple de medición de fuerzas, módulos de medición de fuerza y procedimiento para la vigilancia de estado

En este patente encontramos un dispositivo múltiple para la medición de fuerzas, en particular un dispositivo de pesaje múltiple. El prototipo que se muestra contiene dos módulos de medición de fuerza y un display. Respecto a uno de los módulos de medición de fuerza, el dispositivo utilizado es una célula electromecánica de medición de fuerza que actúa como un convertidor de magnitudes, ya que convierte la magnitud de la fuerza de entrada ejercida por un movimiento mecánico en una señal de voltaje de salida. Por otro lado el segundo módulo de medición de fuerzas, esta denominado como un dispositivo múltiple de medición de fuerzas, en el cual la fuerza a medir es distribuido sobre una placa o un contenedor colocados en módulos de fuerza [16]. El valor de la magnitud medida por los dos módulos de fuerza que contiene el dispositivo mostrado en la figura 15 es transmitido a un dispositivo de salida compartido y allí son combinados para formar un resultado total.

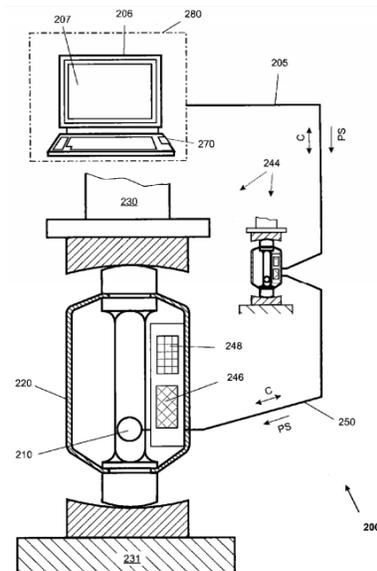


Figura 15 Esquema completo del dispositivo múltiple de medición de fuerzas.

A continuación, se describen cada uno de los puntos que se señalan en la imagen anterior:

En el punto 200 se muestra un dispositivo múltiple de medición, con el 205 se señala el cable de control y el 206 la terminal. En la ilustración el 207 muestra el display del dispositivo, el 210 muestra la célula de medición de fuerza, el 220 la carcasa con un corte transversal del dispositivo, el punto 230 señala la pata de contenedor y el 231 el cimiento de este. En el punto 244 se muestra el módulo de medición de fuerza, en el 246 el elemento de suministro de corriente eléctrica y el 248 el medio de comunicación. En el 250 se señala el cable de conexión de módulos, en el 270 la unidad de alimentación de corriente eléctrica y por último en el punto 280 muestra el dispositivo de control. Con la letra C se da entender la relación de comunicación y con las letras PS la alimentación de corriente eléctrica.

1.10 APLICACIONES DE ROBOTS EN REHABILITACION

En este apartado, mostraremos los productos ya lanzados al mercado y patentados que se dedican a tareas similares a la que ejercerá el módulo robot-planar, esto con la finalidad de evaluar y guiar durante los progresos de la elaboración y no obtener como resultado final un prototipo que se aleje del objetivo final.

1.10.1 MIT-MANUS

En esta primer patente tenemos un robot muy similar al que se presenta en el proyecto ya que consiste en un robot del tipo planar usado en pacientes que sufrieron algún tipo de accidente cerebrovascular, el módulo robótico que presento el instituto tecnológico de Massachusetts (Figura 16) en convenio con otras instituciones como el departamento de neurología y neurociencia de Estados Unidos de América, está basado en un entrenamiento del tipo antigraavedad el cual fue aplicado a más de 250 pacientes los cuales tomaron un conjunto de sesiones programadas [17].

En los resultados obtenidos con el MIT-Manus no se obtuvo un aumento del tono muscular de los pacientes, pero si una reducción significativa en el deterioro hombro-codo.



Figura 16 Versión comercial Robot-Planar MIT-MANUS en terapia dentro del hospital de rehabilitación de Burke(White Plains,NY) [15].

1.10.2 Extensión de MIT-MANUS

Como podemos observar en este subtítulo, esta es un complemento de la anterior el cual le añade una extensión de muñeca al ya mencionado banco de pruebas MIT-Manus, este artículo se basa en un inconveniente del robot MIT-Manus el cual es que solo se presentaron resultados en la reducción del deterioro hombro-codo por lo tanto el robot se limitó únicamente en este grupo muscular, y la propuesta de la extensión de muñeca le otorga al robot otros tres grados más de libertad de rotación y en el artículo se muestra el diseño del sistema agregado junto con sus características [18].

Generando así un banco de pruebas nuevo con mejoras y resultados diferentes a los obtenidos con el robot sin la innovación, teniendo en cuenta que las pruebas fueron realizadas en el mismo lugar que el primer prototipo presentado en el hospital de rehabilitación de Burke (White Plains, NY). Obteniendo como resultado un robot aplicado a la rehabilitación de extremidades superiores más completo y con resultados más confiables. El sistema robótico completo se ve mostrado en la figura 17.



Figura 17 Fotografía de la estación de trabajo de rehabilitación de muñeca en el hospital de rehabilitación de Burke [16].

Durante el estado del campo de este protocolo de tesis se han ido desarrollando varios conceptos que suelen repetirse en varias ocasiones en artículos, revistas o proyectos ya mencionados y uno de esos conceptos es la neurorrehabilitación, un tema meramente del dominio médico, pero que está siendo asistido por la electrónica en especial del área de la robótica, y el uso de este concepto asistido por la robótica da paso a una nueva ciencia definida como neurobotica, el cual consiste en otorgar soluciones por medio de la robótica a problemas de la neurociencia, como lo es en este caso la recuperación motriz afectada por trastornos neuronales. Prueba de ello, en el artículo [19] tomado de la universidad técnica de Ambato, Ecuador, se muestra el trabajo desarrollado con un robot llamado ARMEO mostrado en la figura 18, el cual fue usado para tratar a pacientes con diagnóstico de hemiparesia, teniendo como objetivo principal comparar los resultados obtenidos en el tratamiento con ARMEO y los resultados obtenidos con la terapia convencional desarrollado en el área de rehabilitación del hospital del IESS Ambato.



Figura 18 Robot ARMEO [17].

A continuación, en la figura 19 y 20, se muestran unas graficas aplicadas bajo el principio de Barthel para su análisis que arrojan los resultados obtenidos tras las pruebas llevadas a cabo.

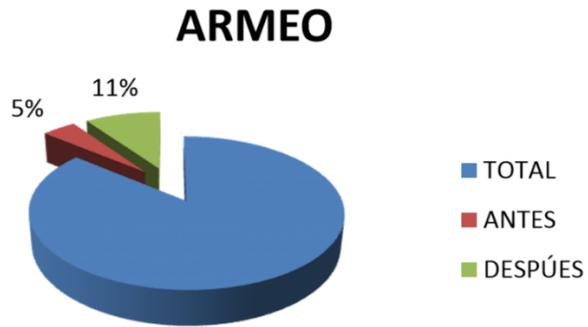


Figura 19 Grafica del Índice de Barthel pacientes robot ARMEO [17].

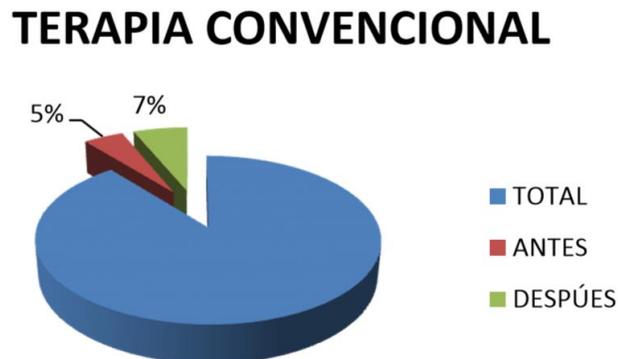


Figura 20 Grafica del índice de Barthel TERAPIA CONVENCIONAL [17]

Dentro de la aplicación del índice de Barthel en el robot ARMEO se muestra un 11% tomando en cuenta que función antes de aplicar el equipo es de un 5%. En cambio, con la terapia convencional la funcionalidad después es de un 7% y antes era de 5%. Por lo tanto, el resultado muestra la mejora alcanzada con la aplicación del robot en un 6% mientras que con terapia convencional el porcentaje de función es de 2%, y con ello artículo demuestra que la aplicación del robot ARMEO es más eficaz en mejorar la funcionalidad del miembro superior.

Con esta información presentada en este primer capítulo, es posible centrar el objetivo específico del tema, pero más aún, el justificar la hipótesis que determina que es posible crear el joystick basado en una celda de carga. El área de la ingeniería electrónica contiene un sinnúmero de desarrollos tecnológicos, tanto que es posible considerar la ingeniería electrónica como madre de la tecnología, ya que es posible desenvolver o aplicar la ingeniería electrónica en cualquier otro tipo de especialidad. Es por eso que comenzamos desde lo general hacia lo específico para determinar más aun el objetivo del tema, por lo tanto, en el siguiente capítulo se desarrolla la investigación de temas en áreas diferentes a la electrónica que enriquecen la investigación y dan aún más, el valor agregado a esta tesis.

Capítulo II FUNDAMENTOS TEORICOS

En este capítulo número dos, se llevará a cabo la consulta de bibliografías, artículos, libros, revistas de diferentes ciencias con la información necesaria sobre todas aquellas técnicas, métodos, teorías, axiomas y datos de interés entre otros, para enriquecer la investigación y, sobre todo, sustentar el trabajo realizado. Entre los temas citados se encuentra información médica acerca de la estructura anatómica de la extremidad superior, así como la biomecánica de este, el cual es un tema fundamental que da a conocer las fuerzas que se busca medir con el joystick. Se determinan las fuerzas de interés a medir y se realiza la investigación de la electrónica que ayuda a la medición de fuerza como lo es el área de la extensiométrica, por último, se da a conocer las herramientas usadas, microcontroladores, protocolos de comunicación etc., que fueron empleados para satisfacer los objetivos iniciales.

2.1 ESTRUCTURA Y BIOMECANICA DE EXTREMIDAD SUPERIOR

2.1.1 Mano

La mano es la extremidad superior distal a la muñeca, la cual se subdivide en tres partes importantes; muñeca, metacarpo y dedos[20].

La mano cuenta con cinco dedos, con dos superficies, superficie anterior conocida como palma y la superficie dorsal conocido como dorso de la mano. Dentro de la posición anatómica de la mano el pulgar se encuentra rotado 90° respecto al resto de los dedos por lo tanto la yema del pulgar apunta en un sentido medial, debido a esto, los movimientos del pulgar son perpendiculares respecto a los movimientos de los otros dedos[20].

La mano es un miembro de suma importancia como herramienta mecánica y sensorial; gran parte de grupos de músculos, huesos, articulaciones, tendones, etc., se fusionan para disponer en diferentes posiciones en el espacio a la mano humana.

Cuenta con veintisiete huesos dentro de su estructura anatómica, los cuales se dividen en tres grupos, huesos del carpo, metacarpianos y falanges, los cuales se muestran en la figura 21. Mientras que en la estructura muscular cuenta con treintaicuatro músculos que varían de acuerdo a la tarea a realizar[20].

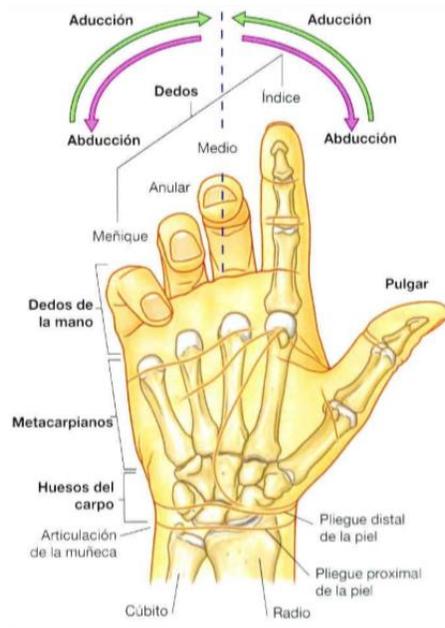


Figura 21 Estructura de la mano humana.

Los movimientos de abducción y aducción son movimientos voluntarios que son medidos con una referencia imaginaria respecto a la posición anatómica del cuerpo humano, los cuales alejan o aproximan respectivamente la extremidad a la referencia tomada. Dentro de la estructura anatómica de la mano se toma como referencia el eje longitudinal que atraviesa el dedo medio. Existen cuatro tipos de movimientos principales que logra generar la mano humana, la flexión palmar de la muñeca la cual logra alcanzar los 90° aunque solo se utilice un rango de movimiento de 10° a 15° dentro de las actividades de la vida cotidiana. Flexión dorsal de la muñeca, alcanza un límite de 80° teniendo en cuenta que solo se usa 35° de amplitud en actividades de la vida diaria. Inclínación radial o abducción de la muñeca el cual consigue una amplitud de 20°. Inclínación cubital o aducción que alcanza una amplitud de 35°[21]. En la figura 22, se muestra las referencias de los movimientos anteriormente señalados otorgado por la asociación mexicana de cirugía de mano.

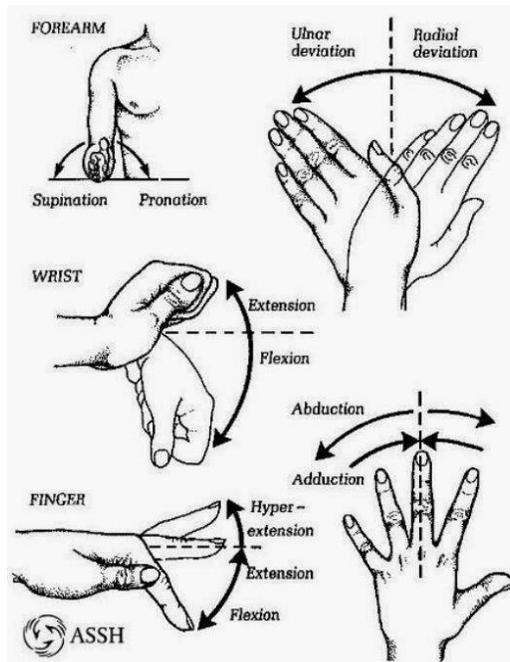


Figura 22 Biomecánica de la mano [21].

Existen dos movimientos importantes que integran a la mano y el brazo humano los cuales son los de pronación y supinación; el movimiento de pronación se denomina por la rotación del antebrazo que permite situar el dorso de la mano hacia arriba, mientras que en el movimiento de supinación lleva a la palma de la mano boca abajo[20]. Los dos ejemplos de pronación y supinación se muestran en la figura 22.

Así como la mano logra generar flexiones y extensiones, también crea un nuevo patrón de movimientos llamados presas, las cuales auxilian en la manipulación de objetos. Las presas palmares son algunas de las configuraciones que se logra generar con la mano, clasificadas en dos tipos según la participación del dedo pulgar. La primera de ellas es la presa digito palmar; la característica más importante de esta configuración es que no se hace uso del dedo pulgar debido a que se opone la palma a los cuatro últimos dedos. Este tipo de agarre es más usado por lo general cuando se trata de alguna manipulación de palanca o cuando se sostiene algún volante. Una cualidad que presenta esta presa, es que entre menor sea la dimensión del objeto a manipular, la fuerza de la presa aumentará, mientras que mayor sea la dimensión del objeto a manipular, menor será la firmeza de la presa[22]. En la figura 23, se muestra un ejemplo de este tipo de presa.



Figura 23 Presa digito palmar [22].

La siguiente presa principal que presenta la mano humana, es la de presión palmar a plena mano o a plena palma, la cual es usada para generar una presión de fuerza para los objetos voluminosos y pesados, de igual manera, el volumen del objeto determina la fuerza de presión, la cual es óptima cuando el dedo pulgar logra hacer contacto con el dedo índice. En la figura 24 se hace referencia a este tipo de presa.



Figura 24 Presa palmar a plena mano o a plena palma [22].

2.1.2 Antebrazo

El antebrazo es la extremidad superior ubicado desde la articulación del codo hacia la muñeca, el cual está constituido por dos huesos paralelos que son el radio y el cubito; el antebrazo esta dividido en dos compartimientos, anterior y posterior, en los que esos compartimientos se ven separados por estructuras óseas, membranas y músculos[20]. En la figura 25 se muestra la estructura ósea del antebrazo.



Figura 25 Estructura ósea del antebrazo [22].

El antebrazo, al igual que la muñeca consigue realizar los movimientos de pronación y supinación que están directamente relacionadas a la posición de los huesos anteriormente mencionados. El antebrazo está conformado por veinte músculos en su estructura y se encuentran subdivididos de acuerdo con sus funciones, por ejemplo, los músculos del compartimiento anterior son los que se encargan de flexionar la muñeca y los dedos de igual manera de realizar el movimiento de pronación; mientras que los músculos del compartimiento posterior son los que se encargan de extender la muñeca y los dedos al igual que de realizar el movimiento de supinación de la mano[20]. En la figura 26 se muestran parte de los músculos que componen al antebrazo, así como sus movimientos de supinación y pronación.

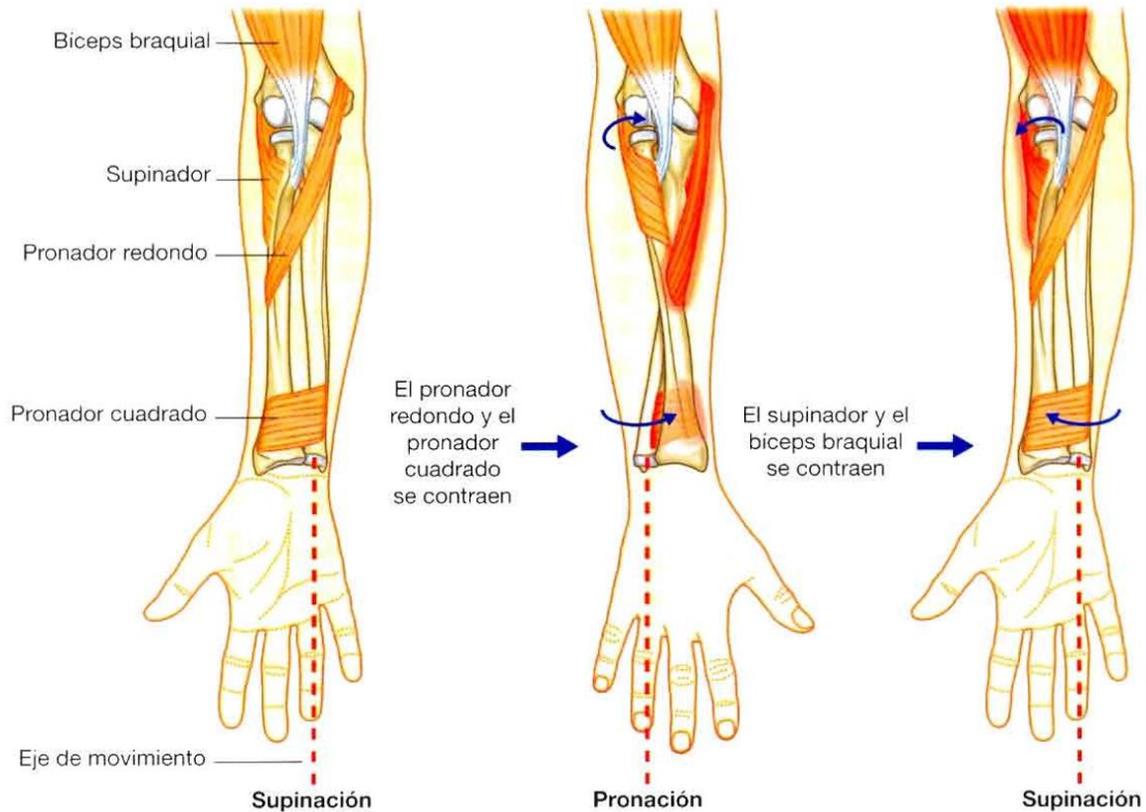


Figura 26 Movimientos de supinación y pronación del antebrazo y palma [22].

2.1.3 Brazo

El brazo es la extremidad superior que se encuentra ubicada entre el codo y el hombro y está relacionado directamente con la axila. La estructura ósea del brazo se encuentra conformado únicamente por un hueso, el humero. Al igual que el antebrazo, el brazo está subdividido en dos secciones, la cara anterior y la cara posterior, las cuales determinan la ubicación de los músculos que lo conforman. Los músculos encontrados en la sección de la cara anterior del brazo son los que se encargan de la flexión de la extremidad superior, mientras que los músculos de la sección de la cara posterior son los que se encargan de la extensión de la extremidad superior. El brazo está conformado por doce músculos los cuales la mayoría están insertados en los extremos proximales de los huesos del antebrazo[20]. La figura 27 muestra una parte de los músculos que conforman al brazo, así como su ubicación anatómica.

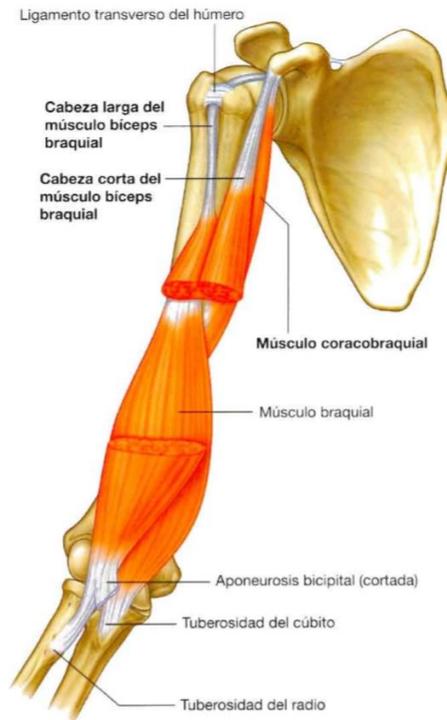


Fig. 7.63 Músculos biceps braquial y braquial.

Figura 27 Estructura ósea del brazo con músculos importantes [22].

2.1.4 Hombro

El hombro es la unión de la extremidad superior con el tronco y el cuello, su estructura ósea está conformada por dos huesos que son la clavícula y la escapula, también hace uso importante del extremo proximal del humero, el cual es el hueso que conforma al brazo. El hombro está constituido por un total de trece músculos en cual sobresale un grupo de músculos denominados “manguito rotador” debido a la forma en que los músculos envuelven la estructura ósea; los demás músculos están ubicados hacia la parte proximal al pecho[20]. En la figura 28 se puede observar parte de la estructura ósea y muscular del hombro, así como sus conexiones periféricas.

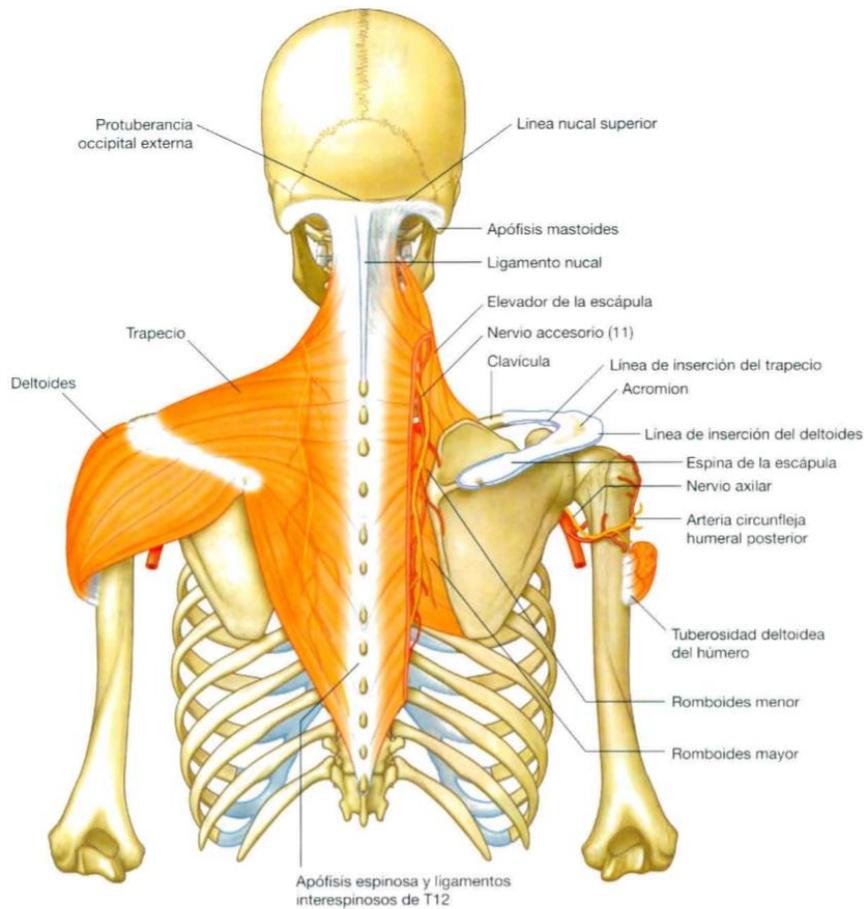


Figura 28 Estructura ósea del hombro y músculos de apoyo [22].

Uno de los músculos más importantes en la estructura del hombro es el deltoidees, es cual está catalogado como el musculo más grande, fuerte y superficial del hombro[20], también es aquel que le da la forma redondeada al hombro, es considerado a su vez como el motor del hombro, gracias a su fuerza, su función de levantar el brazo y de disponer a la extremidad superior una gran variedad de movimientos como lo son la abducción horizontal y aducción horizontal del hombro, dichos movimientos, se muestran en la figura 29 y figura 30 y toman gran importancia en este trabajo de investigación.

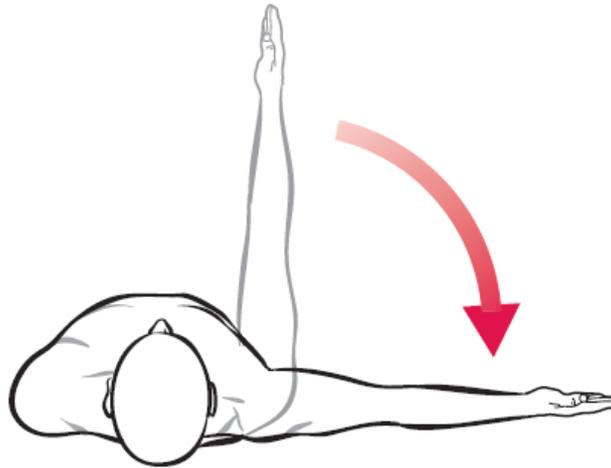


Figura 29 Movimiento de abducción horizontal del hombro [22].

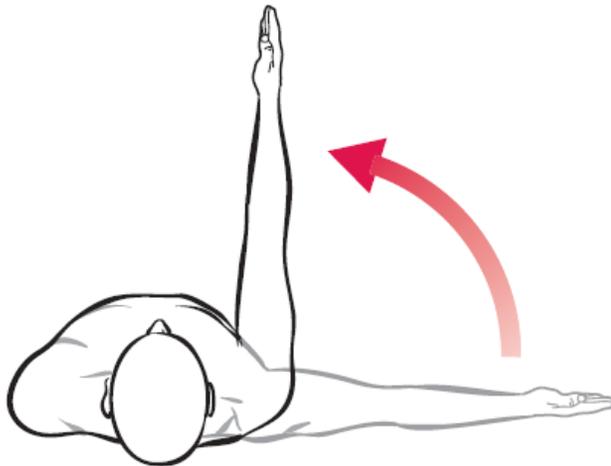


Figura 30 Movimiento de aducción horizontal del hombro [22].

2.2 HIGIENE POSTURAL

2.2.1 DEFINICIÓN

La higiene postural son el conjunto de normas las cuales buscan corregir y orientar acerca de la posición correcta del cuerpo humano, ya sea en movimiento o en reposo para prevenir lesiones futuras salvaguardando la vida de la columna vertebral[23]. La posición de importancia en este trabajo de investigación es la de sedestación o posición de sentado, esta posición es común usarla en actividades laborales o para guardar reposo. En la posición sentado una proporción del peso corporal es transferido al asiento y dependiendo del estilo del asiento con o sin apoyos para los brazos otra parte de la proporción corporal es transferida al suelo y los reposabrazos. Dentro de la postura correcta, la espalda debe estar apoyada en la mayor parte de la de la superficie, no se debe

mantener el cuello demasiado tiempo flexionado, mantener muy alejado el instrumento de trabajo lo cual obligaría a separar la espalda del respaldo del asiento, no se debe mantener la piernas cruzadas una sobre la otra o solo generar el peso en una de ellas ya que esto limita la circulación sanguínea por lo tanto las piernas deben presentar una angulación cerca de 110 grados respecto a la cadera y un ángulo alrededor de 80 a 90 grados con las rodillas, por otro lado el brazo y el antebrazo debe formar un ángulo de 90 grados con los hombros relajados y en flexión, en movimiento de extensión debe presentar una variación de entre 90 y 0 grados y este deberá presentarse en constante movimiento para evitar el cansancio[24]. La referencia de postura adecuada de sedestación se muestra en la figura 31.

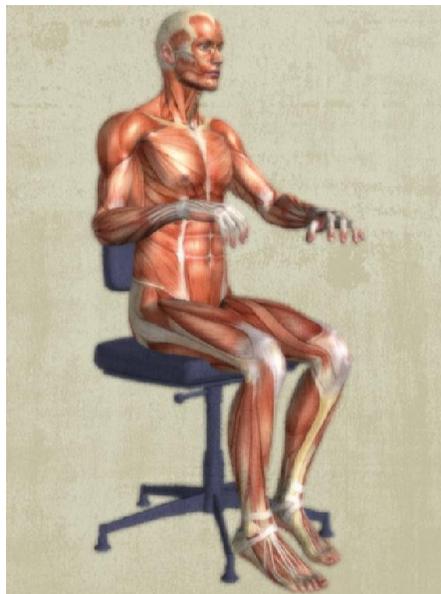


Figura 31 Posición de sedestación ideal [24].

Teniendo en consideración la higiene postural y cada una de las normas que la conforman, se da seguimiento a la adaptación del espacio de trabajo, el cual no debe interferir la mayor parte de tiempo con la postura correcta del cuerpo. La zona de trabajo empleada para el robot planar es sobre una mesa, por lo tanto, se debe tener las consideraciones de las zonas de alcance óptimo de trabajo. En la figura 32 se muestran las dimensiones de las áreas de trabajo a considerar.

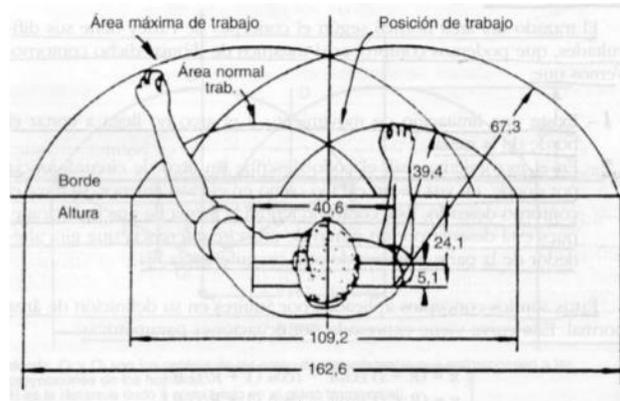


Figura 32 Diagrama del área máxima de trabajo en sedestación [24].

2.3 FUERZA DE EXTREMIDAD SUPERIOR

2.3.1 Fuerza máxima de agarre

Un factor muy importante que se debe considerar es la fuerza máxima de agarre, debido a esta fuerza interactuara directamente con el joystick; de acuerdo a una investigación sobre la fuerza de individuos sanos de entre los 20 y 70 años de edad en la localidad de Usaquén, Bogotá[25], muestra resultados de los datos de la fuerza obtenida mediante pruebas de trabajo obtenidos con un dinamómetro analógico calibrado en libras y kilogramos, el cual es considerado como el instrumento más preciso y confiable para la medición de objetiva de la fuerza de agarre. En la figura 33, se muestran los resultados obtenidos por dicha investigación, dando una referencia a considerar para el rango de trabajo a trabajar con el joystick de este trabajo de investigación.

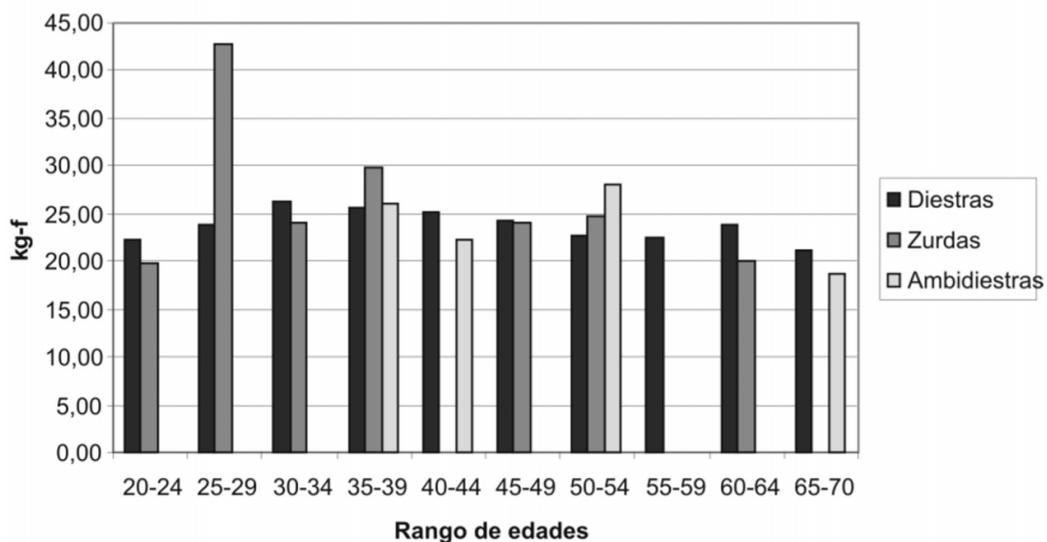


Figura 33 Diagrama de fuerza máxima de agarre [25].

Es importante recalcar, que dentro de los resultados mostrados en la figura (), se encuentran clasificados de acuerdo con la mano dominante con la que se realizó la prueba, lo cual extiende los datos de la investigación.

2.3.2 Medición de fuerza ejercida

Para la medición de fuerza que se ejerce sobre el joystick se hace el uso de galgas extensiométricas las que de acuerdo a [26] se asume que la tensión en el objeto bajo investigación transfiere directamente y sin pérdidas la tensión al sensor que tomara en cuenta la deformación, es por ello que durante el diseño del joystick se toma en cuenta las zonas más perjudicadas por la deformación que se presenta al ejercer la fuerza sobre el agarre, esto para colocar estratégicamente las galgas extensiométricas y con ello obtener una lectura directa y completa de la deformación.

El principio de funcionamiento de las galgas extensiométricas metálicas se basa en la relación tensión/resistencia de los conductores eléctricos descubierta por Wheatstone y Thomson [26], teniendo en cuenta que cualquier conductor eléctrico cambia su resistencia al aplicarle una tensión mecánica, ya sea por medio de fuerzas de tensión o compresión y parcialmente al cambio en la resistividad Q del material conductor que es resultado a la alteración microestructural que se presenta en la galga al momento de aplicarle una fuerza.

$$\text{Ecuación 1.} \quad \frac{dR}{R_D} = \varepsilon(1 + 2\nu) + \frac{dQ}{Q}$$

Donde:

R = resistencia eléctrica

ε = tensión

ν = coeficiente de Poisson

Q = resistividad

Durante el estudio de medición de fuerza con galgas extensiométricas se debe tener en cuenta los factores mecánicos que puedan llegar a crear alguna alteración en la medición de fuerza, por ejemplo, la superficie en la que se coloca la galga; algunas celdas de carga contienen en superficies

cóncavas las galgas o en el interior de la estructura mecánica en la cual se creara la deformación [26], de acuerdo a la literatura citada esto no genera algún tipo de ruido en el sistema siempre y cuando la superficie sea una zona controlada. El caso seleccionado para la adhesión de las galgas extensiométricas sobre el joystick fue adhiriéndolas a la superficie de la estructura mecánica, esto para facilitar el acceso a la medición de cada una de ellas o en su caso para facilitar el mantenimiento preventivo o correctivo del joystick.

2.3.3 ¿Qué utilizar para la medición de fuerza ejercida?

La extensiométrica es una de las técnicas más completas para el análisis experimental de tensión que nos otorga información real acerca de lo que pasa en objetos mecánicos de cualquier tipo de material, como lo puede ser el acero, aluminio, madera, materiales compuestos, etc., al presentárseles fuerzas que crean alguna deformación, en el cual su fundamento básico es la variación de resistencia en hilos resistivos colocados en el cuerpo mecánico a estudiar[27].

Una de las decisiones más complejas que se presentan durante prácticas de extensometría se enfoca en el dilema de que sensor ocupar para obtener las señales requeridas. En este caso de estudio no fue la excepción, ya que existiendo una gran variedad de sensores las opciones eran grandes, de acuerdo a la historia de las aplicaciones de varios sensores mencionados en [26] se tomó la decisión de optar por una galga extensiométrica, ya que, durante el desarrollo de la tecnología de las galgas extensiométricas, se enfocó este sensor a la medición de estrés mecánica ejercida directa e indirectamente sobre el sensor.

2.3.3.1 Celdas de carga

Las celdas de carga son transductores utilizados para convertir la variable física de la fuerza a una variable eléctrica, en específico a voltaje[28]. La conversión de fuerza comienza por un elemento mecánico transfiriendo la variación en la geometría a algún medidor de deformación como lo son las galgas extensiométricas, las cuales a través de la deformación presentada crean una variación en su valor de resistencia eléctrica y con ello se obtiene la señal eléctrica con la cual se puede determinar el valor de la variable física inicial que es la fuerza. Debido a que es necesario un medidor de deformación en la elaboración de celdas de carga, se dice que la medición de fuerza es obtenida de forma indirecta. En el mercado existen un sin fin de celdas de carga para medir una gran variedad

de vectores de fuerza, esto es de acuerdo con la aplicación y distribución de la fuerza, en la figura 34 se muestran una algunas de las celdas de carga que podemos encontrar en el mercado.



Figura 34 Diferentes tipos de celdas de carga comerciales [28].

La determinación de su aplicación o de su rango de trabajo está relacionado directamente con la geometría y el material de la celda de carga, debido a que la estructura mecánica es la que presenta el estrés total generado por la fuerza inicial.

2.4 CARACTERISTICAS DEL SENSOR MECANICO DE FUERZA

2.4.1 Viga Cantiléver

La viga en Cantiléver o viga en voladizo mantiene uno de los extremos de la viga sujetos mientras que el otro extremo se encuentra libre de sujeciones, así como lo podemos apreciar en la figura 35.

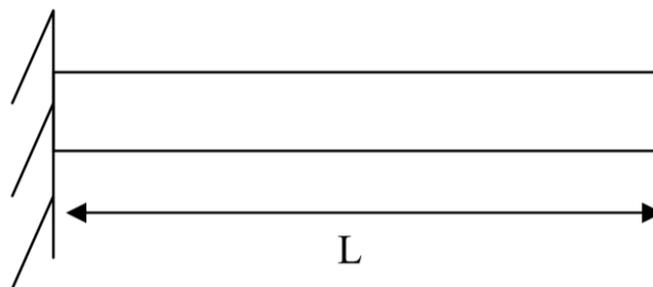


Figura 35 Configuración de una viga en Cantiléver [29].

El extremo que se encuentra sujeto no presenta algún ángulo de desplazamiento, por lo tanto, su ángulo de deflexión es igual a cero, el otro extremo que se encuentra libre presenta lo contrario, por lo tanto, si tiene un valor dado para el ángulo de deflexión[29]. Encontramos dos tipos de configuraciones en la viga, la viga con apoyo articulado y con apoyo empotrado, las cuales se muestran en la figura 36 y figura 37.

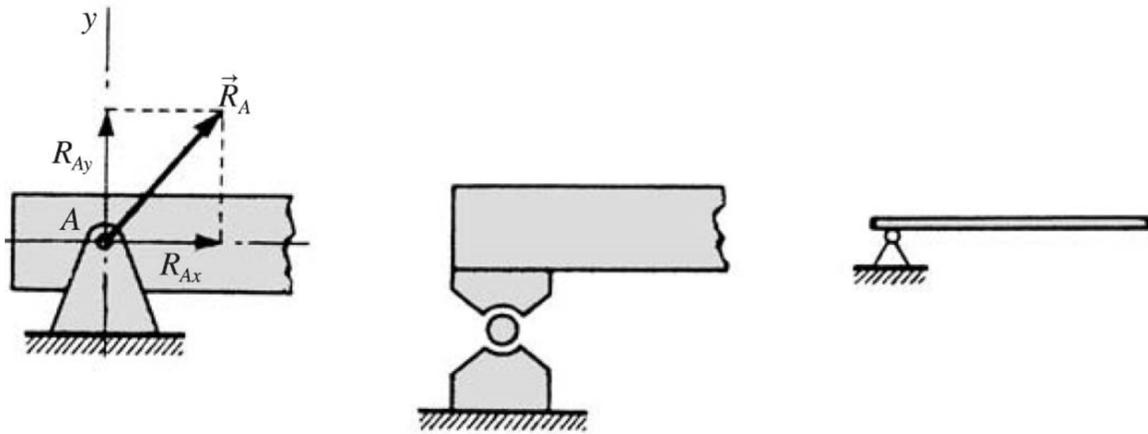


Figura 36 Viga en Cantiléver con apoyo articulado [29].

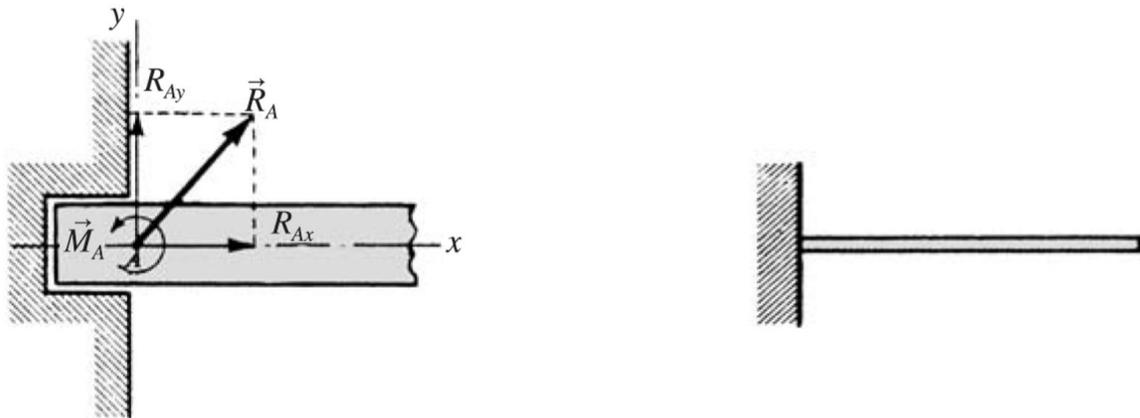


Figura 37 Viga en Cantiléver empotrada [29].

2.4.2 Estado elástico y plástico de los materiales

2.4.2.1 Estado elástico

Dentro de la resistencia de los materiales, el estado elástico es aquel en el que el cuerpo recupera su forma original al retirar la fuerza que le provoca la deformación, en este estado, el material presenta una variación en su estado tensional y aumenta su energía interna en forma de energía potencial elástica[30]. El material tiene una ley tensión-deformación lineal en carga y descarga, por lo tanto, se admite el principio de superposición de cargas.

Cuando algunas de las condiciones que se mencionaron no llega a cumplirse, entonces se dice que la elasticidad se vuelve no lineal, lo cual permite varios tipos de no linealidad, por mencionar algunos son:

No linealidad geométrica: Se presenta ante grandes movimientos y/o deformaciones.

No linealidad del material: Esta dado por la ley tensión-deformación no lineal.

2.4.2.2 Estado plástico

El estado plástico es aquel que no es elástico, por lo tanto, sus deformaciones no son del todo reversibles dentro de un cierto nivel de tensiones, en este concepto obtenemos que la ley de tensión-deformación no es igual en el proceso de carga que en el de descarga[30], de acuerdo con que no guarda una relación podemos encontrar dos tipos de estructuras:

Estructuras isostáticas: presentan deformación después de la descarga, presentan tensiones residuales después de la descarga por lo tanto si hay flexión.

Estructuras hiperestáticas: esta estructura presenta las mismas condiciones que en las estructuras isostáticas aumentado una, los esfuerzos y reacciones son remanentes después de la descarga.

Debemos tener en cuenta que una vez cumplidas estas dos condiciones de estado elástico y plástico y rebasado sus umbrales, se presenta una tercera condición la cual es la ruptura, en la después de aplicar la carga el material se deforma y presenta grietas o la fractura total del material[30]. Estos tres estados los podemos apreciar en la gráfica que se muestra en la figura 38, la cual muestra curva típica de un material tras someterlo a una carga de fuerza.

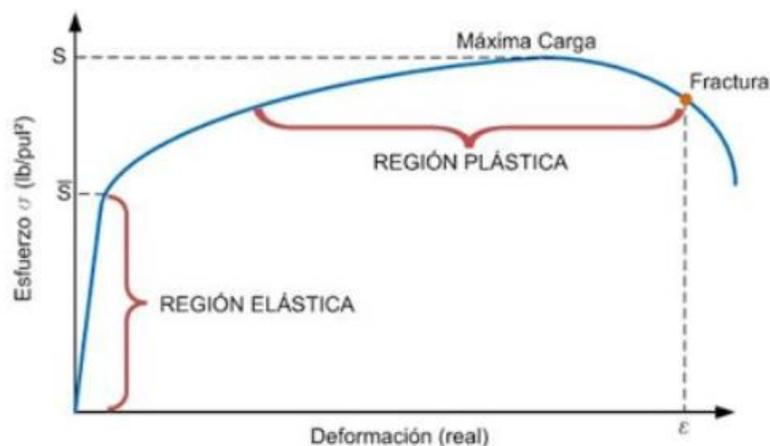


Figura 38 Grafica de comportamiento elástico y plástico de los materiales [30].

2.5 ELECTRÓNICA EMPLEADA

2.5.1 Puente Wheatstone

Es importante tener en cuenta que sensor utilizar tanto como el circuito de aplicación. De acuerdo al estudio e investigación que se han generado con las galgas extensiométricas [26], el circuito de aplicación más eficiente para este tipo de sensores es el puente de Wheatstone.

El circuito del puente de Wheatstone es un circuito que hace posible la medición precisa de las resistencias eléctricas el cual puede ser usado para determinación absoluta de una resistencia en comparación de una resistencia conocida y esto nos conduce a observar los cambios que se presentan en el valor de resistencia. En este caso, se recurre a utilizar el circuito puente de Wheatstone bajo técnicas de medición de deformación.

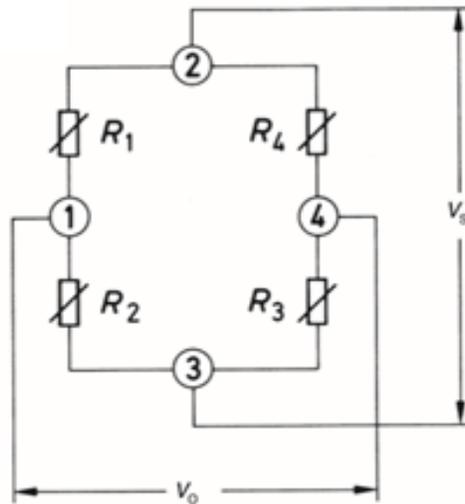


Figura 39 Diagrama eléctrico de puente de Wheatstone [26].

La configuración del puente de Wheatstone consiste en cuatro brazos o ramas como se muestra en la figura 39 están formados por las resistencias R_1 a R_4 . Los nodos de la esquina 2 y 3 del puente designan las conexiones para el voltaje de excitación del puente V_s ; en los nodos de la esquina 1 y 4 se genera el voltaje diferencial de salida del puente V_o .

De acuerdo a la bibliografía, si se aplica un voltaje de suministro V_s a los dos puntos de suministro del puente 2 y 3, este se divide en las dos mitades del puente R_1 , R_2 y R_4 , R_3 como una relación de

las resistencias del puente correspondientes, es decir, cada mitad del puente forma un divisor de voltaje.[26]

2.5.1.1 Principio de funcionamiento del puente Wheatstone

Cuando el puente no está balanceado, se crea una diferencia de potencial en las resistencias en R_1 , R_2 y R_3 , R_4 por lo tanto lo calculamos como:

$$\text{Ecuación 2. } V_O = V_S \left(\frac{R_1}{R_1+R_2} - \frac{R_4}{R_3+R_4} \right)$$

Pero si el puente se encuentra balanceado:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Por lo tanto, la salida de voltaje es igual a cero.

Cuando se aplica una tensión, la rama que contiene la galga extensiométrica presenta cambios en la resistencia denominado como ΔR , esto nos da:

$$\text{Ecuación 3. } V_O = V_S \left(\frac{R_1+\Delta R_1}{R_1+\Delta R_1+R_2+\Delta R_2} - \frac{R_4+\Delta R_4}{R_3+\Delta R_3+R_4+\Delta R_4} \right)$$

Para generar mediciones de deformación, las resistencias R_1 y R_2 deben ser iguales en el puente Wheatstone. Lo mismo aplica para R_3 y R_4 . Por lo tanto:

$$R_1 = R_2 = R_1$$

Y correspondientemente:

$$R_3 = R_4 = R_3$$

Esto nos da:

$$\text{Ecuación 4. } V_O = V_S \left(\frac{(R_1+\Delta R_1) \cdot (2R_3+\Delta R_3+\Delta R_4) - (R_3+\Delta R_4) \cdot (2R_1+\Delta R_1+\Delta R_2)}{(2R_1+\Delta R_1+\Delta R_2) \cdot (2R_1+\Delta R_3+\Delta R_4)} \right)$$

Cuando se expanden los resultados se generan muchos términos en $\Delta R_X \cdot \Delta R_Y$ que son muy pequeños en comparación con los otros términos y por lo tanto pueden ser ignorados. Así:

$$\text{Ecuación 5. } V_o = V_S \left(\frac{R_1(\Delta R_3 + \Delta R_4) - R_1(\Delta R_1 + \Delta R_2) + 2R_3\Delta R_1 - 2R_1\Delta R_4}{4R_1R_3 + 2R_1\Delta R_3 + 2R_1\Delta R_4 + 2R_3\Delta R_1 + 2R_3\Delta R_2} \right)$$

Como se puede observar la estructura de la formula aun no presenta la forma óptima para trabajar con ella, por eso mismo se busca simplificar aún más los términos, tenido en cuenta que al momento de asignar valores a todos los términos de abajo la diferencia será aún mayor si la resistencia del medidor de tensión es menor, por eso se logran ignorar todos los términos a excepción del término, $4R_1R_3$, quedando como resultado[26]:

$$\text{Ecuación 6. } \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_1\Delta R_3}{4R_1R_3} + \frac{R_1\Delta R_4}{4R_1R_3} - \frac{R_3\Delta R_1}{4R_1R_3} - \frac{R_3\Delta R_2}{4R_1R_3} + \frac{2R_3\Delta R_1}{4R_1R_3} - \frac{2R_1\Delta R_4}{4R_1R_3}$$

Obteniendo;

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\Delta R_3}{4R_3} + \frac{\Delta R_4}{4R_3} - \frac{\Delta R_1}{4R_3} + \frac{\Delta R_2}{4R_1} + \frac{\Delta R_1}{2R_1} - \frac{\Delta R_4}{2R_3}$$

Teniendo en cuenta que las resistencias R_1, R_2 y R_3, R_4 deben ser iguales, nos quedaría;

$$\text{Ecuación 7. } \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

El termino $\frac{\Delta R}{R}$ puede ser reemplazado por lo siguiente:

$$\text{Ecuación 8. } \frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon$$

Donde:

$k = \text{Factor } K \text{ de la galga extensiométrica}$

$\varepsilon = \text{Fuerza}$

2.5.1.2 Configuraciones del puente de Wheatstone

El puente de Wheatstone contiene cuatro configuraciones que nos proporcionaran una variación en la sensibilidad o precisión de los valores de salida del puente, los esquemas de configuración se muestran en la figura 40 , los cuales son el de cuarto de puente, donde solo una de las resistencias eléctrica conectadas a las ramas del puente varia su resistencia eléctrica; medio puente, ahora son dos las resistencias que muestran cambios mientras que las otras dos quedan con una resistencia eléctrica estática, doble cuarto de puente o diagonal del puente, en esta configuración es aplicado dos veces el mismo principio que la de cuarto de puente, solo que los sensores que varían su resistencia se encuentran en diferentes ramas, y por último, puente completo, en esta configuración todos los elementos que conforman el puente de Wheatstone presentan variación en su resistencia eléctrica.

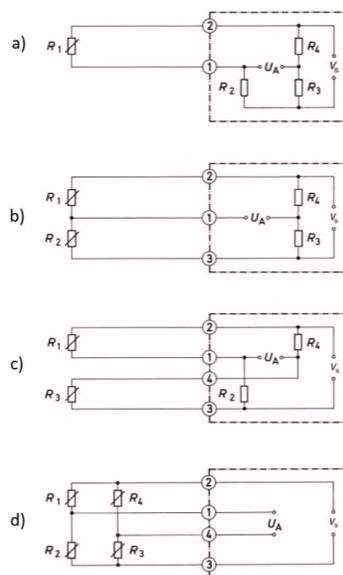


Figura 40 Configuraciones del puente Wheatstone [26].

La aplicación de las configuraciones del puente de Wheatstone para generar mediciones de deformación en estructuras mecánicas está directamente relacionado con la posición de los sensores de deformación en la estructura mecánica y del número de sensores.[26] Por ejemplo; si únicamente se cuenta con un sensor de deformación, el circuito a utilizar para obtener la variación en la deformación es el de cuarto de puente, debido a que solo se necesita una resistencia activa que presente variaciones en sus valores de resistencia eléctrica, aunque teniendo en cuenta que la responsabilidad para la medición de deformación mecánica estará situada en este único sensor, el

voltaje de salida es aceptable, pero podemos colocar un sensor de deformación más para complementar el voltaje de salida, pero eso implica cambiar la configuración del puente de Wheatstone.

Las configuraciones que otorgan un voltaje con mayor confiabilidad para la predicción de deformación de piezas mecánicas, son las configuraciones con más de un sensor de deformación y que se encuentran en una configuración opuesta entre la posición del sensor mecánico[26], por ejemplo, la configuración de medio puente, donde los sensores de deformación se encuentran en ramas contiguas, una sometida a tracción y la otra a compresión y logra presentar un voltaje diferencial a la salida del puente de Wheatstone, el circuito mencionado es el que se muestra en la figura() y a continuación se desglosa el análisis matemático de este:

Análisis matemático de medio puente Wheatstone con dos elementos variables;

Corriente I_A en las resistencias R_4 y R_1 es:

$$\text{Ecuación 9. } I_A = \frac{V_S}{R_4 + R_1} = \frac{V_S}{2R}$$

Tensión del nodo A:

$$\text{Ecuación 10. } U_A = I_A R_1 = \frac{V_S}{2R} R = \frac{V_S}{2}$$

Corriente I_B en las resistencias R_3 y R_2 es:

$$\text{Ecuación 11. } I_B = \frac{V_S}{R_3 + R_2} = \frac{V_S}{2R}$$

Tensión del nodo B:

$$\text{Ecuación 12. } U_B = I_B R_2 = \frac{V_S}{2R} (R + \Delta R)$$

Por lo tanto, la tensión de salida está dada por:

$$V_o = V_B - V_A = \frac{V_S}{2R} (R + \Delta R) - \frac{V_S}{2R} R$$

$$\text{Ecuación 13. } V_o = V_B \frac{\Delta R}{2R}$$

Con lo cual, obtenemos una respuesta lineal entre el aumento de resistencia eléctrica y voltaje.

2.5.2 Galga extensiométrica

La galga extensiométrica es un transductor usado para la medición indirecta de la deformación de geometrías mecánicas, por medio de la variación de resistencia que presenta al momento de crear una deformación en la superficie en la cual este colocado[27]. Las galgas extensiométricas son hilos muy finos de material conductor en geometrías de serpentinas impresos sobre láminas de material aislante. La resistencia eléctrica del material conductor se directamente proporcional a las dimensiones del impreso, por lo que la resistencia eléctrica aumenta cuando se alarga y disminuye cuando se comprime dicha geometría[27]. En la figura 41 se muestra una galga extensiométrica de uso común.

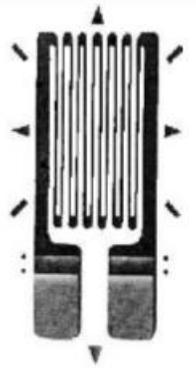


Figura 41 Galga extensiométrica [27].

Por lo tanto, se optó por emplear la galga BF350 en la cual, de acuerdo a la hoja de datos [31] se tiene un factor de calibración entre 2.00 - 2.20, una resistencia sin deformación de 350 Ω . Se especifica una corriente máxima de calibración de 15mA a 100mA, según el área con el fin de evitar efectos de auto calentamiento.

2.5.3 Acondicionamiento de señal

Una vez obtenida la señal de voltaje generada por la aplicación de fuerza en el joystick surge la necesidad mantener y acondicionar la señal de voltaje para el control y la interpretación de esta. En los terminales del puente Wheatstone se obtiene una señal de voltaje de manera similar a los sensores de temperatura, la mayoría de los medidores de tensión requieren amplificación; ya que tienen niveles relativamente bajos de salida (menos de 100 mV), que los hace vulnerables al ruido y con una demanda baja de potencia debido a que son señales de control [32]. En consecuencia, los cambios de resistencia también son muy pequeños y no se pueden medir directamente.[26]

Es por eso por lo que se recurre a un sistema de medición en el cual sea posible la manipulación y la determinación precisa en el cambio de resistencia y voltaje generado en el joystick.

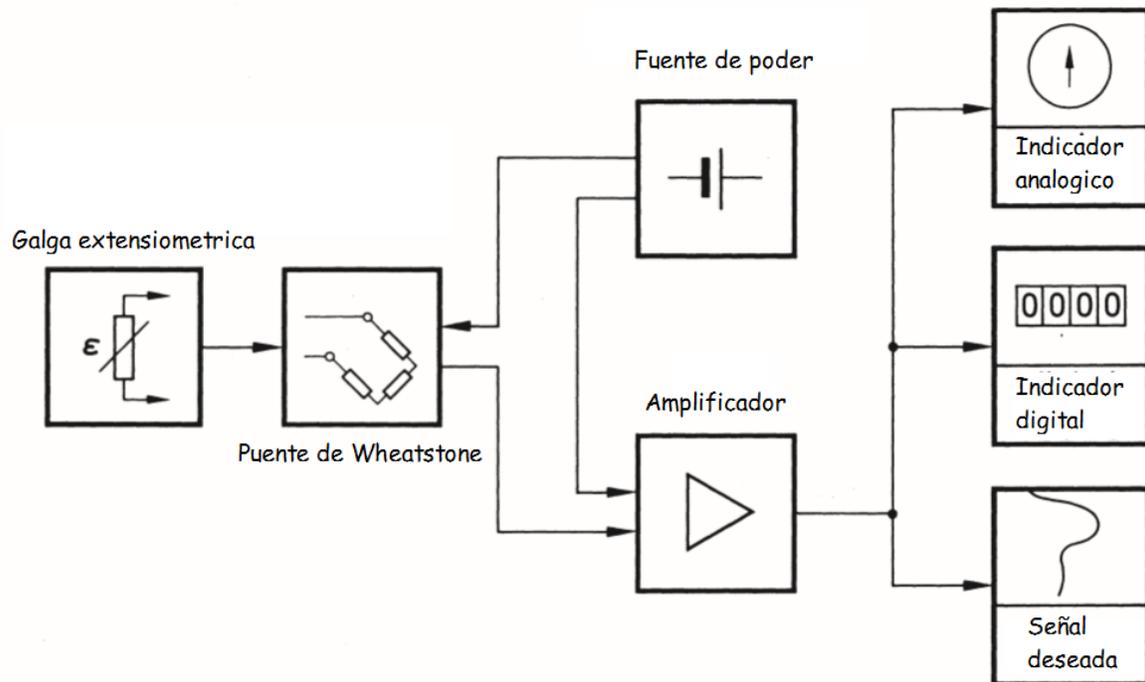


Figura 42 Diagrama básico de la instrumentación de señal de un puente Wheatstone [32].

En la figura 42 se muestra un esquema general del camino que debe de recorrer la señal que interpretara la fuerza ejercida. Es por ello por lo que se recurre a un amplificador de instrumentación.

Al comienzo se encuentra la galga extensiométrica que será nuestro medidor de tensión la cual convertirá la tensión mecánica en un cambio en la resistencia eléctrica. Posteriormente se encuentra en el sistema el circuito de medición, el cual es el puente de Wheatstone y es el que contiene el medidor de tensión en una de sus ramas. Mas adelante se alimenta el puente de Wheatstone para obtener una señal útil, esta energía auxiliar de acuerdo con la literatura se recomienda que sea externa al sistema y con una demanda baja de potencia para mantener controlada la variable de salida.

Una vez que se presente una tensión sobre el medidor de tensión, el valor de resistencia y por lo tanto el voltaje en el puente de Wheatstone variaran y es allí cuando se incluye un amplificador en

el sistema de medición como el tercer componente que amplifica la tensión de salida del puente a un nivel adecuado para instrumentos indicadores.

Algunos amplificadores de están diseñados para otorgar una corriente de salida que es proporcional a la salida del puente o en su caso pueden proporcionar salidas de tensión o corriente. Por eso mismo se recomienda un amplificador lineal el cual mantiene la tensión de salida o la corriente de salida proporcional a la tensión de la entrada del amplificador y mantiene la relación con la tensión que se aplica en el joystick.

Por último el cuarto componente en el diagrama del sistema es un indicador, el cual se encargará de convertir la señal de salida del amplificador en la magnitud de la tensión aplicada o puede seguir su camino hacia una tarjeta de adquisición de datos y posteriormente a un software para seguir procesando la señal.[26]

2.5.4 Amplificador de instrumentación

El circuito de amplificación que se usara en el sistema es el amplificador de instrumentación el cual está formado por tres operacionales y varias resistencias. Consta de dos etapas una preamplificadora y otra diferencial. En la primera etapa también se lleva a cabo la función de adaptar las impedancias del sistema que se requiera amplificar.

Dentro del diseño del amplificador de instrumentación existe una resistencia de suma importancia, ya que es la que asigna o da acceso a modificar el valor de la ganancia del amplificador la cual en la figura 43 se presenta como R_V pero también se le puede encontrar en otras literaturas como R_G . [33]

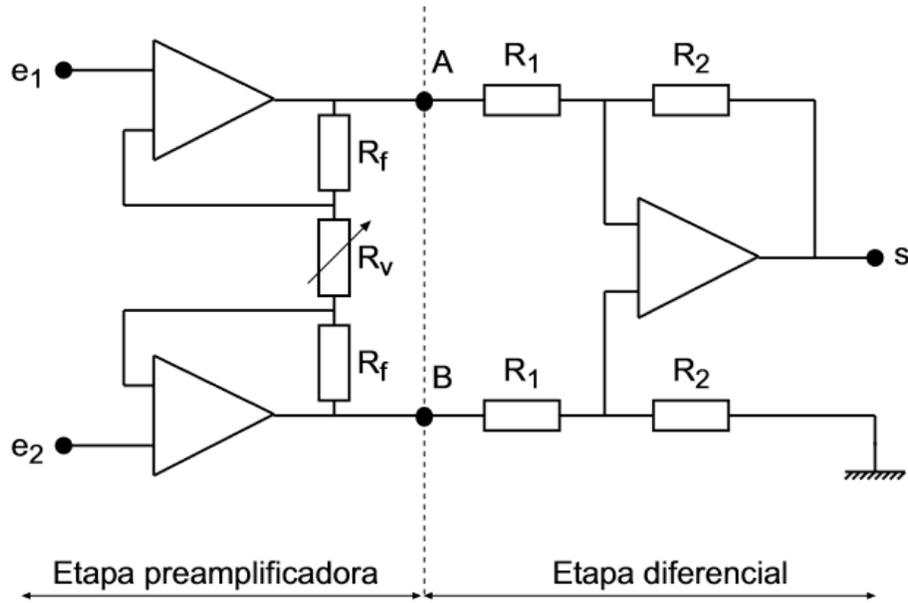


Figura 43 Circuito de un amplificador de instrumentación con ganancia regulable [33].

Donde la respuesta del sistema está dada por la siguiente ecuación siendo resultado del análisis del circuito:

$$\text{Ecuación 14. } V_s = \left(1 + 2 \frac{R_f}{R_v}\right)(V_1 - V_2)$$

Una vez teniendo en cuenta que la etapa de la medición de tensión aplicada en el joystick está completa y obtiene como resultado una señal controlada dentro de los rangos que se requieren por medio de circuitos electrónicos para el acondicionamiento de la señal de interés, es posible migrar a una tecnología que permita el uso de un ordenador y disminuya el hardware usado en el sistema. En este caso, se migro a los microcontroladores de la compañía CYPRESS, el cual es el PSOC 5 LP.

2.5.5 Psoc 5LP

Cypress Semiconductor Corp, es una corporación dedicada a la fabricación de microcontroladores, dentro de los cuales encontramos al psoc 5 lp, el cual es un sistema en chip programable por sus siglas en inglés (Programmable System on Chip). Dicho microcontrolador contiene módulos analógicos programables, los mejores convertidores A/D los cuales están basados en un núcleo ARM Cortex-M3 además que cuenta con una gran flexibilidad para diseñar sistemas con más de 80 componentes dentro de su estructura verificados y listos para su programación en el entorno de programación PSoC Creator IDE.

El PsoC 5LP cuenta con un nivel de tensión de alimentación en un rango de alimentación de entre 0.5 v hasta 5.5 volts gracias a su elevador integrado, ofrece una precisión analógica programable de 12 bit y un convertidor delta-sigma 20 bit con una referencia de tensión interna de $1.024V \pm 0.1\%$. Los convertidores A/D que contiene, incorporan 62 canales, el rango de trabajo de sus módulos analógicos es de 1.71v hasta los 5.5v, también podemos encontrar aún más variedad de módulos programables dentro del microcontrolador como lo son, amplificadores operacionales, comparadores, amplificadores de trans-impedancia, amplificadores de ganancia programable, mezcladores, LCD de segmento, sensado táctil CapSense, convertidores D/A, multiplexores y mucho más[34]. En la figura 44 se muestra el microcontrolador usado para el procesamiento de las señales.

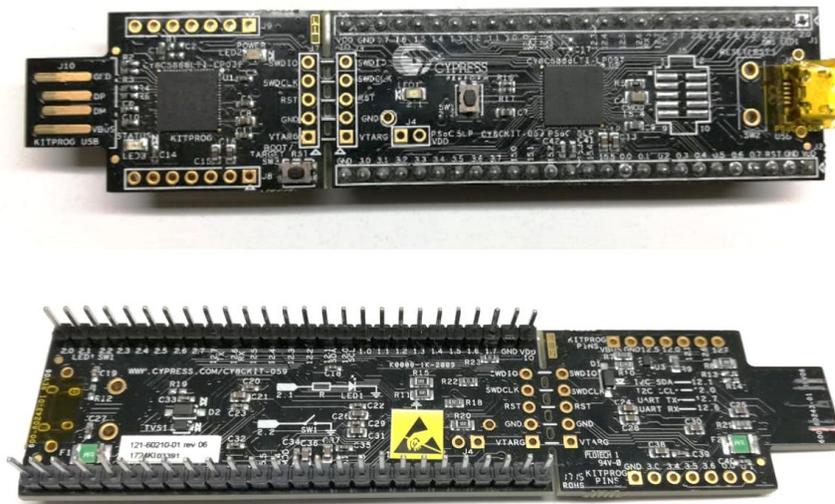


Figura 44 Microcontrolador PsoC 5 LP de Cypress, usado en el sistema.

La tarjeta del microcontrolador está compuesta por dos partes, la zona de trabajo en la cual se encuentra el microcontrolador, todos los pines de salida, de entrada, tanto como analógicos y digitales, leds, push button que pueden ser configurados y programados desde el PsoC Creator, al igual que un puerto micro usb para su programación y alimentación del microcontrolador. Por otra parte, encontramos el programador KitProg el cual es usado para alimentar al PsoC, el programador contiene un led de estado, que crea la conexión usb por medio de un conector usb macho 3.1, un push button usado como reset entre otros, la idea principal del fabricante es la de retirar el programador y por medio de una conexión física volver a programar el microcontrolador, logrando así reducir las dimensiones de la tarjeta para ampliar sus aplicaciones, el ecosistema del programador se muestra en la figura 45.

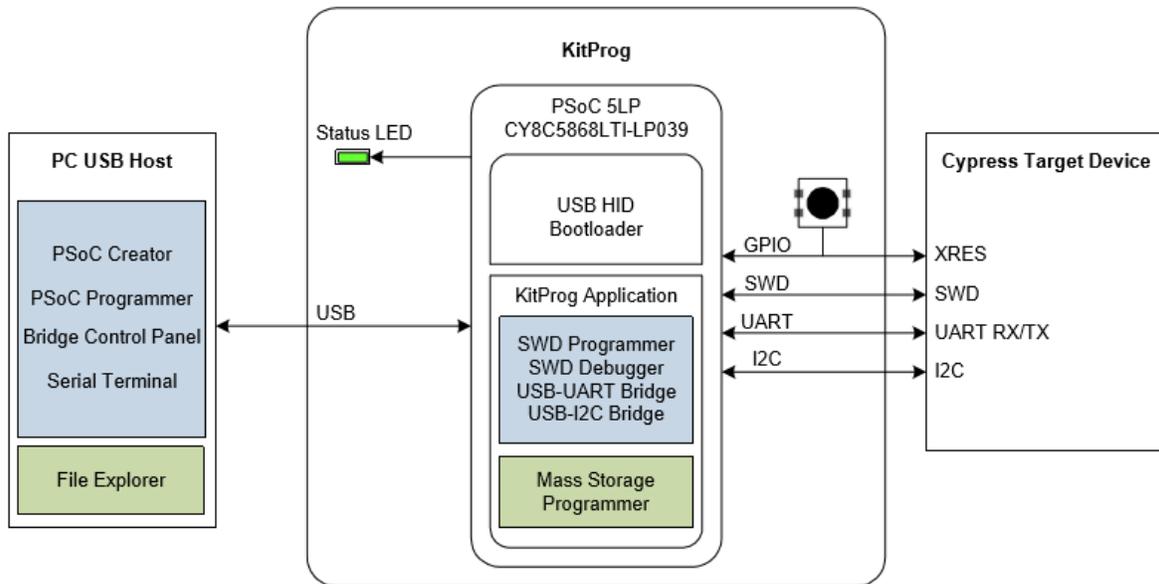


Figura 45 Diagrama del módulo de programación del PsoC 5 LP [34].

2.5.6 Protocolos de comunicación

2.5.6.1 Bluetooth

El bluetooth es un protocolo de comunicación que permite relacionar a varios dispositivos electrónicos entre sí, la señal de comunicación bluetooth es una señal de corto alcance, esta señal permite la recepción y transmisión de datos y archivos de diferentes tipos y es llevado a cabo a través de un ancho de banda. El valor de la radiofrecuencia más común en este tipo de comunicación está dada en 2.4 Ghz, pero es importante mencionar que existe más versiones de este tipo de comunicación donde los rangos del ancho de banda abarcan desde 1 hasta 24 Mbit/s[35].

El protocolo de comunicación por bluetooth consiste en dividir la banda de frecuencia (2.402 GHz – 2.480 GHz) en 79 canales cada uno de 1Mhz en su ancho de banda y posteriormente realiza la recepción o transmisión de datos. Cabe mencionar que dentro de las configuraciones del bluetooth se puede configurar la jerarquía de operación como maestro o esclavo (MASTER-SLAVE); debido a los valores de voltaje y corriente necesarios para su funcionamiento, el emplear este tipo de comunicación por bluetooth se vuelve una opción para demandar menos consumo de energía al sistema. Para la etapa de comunicación del sistema que se desarrolla en este trabajo de investigación es el módulo HC-05, cuenta con Bluetooth V2.0+EDR el cual es una versión con velocidad de datos mejorada, una modulación de 3Mbps con transceptor de radio completo de 2.4 GHz, una sensibilidad típica de -80 dBm hasta + 4 dBm, potencia baja de funcionamiento de

transmisión RF de 1.8 v y 1.8v a 3.6 v[36]. En la figura 46 se muestra el módulo empleado para el sistema de procesamiento.



Figura 46 Módulo HC-05 de comunicación bluetooth usado.

2.5.6.2 i2c

El bus i2c, es un protocolo de comunicación que logra comunicar a varios microcontroladores al mismo tiempo, en el cual solo se requiere de dos líneas de señal y el común. Generalmente la velocidad de comunicación de los buses i2c ronda al redor de los 100 Kb/s. La comunicación se puede llevar a cabo en dos diferentes configuraciones, en serie y síncrona, en cualquiera de ellas, una de las señales es encargada de marcar el tiempo de reloj (pulsos de reloj), mientras que la otra es la que trasmite y recibe datos[37]. Los buses de comunicación del protocolo i2c se describen a continuación:

SCL: Bus encargado de los pulsos de reloj sincronizados para la comunicación.

SDA: Bus encargado de transmitir y recibir los datos de la comunicación.

GND: Bus que conecta el común de la comunicación i2c como la de los dispositivos externos y que interactúan con el bus de comunicación.

Para la etapa de comunicación por i2c del sistema, se hace uso de un módulo que usa el integrado PCF8574AT que realiza una comunicación i2c, el módulo se muestra en la figura 47.

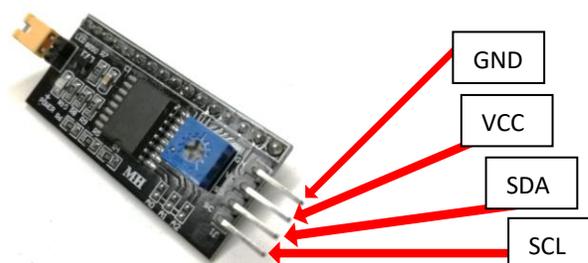


Figura 47 Módulo con integrado PCF8574AT de comunicación i2c usado.

Con el desarrollo de este segundo capítulo, logramos esclarecer aún más la hipótesis inicial, ya que, al realizar una investigación en áreas adversas a la electrónica, enriquece aún más la idea principal de desarrollar el dispositivo propuesto en el capítulo uno. También se puede observar, algunos métodos, circuitos, protocolos de comunicación, sensores y temas propios de la ingeniería electrónica que fueron pensados para hacer cumplir la hipótesis propuesta. En el siguiente capítulo se comienza a poner en práctica la ingeniería electrónica para desarrollar las simulaciones, diseño en sistemas CAD, diseño de circuitos electrónicos entre otros; para poner en práctica lo indagado en los capítulos anteriores.

Capítulo III DISEÑO Y SIMULACIÓN

Una vez obtenido el resultado del análisis y la propuesta mostrada en el capítulo uno, se dio seguimiento a la etapa experimental, dando así paso al manejo de softwares para la simulación de circuitos electrónicos y de sistemas CAD como Fusion 360 para analizar la interfaz mecánica, de igual manera se generaron pruebas de trabajo para obtener valores de los resultados del sistema y generar un criterio dentro de la toma de decisiones que definirán el resultado final. Para alcanzar el objetivo propuesto, el trabajo fue dividido en dos partes elementales, en el sistema mecatrónico para el sensado y el procesamiento de la señal de fuerza. En este capítulo comenzaremos a obtener resultados en relación fuerza-voltaje los cuales dan una primera impresión de cercanía a los objetivos que se buscan satisfacer.

3.1 SISTEMA DE SENSADO ELECTRÓNICO

Se llevo a cabo el diseño y fabricación de un sistema analógico para la calibración de celdas de carga para tomarlo de referencia al momento de trabajar con el sistema digital por medio del Psoc 5 LP y así asegurar que existe una relación entre los resultados de ambos sistemas.

Teniendo en cuenta que el sensor que se usara para medir la deformación generada en una estructura mecánica, es la galga extensiométrica debido al costo accesible y a la gran variedad de aplicaciones y formas que de ellas presentan dentro del área de la electrónica se llevaron a cabo prácticas con galgas extensiométricas para la interpretación de las celdas de carga, por lo cual se generó a partir del pegado de la galga extensiométrica al material de estudio, en este caso se realizó sobre una lámina de aluminio. Posteriormente se realizó la simulación del circuito que lleva la configuración del puente de Wheatstone junto con el sensor de deformación. Esto se realizó en el software de simulación Multisim como se muestra en la figura 48.

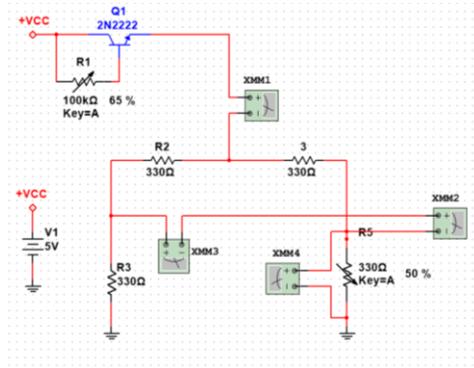


Figura 48 Diagrama de puente de Wheatstone en Multisim.

Como se puede notar, en el circuito del puente de Wheatstone se colocó una fuente de 5 volts conectada a su vez con un transistor 2N2222 y un potenciómetro de 100kΩ, esto para regular la corriente que se le demande a la fuente de voltaje, ya que se usó una batería de 9 volts para que el usuario no tenga problema alguno con la fuente de alimentación y pensando en aplicaciones portátiles.

De igual manera se llevó a cabo la simulación de la fuente de 5 volts con demanda de corriente regulable a $I_{in}=3\text{mA}$ en Multisim, así como se observa en la figura 49.

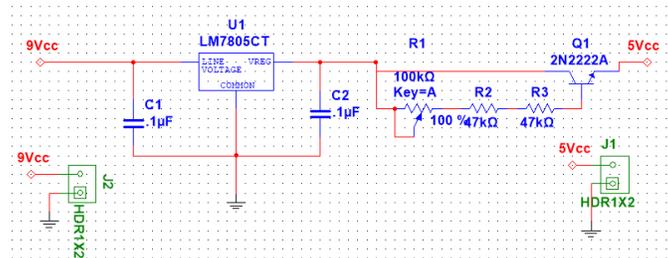


Figura 49 Diagrama de fuente de 5 volts con corriente ajustable.

Una vez simulado tanto la fuente de alimentación como el circuito del puente de Wheatstone, se llevó a cabo la fabricación de las tarjetas electrónicas en el software de Ultiboard para así evitar problemas de ruido durante la prueba con la galga extensiométrica. Los diseños se muestran a continuación en la figura 50 que posteriormente son fabricados.

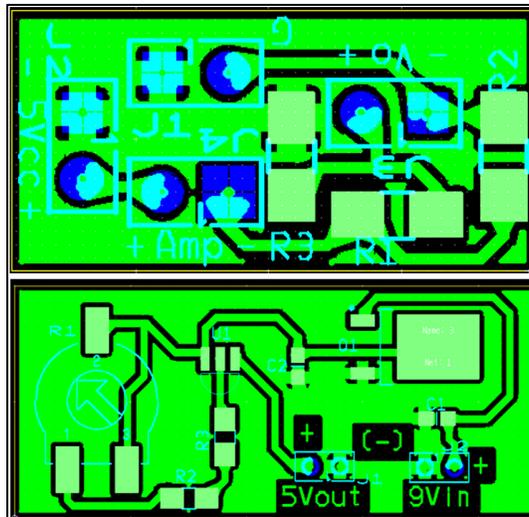


Figura 50 Diseño de los circuitos en Ultiboard.

Una vez diseñado y fabricado el circuito de la fuente de alimentación limitada para el circuito del puente de Wheatstone, se realizó la conexión del circuito junto con la galga extensiométrica ya adherida a la pieza mecánica para observar su comportamiento, con lo cual se observó la caída de tensión que pudo generar la variación de resistencia dentro del arreglo de Wheatstone por medio de la galga, y el consumo de corriente que la carga genera. Para llevar a cabo la prueba del consumo del sistema donde interactúa el sensor, se sustituyó la galga extensiométrica por un trimpot de ajuste fino de 500Ω para simular la variación de resistencia que se genera al interactuar con la interfaz mecánica, teniendo en cuenta que la resistencia de la galga en reposo es de 350Ω se toman valores cercanos a 320Ω hasta los 380Ω para darle un marco de referencia de $\pm 30 \Omega$ en los valores máximos de flexión en los que la galga puede trabajar y variando el incremento de cinco en cinco ohms.

Una vez obtenidos los valores de voltaje limitando la corriente de consumo a 10mA , se volvieron a tomar los valores para una corriente de consumo de 5mA y 1mA consecutivamente. El resultado que se pudo observar se muestra en la figura 51 donde se muestra la gráfica del comportamiento de cada uno de los datos a diferentes corrientes de consumo, se observa que la sensibilidad decrece conforme limitamos la corriente de consumo a la fuente que alimenta al puente de Wheatstone, de la misma forma se observa que existe una caída de tensión similar a cada grafica durante la variación de resistencia del sensor de deformación.

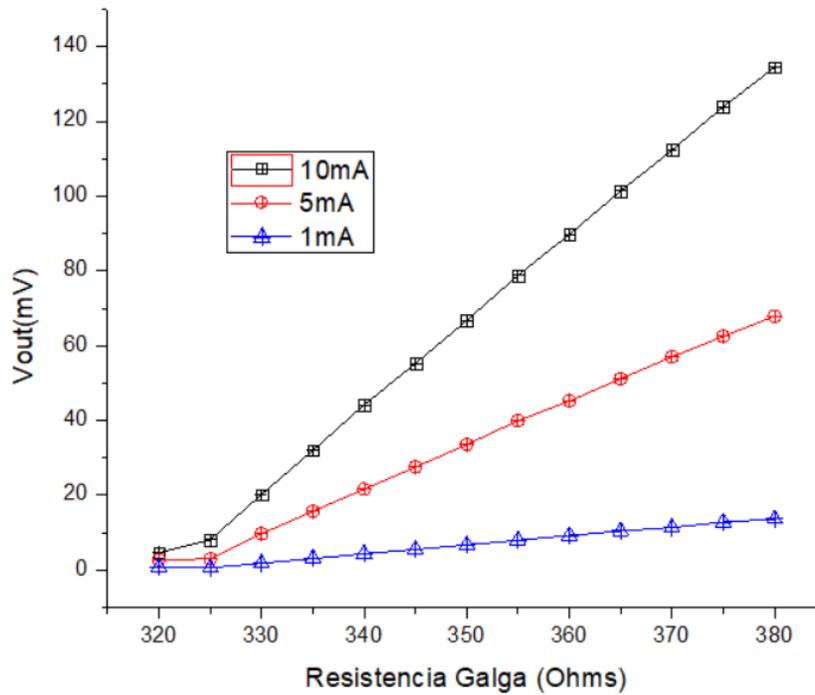


Figura 51 Gráficas de la variación de resistencia del sensor a diferentes corrientes de consumo.

Posteriormente, se analizaron cada una de las señales por separado para observar el comportamiento de la corriente durante el trabajo con el puente de Wheatstone, así como lo observamos en las figuras (52, 53, 54), se aprecia el consumo de corriente que cada uno de los casos presente.

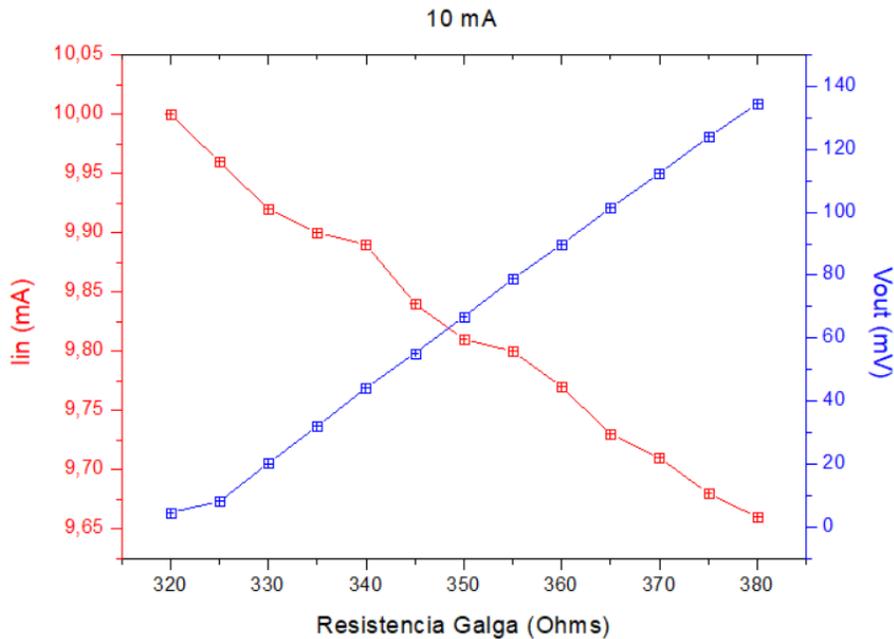


Figura 52 Gráficas de consumo de corriente 10mA.

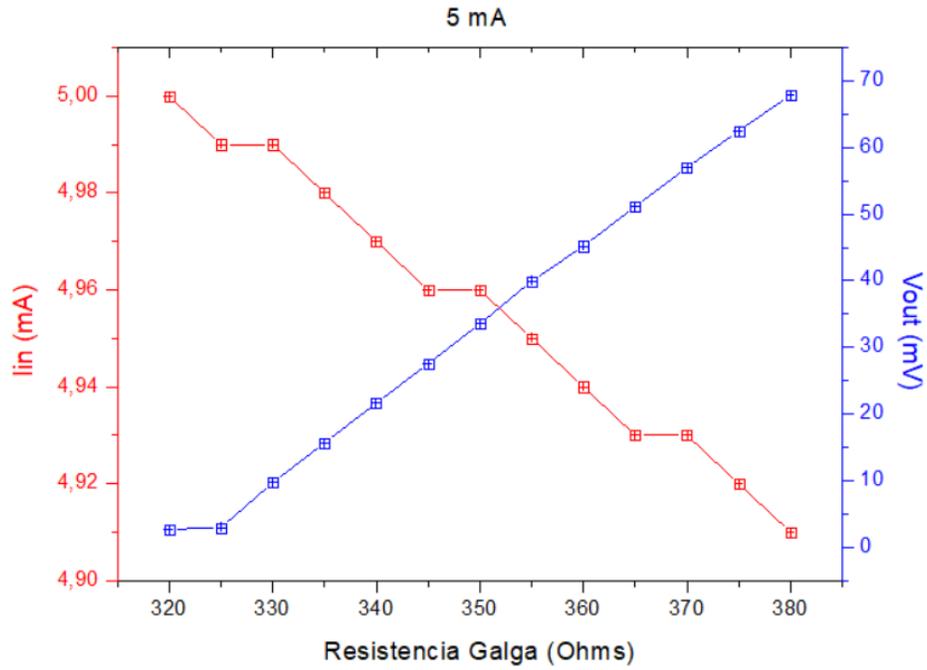


Figura 53 Gráficas de consumo de corriente 5mA.

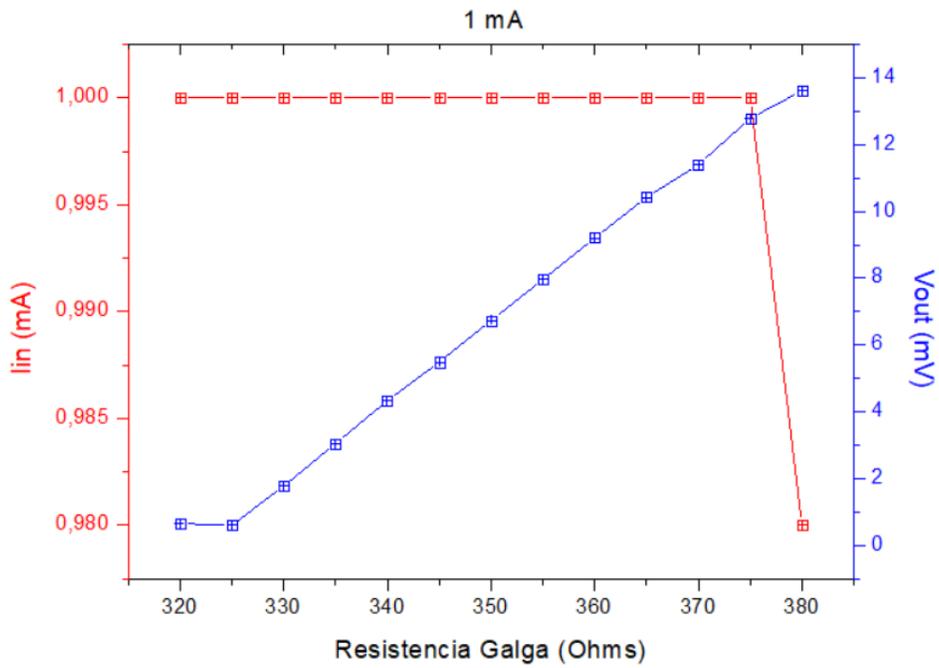


Figura 54 Gráficas de consumo de corriente 1mA.

Por último, se tomó la decisión de trabajar con una corriente de consumo limitada de 3mA para no trabajar en los límites de los valores obtenidos durante las pruebas, teniendo la certeza que la sensibilidad puede ser manejada.

Una vez obtenida la fabricación de las tarjetas electrónicas se realizaron pruebas de funcionamiento a diferentes demandas de corriente de la fuente de 5 volts para observar el caso más conveniente de trabajo y con una sensibilidad considerable. Una vez obtenidas las gráficas de sensibilidad se realiza la etapa de pre-Amplificación con un amplificador de instrumentación AD620AN con una ganancia de 500 dada por la fórmula 15[38]:

$$\text{Ecuación 15. } G = \frac{49.4k\Omega}{R_G} + 1$$

$$R_G = \frac{49.4k\Omega}{G} + 1$$

$$R_G = \frac{49.4k\Omega}{500} + 1$$

$$R_G = 99.8\Omega$$

$$R_G \approx 100\Omega$$

Posteriormente se llevó a cabo el diseño de una placa electrónica como la que se muestra en la figura 55 que integra el amplificador de instrumentación AD620AN, una base para un Arduino nano que mostrara el voltaje de calibración de la galga o de la celda de carga, y un escalador de voltaje que procesara la señal previamente amplificada para adecuar el 0 y el span del sistema.

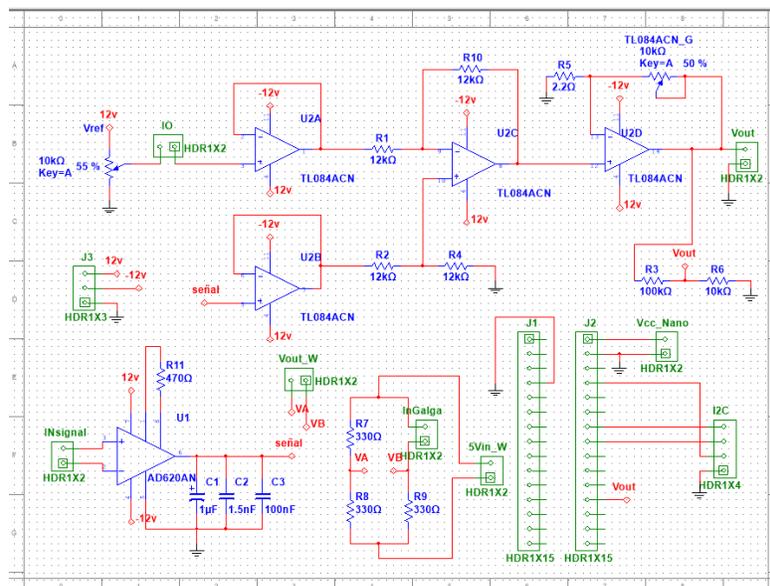


Figura 55 Circuito eléctrico del módulo de calibración.

Una vez diseñado el circuito electrónico en Multisim del amplificador de instrumentación con el escalador de voltaje, se llevó a cabo el diseño de la placa PCB en Ultiboard como se muestra en la figura 56 donde se integrará la tarjeta Arduino nano como interfaz para visualizar las respuestas del sistema.

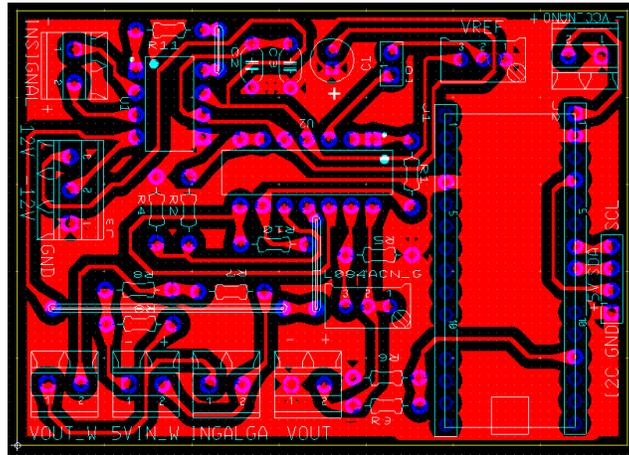


Figura 56 Diseño de PCB en Ultiboard del amplificador y escalador de voltaje.

Una vez integrado todo el sistema, se realizaron las pruebas de funcionamiento de la celda de carga construida observando que el valor del cero y del span podían ser ajustado de acuerdo con el peso que se ocupaba o de la tensión de la lámina de aluminio como se observa en la figura 57, o poniendo un peso patrón para definir el valor del span y posteriormente compararlo con otros pesos, siguiendo el mismo principio de una báscula de pesos.

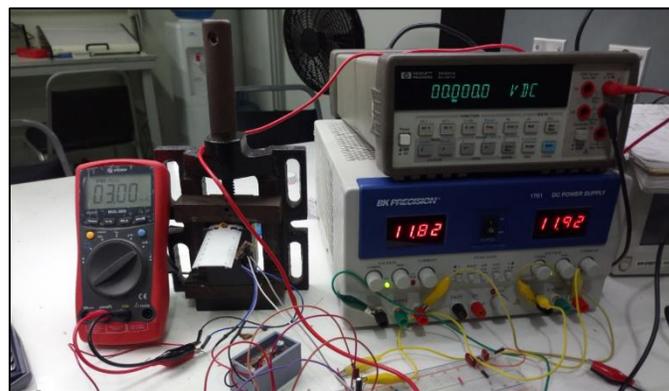


Figura 57 Prueba de funcionamiento PCB del amplificador y escalador.

Después de generar la fabricación del sistema electrónico se llevó a cabo el diseño de un clúster en Fusion 360 mostrado en la figura 58 para contener toda la parte electrónica y agregar una pantalla LCD para visualizar las salidas del sistemas, así como a su vez, entradas y salidas del tipo BNC para conectar la entrada hacia una arreglo de resistencias en configuración de puente de Wheatstone

que se encuentra integrado en el PCB, al igual que una entrada para conectar una celda de carga que ya contiene en su estructura un arreglo de resistencias y solo se requiera percibir la señal de salida durante el trabajo.

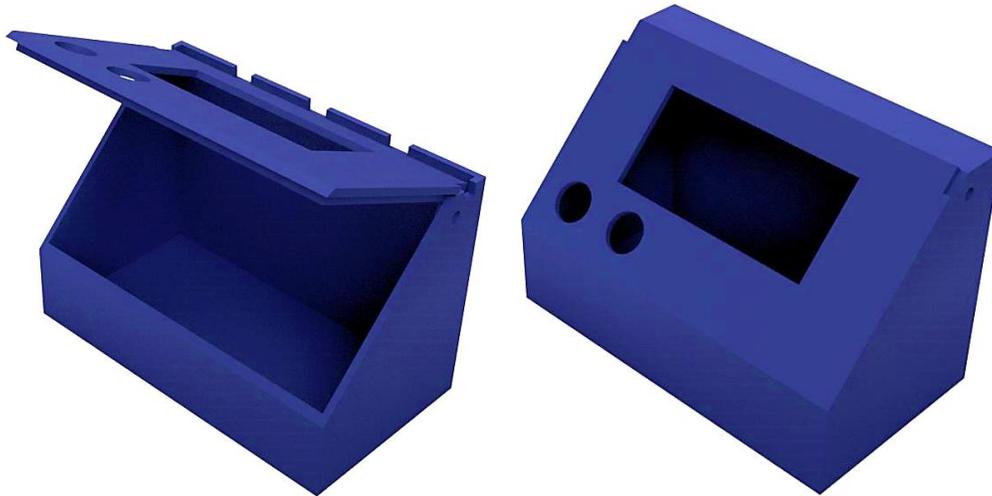


Figura 58 Clúster para módulo de calibración.

Posteriormente se adaptó el módulo de calibración para celdas de cargas el cual pudiese trabajar en los valores de fuerza aplicada por la mano humana que van desde los 20 KgF a 25 KgF. Dentro de los valores de mediciones antropométricas de la mano, se encuentra un valor llamado fuerza máxima de agarre, el cual consiste en la fuerza máxima de agarre con una mano durante un periodo de tiempo.

3.1.1 Obtención de datos del sistema de sensado

Para obtener los datos del sistema se aplicó una fuerza constante a de 25kgF a una celda de carga, que, por medio del módulo de calibración, se ajustó a 5 volts (Span) a la salida de la fuerza aplicada. Posteriormente se hizo uso del multímetro HP HEWLETT PACKARD 34401A, el cual tomó los valores del voltaje por medio de un cable de datos GPIB-USB 34401 el cual por medio LabView tal como se muestra en la figura 59, se tomaron 1000 muestras cada 0.5 segundos, en la siguiente figura se observa el módulo conectado a la celda de carga aplicando fuerza con el medidor de fuerza colocado en el módulo de tensión.



Figura 59 Modulo de calibración con módulo de tensión.

Dentro de los resultados obtenidos, se observó un error de desplazamiento de voltaje desde 5.50 mV hasta 5.30 mV en un tiempo de 8.3333 minutos (500 segundos) dando una diferencia de 20mV, este error puede ser considerado como un error de drift debido tanto por los cambios de temperatura en el sistema, la variación en los valores de resistencias eléctricas ocupadas en el circuito o por el simple hecho de la fatiga de que sufre el material de la celda de carga al ser sometida a una fuerza sobre una constante de tiempo.

En la figura 60 podemos observar el comportamiento del error que se obtuvo durante la medición y posteriormente en la figura 61 observamos en la salida escalada mostrando que aun así se muestra como una salida casi constante.

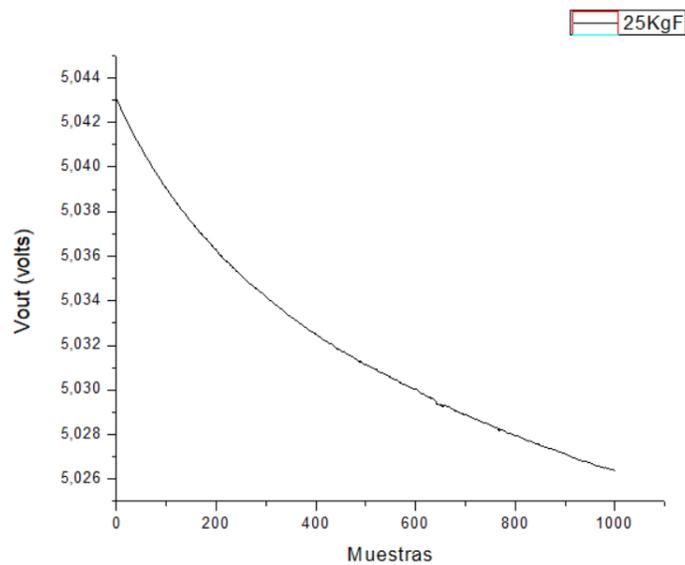


Figura 60 Gráfica de salida de voltaje del módulo ajustado a 25 KgF.

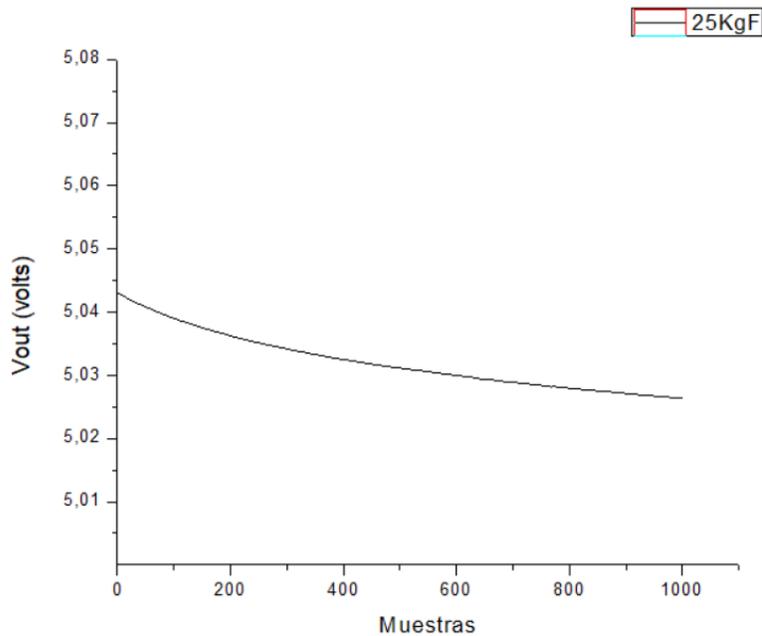


Figura 61 Gráfica de salida de voltaje escalado del módulo ajustado a 25 KgF.

Este resultado nos demuestra que la salida de voltaje del módulo de calibración puede ser considerada como estable, y ocuparla para obtener otras medidas de voltaje a diferentes estimaciones de fuerza, teniendo en cuenta que la fuerza de agarre máxima dada por el ser humano está alrededor de los 25 KgF.

Posteriormente se ajustó el span a 5, 3 y 1 volts para observar el comportamiento del sistema a diferentes fuerzas aplicadas como se muestra en la figura 62, que abarcan desde los 2 KgF hasta los 20 KgF y así también observar la sensibilidad de respuesta que se puede generar con la celda de carga.

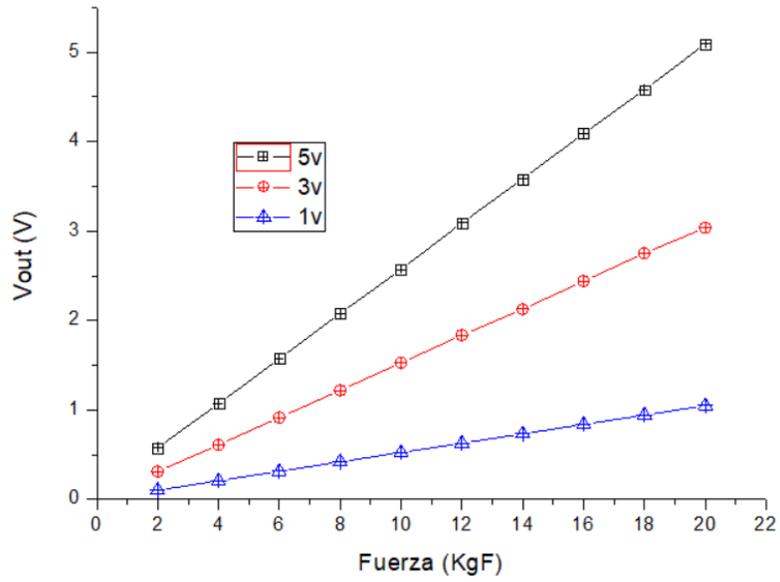


Figura 62 Respuestas de voltajes del módulo a 5v, 3v y 1v de span.

Mas adelante se tomaron tres veces datos de cada una de la graficas con cada uno de los span sobreponiendo los resultados correspondientes para obtener la repetibilidad de la respuesta del sistema, así como se observa en las figuras (63, 64, 65).

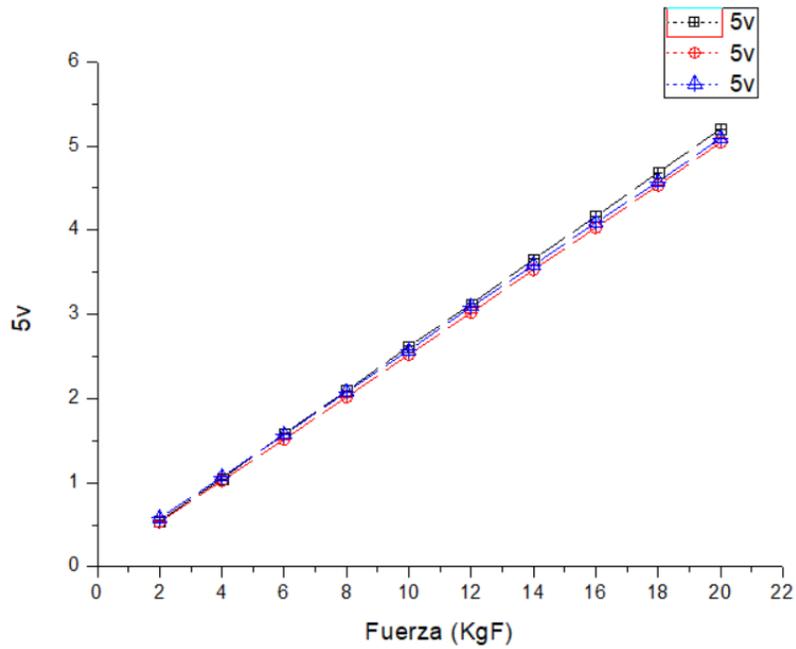


Figura 63 Gráfica de repetibilidad con span de 5v.

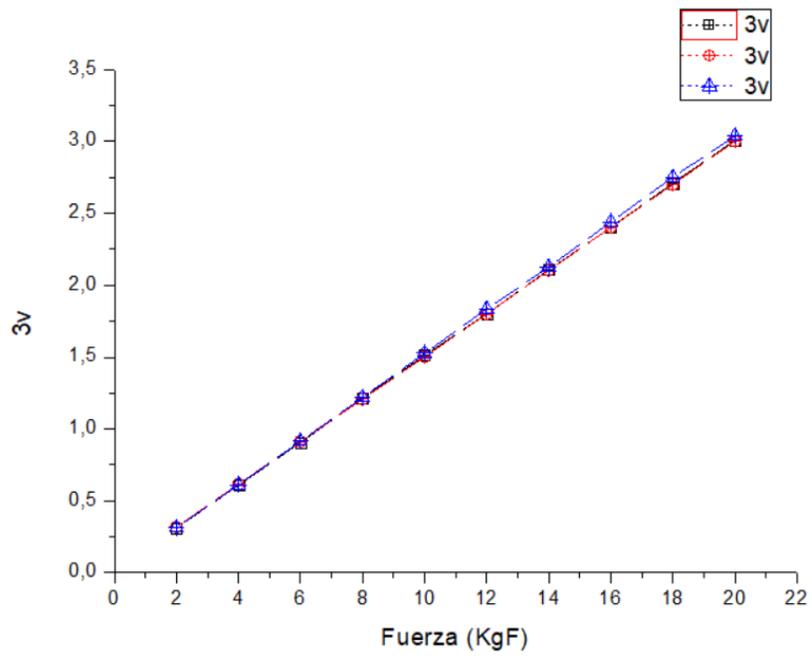


Figura 64 Gráfica de repetibilidad con span de 3v.

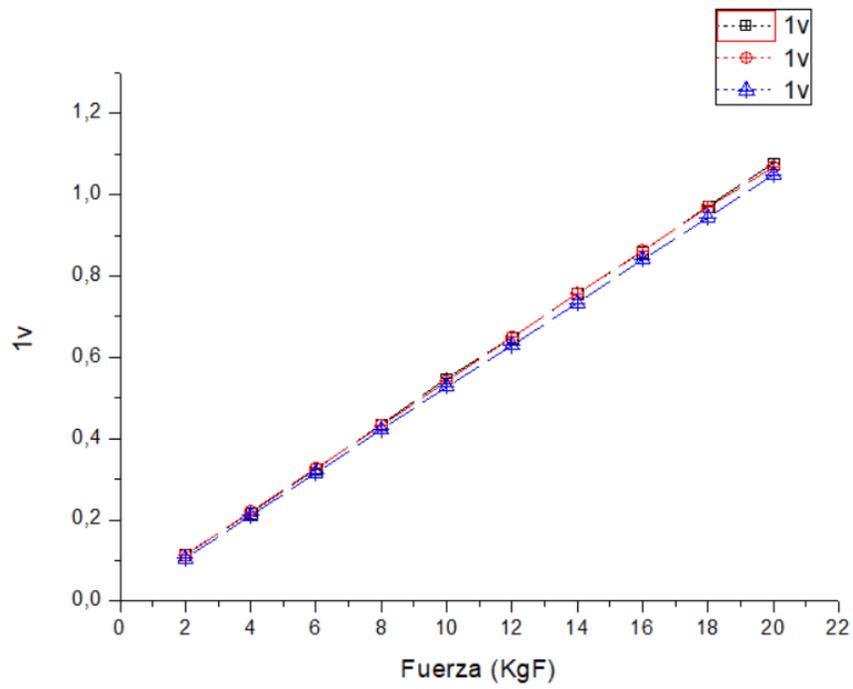


Figura 65 Gráfica de repetibilidad con span de 1v.

3.2 SISTEMA MECÁNICO

Para la interfaz mecánica se llevó a cabo el estudio y elección de una estructura mecánica denominada como viga en vértice, la cual se trata de una estructura alargada que está sujeta mecánicamente a una plancha o estructura mecánica y del otro extremo se encuentra suspendida. Lo que se logra apreciar es que cuando existe una fuerza aplicada en ella, se genera un punto de cedencia del material, el cual es el que refleja la deformación de la estructura, es posible reubicar la zona afectada realizando unos cortes al costado de la viga.

Se llevo a cabo la simulación de este tipo de configuración mecánica en Fusion 360 para analizar el comportamiento de este tipo de estructuras tal como se muestra en la figura 66.

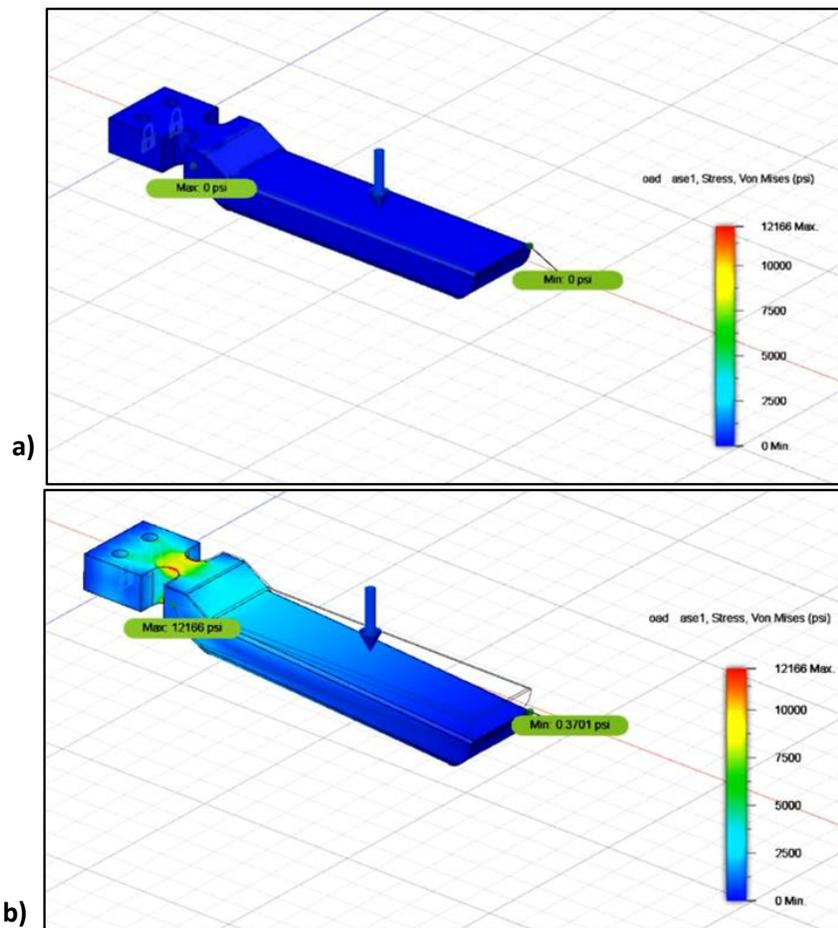


Figura 66 Simulación de deformación en Fusión 360 a) En reposo b) Bajo estrés mecánico.

Como podemos observar en la figura 66, se generó una prueba física a la estructura mecánica, la cual fue asignado a una aleación de aluminio 6061 material que será utilizado para la fabricación del joystick, la prueba se generó con una fuerza de 150 N que es un equivalente a un total de 15.2957

KgF el cual está dentro del rango de las medidas antropométricas de la fuerza de agarre de la mano, de igual manera la prueba presenta el valor máximo de psi que nos indica el módulo de elasticidad que alcanza con la deformación generada, el módulo de elasticidad del aluminio 6061 antes de pasar a un estado plástico o generar alguna deformación en el material como podría ser a su vez la ruptura, es de 20,000 psi, por lo tanto el material no llegaría a presentar algún déficit en su geometría durante el uso del joystick.

Posteriormente se realizó la misma prueba en el simulador de Fusion 360 para la estructura que medirá la fuerza de empuje y de jale que se presente al manipular el joystick, se bloquearon cuatro puntos de la estructura, los cuales son los que estarán sujetos a la base del joystick; la fuerza fue aplicada en el extremo superior del agarre, ya que allí se encontrara unido de forma mecánica el agarre de la mano.

Para la prueba se aplicó una fuerza de 150N, que es la misma que se consideró para el agarre anterior y se le asignó el mismo material de aluminio 6061 para generar el estudio. Como se observa en la figura 67, al momento de llevar a cabo la prueba, se observó que la deformación se generó justo en la parte de la base que sostiene la estructura, indicando la zona de mayor cedencia en la cual se colocaran las galgas extensiométricas para tomar el valor de la deformación.

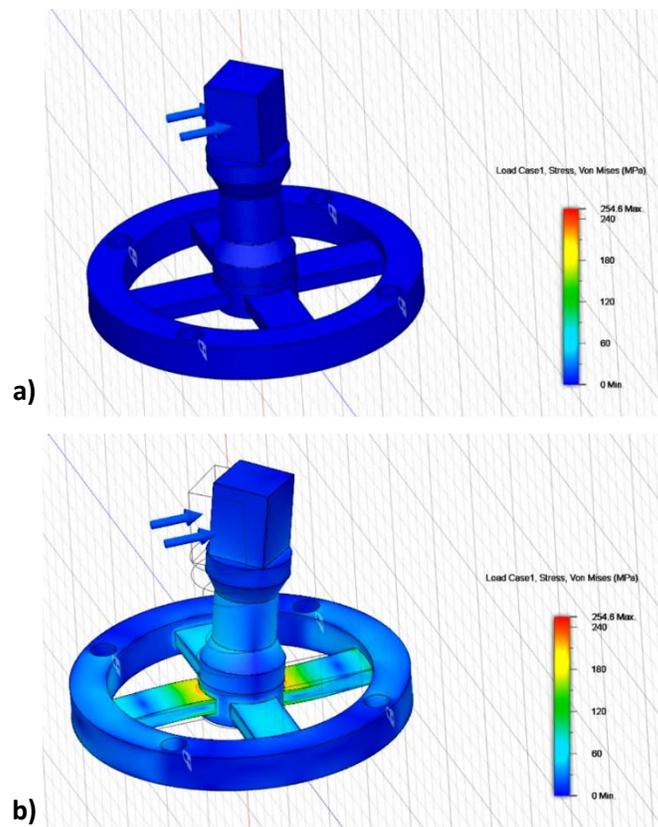


Figura 67 Sensor de fuerza aplicada simulado en Fusion 360, a) En reposo b) Bajo estrés mecánico.

Una vez realizadas las simulaciones del comportamiento de la estructura mecánica sometidas a valores de fuerza que sobrepasan los valores de fuerza que una persona con lesiones o alguna discapacidad pueden generar, se llevó a cabo la construcción de todo el joystick mecánico en Fusion 360, el cual muestra la ideal final para la estructura mecánica, así como lo podemos observar en la figura 68.

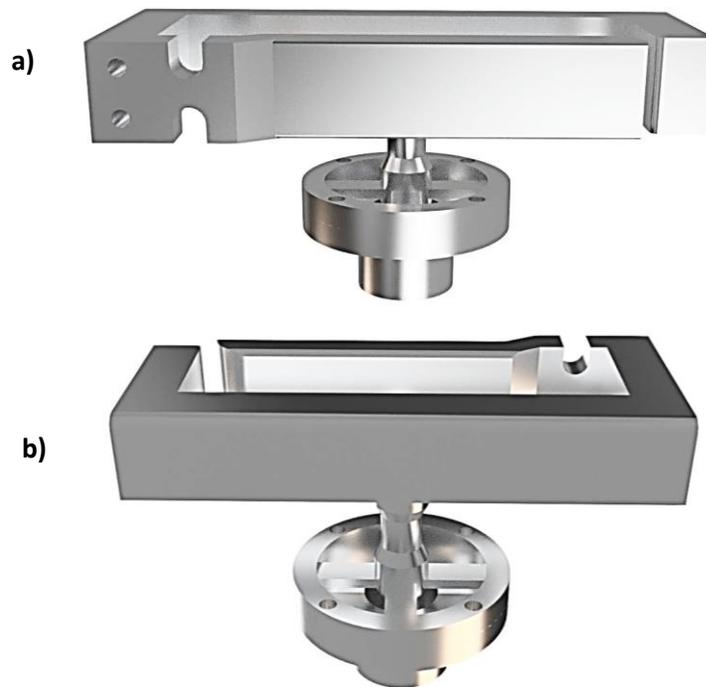


Figura 68 Joystick completo en Fusion 360, a) Vista frontal b) Vista trasera.

Posteriormente se realizaron los esquemas en 2D en Fusion 360 de cada una de las partes por separado de la figura mecánica, los diseños en 2D de cada una de las piezas mecánicas que componen al joystick se muestran en el Apéndice A de esta tesis.

3.3 DISEÑO Y MANUFACTURA DE LOS CIRCUITOS DE PUENTE WHEATSTONE

3.3.1 Circuito para medición de compresión digito-palmar

Para el diseño de una celda de carga con sensores extensiométricos resistivos, el circuito universal para la obtención de las variables de salida en voltaje es el puente de Wheatstone, así como se muestra en el marco teórico anteriormente presentado.

Para el diseño del circuito del puente de Wheatstone, se utilizaron las herramientas que nos proporciona National Instrument, las cuales son **NI Multisim** y **NI Ultiboard**. Para el sensor de fuerza de agarre se realizó el diseño de un circuito en el cual se integraron dos resistencias de smd y sus terminales para la etapa de alimentación y obtención del voltaje de salida. La figura 69 muestra el diseño realizado en NI Multisim.

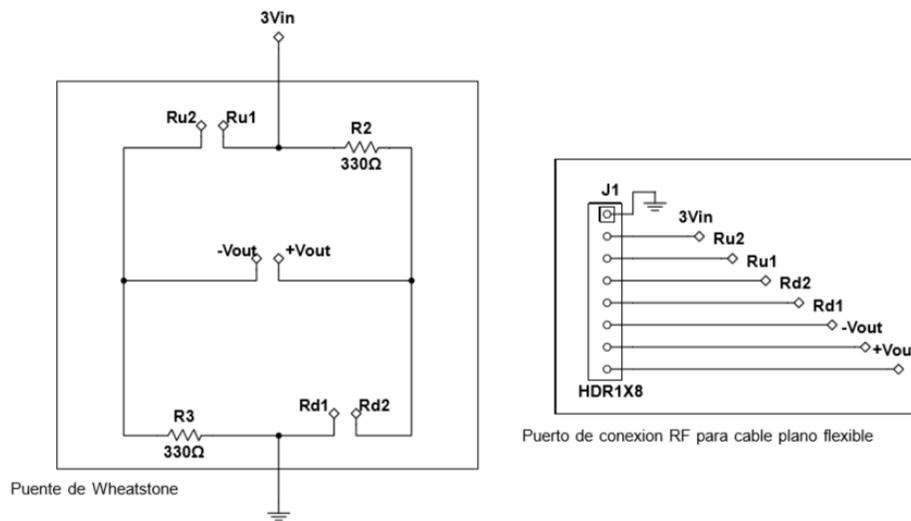


Figura 69 Diseño puente de Wheatstone.

Como se aprecia en el diseño de la figura 69, cada una de las terminales de conexión del puente Wheatstone, junto con el voltaje de alimentación y el voltaje de salida del circuito se conectaron a una tira de pines, con la finalidad de administrar las conexiones eléctricas. El diseño del pcb se realizó en NI Ultiboard, el cual se muestra en la figura 70.

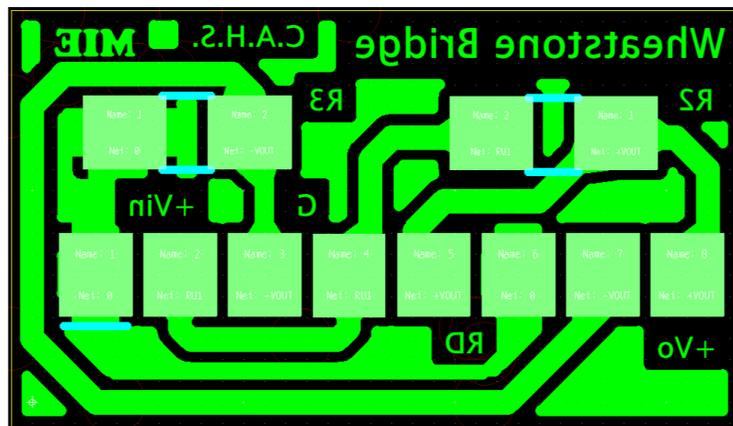


Figura 70 Diseño pcb puente de Wheatstone en Ultiboard.

El pcb fabricado se muestra en la figura 71, el cual fue manufacturado en una placa fenólica de 0.75mm de espesor con solo una cara de cobre, se llevó a cabo el soldado de las dos resistencias smd de valor 330Ω.



Figura 71 Soldado pcb puente de Wheatstone.

Después de realizar el soldado de las resistencias de smd, se adhirió el pcb al cuerpo del joystick con pegamento a base de cianoacrilato, ubicándolo cerca de los dos sensores donde posteriormente se soldó a los cables de calibre AWG 30, de las terminales de las galgas extensiométricas, la placa pegada y soldada se muestra en la figura 72.

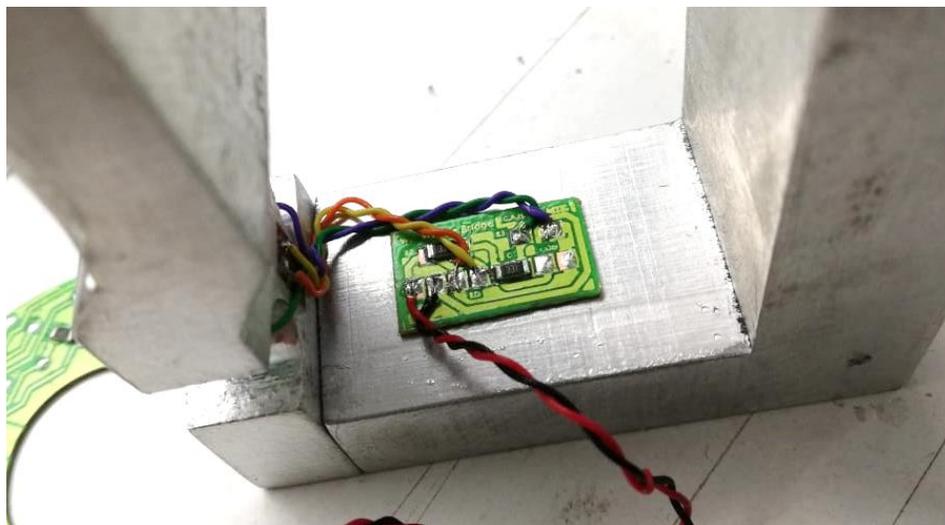


Figura 72 Adhesión de circuito puente de Wheatstone a estructura mecánica.

3.3.2 Circuito para medición de fuerza aplicada

Se diseñó el circuito electrónico con apoyo de NI Multisim, figura 73, en el cual se integran cuatro circuitos en configuración de puente de Wheatstone para cada uno de los pares de galgas extensiométricas adheridas a los ejes de medición de fuerza aplicada, de igual manera se realizó la conexión de un puerto de conexión RF el cual enviara los datos por medio de un bus de datos o cable plano flexible el cual se muestra en la figura 74, dicho cable cuenta con 12 vías de conexión para los valores de los voltajes de salida de los cinco puente Wheatstone diseñados para la lectura de los sensores de deformación, tiene geometría de fabricación plana, con valores de nominales de temperatura mínimo de -30°C (-22°F) y máximo 105°C (221°F) con una tensión nominal de 30V a 60V dentro de las especificaciones técnicas su hoja de datos. Dentro del mismo diseño del circuito eléctrico se integraron nodos de conexión para los cables de las galgas extensiométricas ya adheridas anteriormente; también se aprecian los nodos de conexión para el sensor de fuerza digito-palmar.

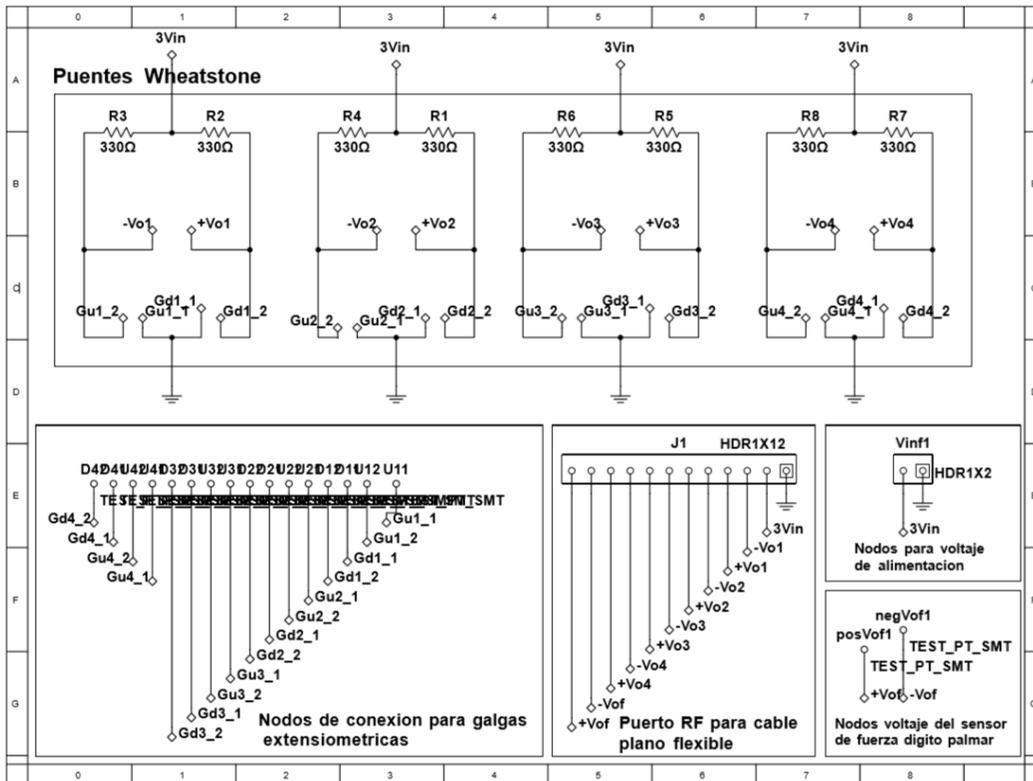


Figura 73 Diseño de 4 puentes de Wheatstone en Multisim.

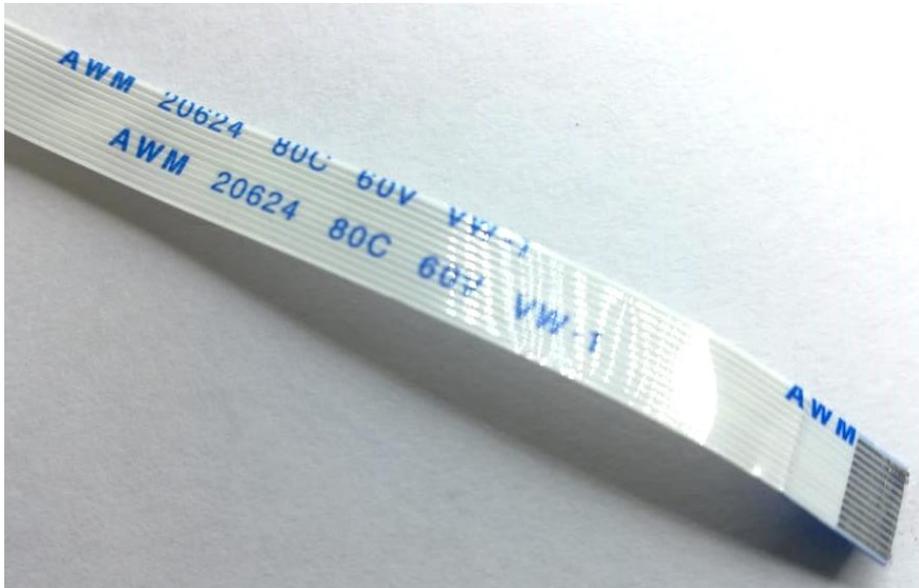


Figura 74 Cable plano flexible.

Por último, se manufacturo el circuito en una placa fenólica de 0.75mm de espesor con solo una cara de cobre, la figura 75 nos muestra el pcb terminado y soldado con cada uno de sus elementos.

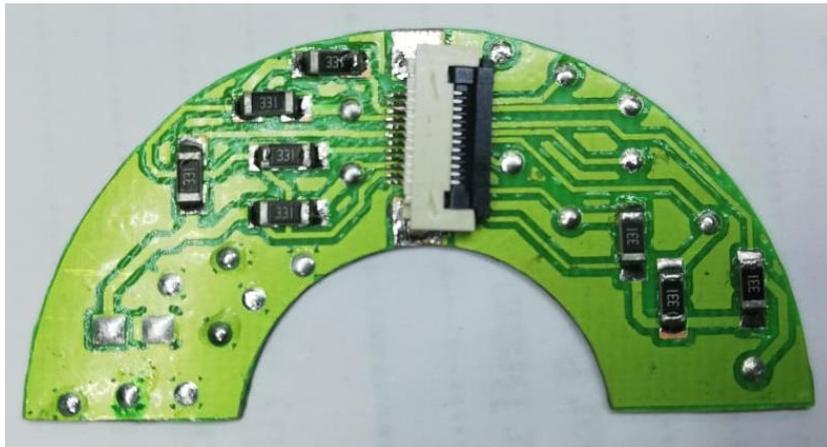


Figura 75 Placa soldada de 4 puentes de Wheatstone.

La geometría en forma de arco del circuito fue dada para respetar las restricciones mecánicas del joystick, ya que este, se integró justo por debajo del sensor de fuerza aplicada, como se muestra en las figuras (76, 77) sobresaliendo únicamente el bus para la conexión de datos al PsoC 5LP.

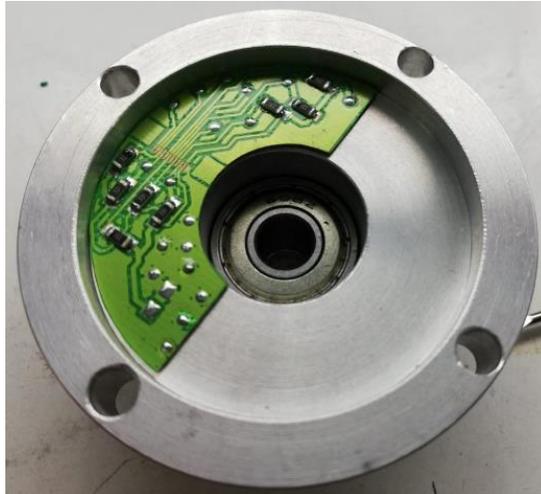


Figura 76 Pcb 4 puentes de Wheatstone adheridas a la estructura mecánica.



Figura 77 Sensor de fuerza aplicada armado.

Debido a la distribución de los cables que llevan el voltaje de cada una de las galgas extensiométricas se conectan al pcb elaborado para la integración de todos los voltajes, se optó por implementar otra placa con mayor dimensión para así otorgar mayor espacio a la conexión de cada uno de los electrodos, por lo tanto, se realizó el diseño en NI Multisim y posteriormente en NI Ultiboard, el diseño creado en NI Ultiboard se muestra en la figura 78.

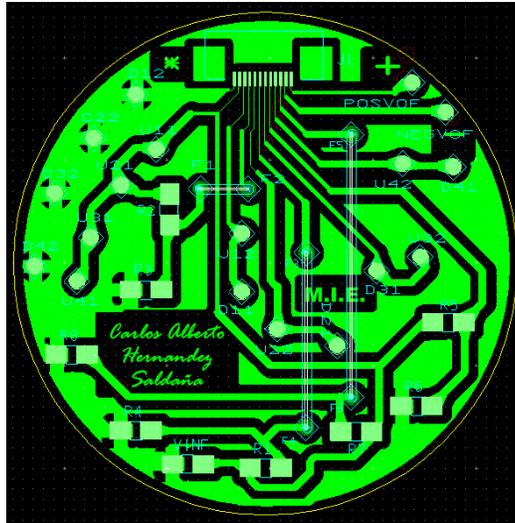


Figura 78 Diseño de placa para los cinco sensores de fuerza en Ultiboard.

Una vez realizado el diseño de la placa se prosiguió a su manufactura, en la figura 79 se muestra el pcb terminado.

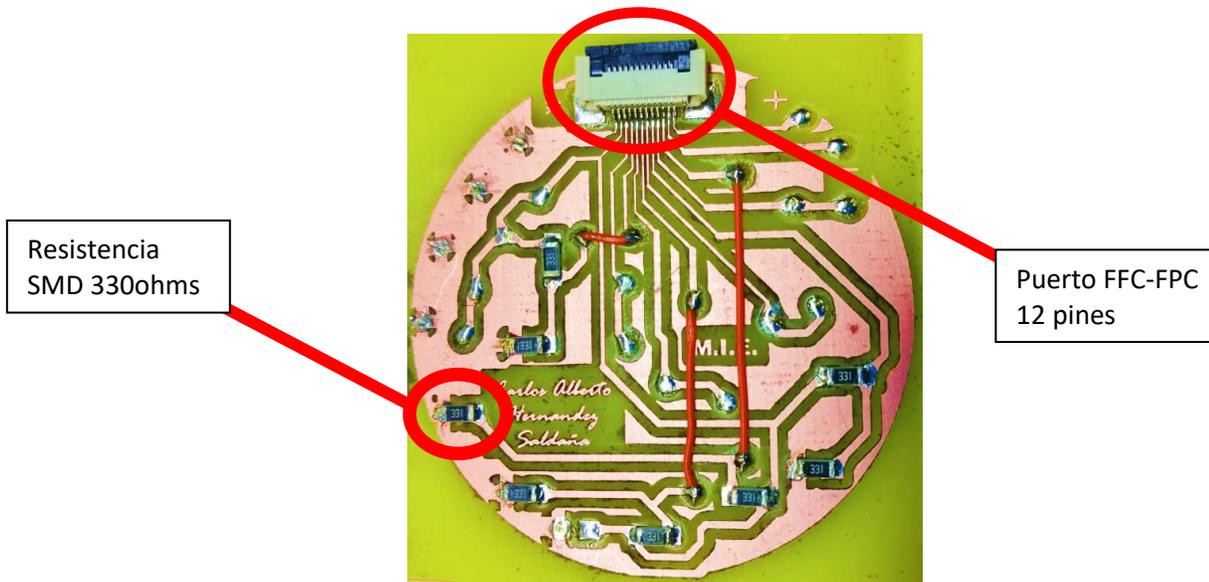


Figura 79 Manufactura del pcd de sensores de fuerza.

Como se puede observar en la figura 80 se le añadió un conector del tipo FFC-FPC de 12 pines con una separación entre pin de 0.5mm para conectar el cable plano flexible, el cual es que se encarga de albergar y transportar el voltaje obtenido de cada uno de los sensores de deformación hacia el circuito que integra al PsoC 5LP. En la figura 81 podemos observar la conexión final de la placa en el joystick hacia cada uno de los sensores de deformación.

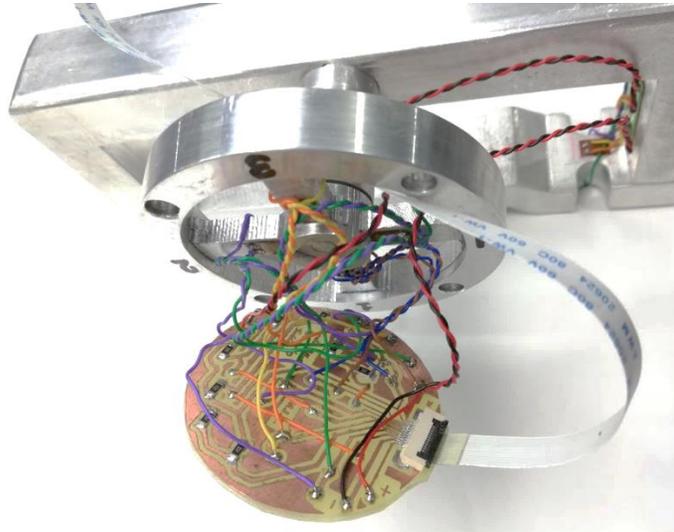


Figura 80 Integración del pcb al Joystick.

De igual manera, se soldaron cada una de las resistencias smd que conforman al puente Wheatstone. El cable utilizado para la conexión de cada uno de todos los electrodos es suma importancia debido a que determinara el área del contenedor donde se ubicara la placa, de igual manera debe cumplir con una conductividad eficiente, ya que este cable estará relacionado directamente con el voltaje de fuerza generado por los puentes de Wheatstone, por lo tanto sus resistencia eléctrica del mismo cable no debe interferir con las variables eléctricas del circuito y por ultimo pero no menos importante, la resistencia física del cable es un factor que determina sin duda la elección del cable a utilizar debido a que debe resistir la manipulación robusta, esto quiere decir, ser resistente ante jalones, o torceduras del mismo y no presentar fracturas. Puesto que es difícil disponer de un cable que cumpla con estas especificaciones y más de las de reservar una dimensión baja, se optó por utilizar alambre aislado AWG24/AWG30 en el cual presenta un diámetro de 0.2 mm sin aislamiento y de 0.6 mm diámetro con aislamiento, en la figura 81 se muestra el cable empleado para la conexión de la placa.

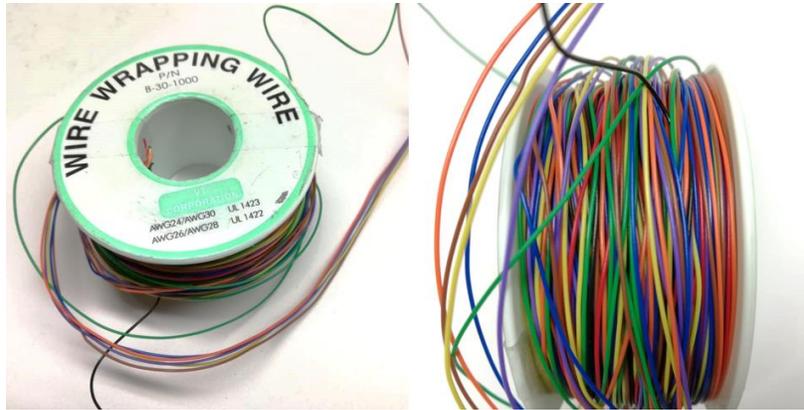


Figura 81 Cable AWG 30.

3.3.3 Circuito de procesamiento de señal

Una vez obtenida la instrumentación del joystick, se diseñó el circuito que contiene al microcontrolador y los módulos de comunicación i2c y bluetooth. En la figura 82 se muestra el diseño en NI Multisim de la placa que contiene al microcontrolador el cual fue realizado en una placa fenólica de doble cara.

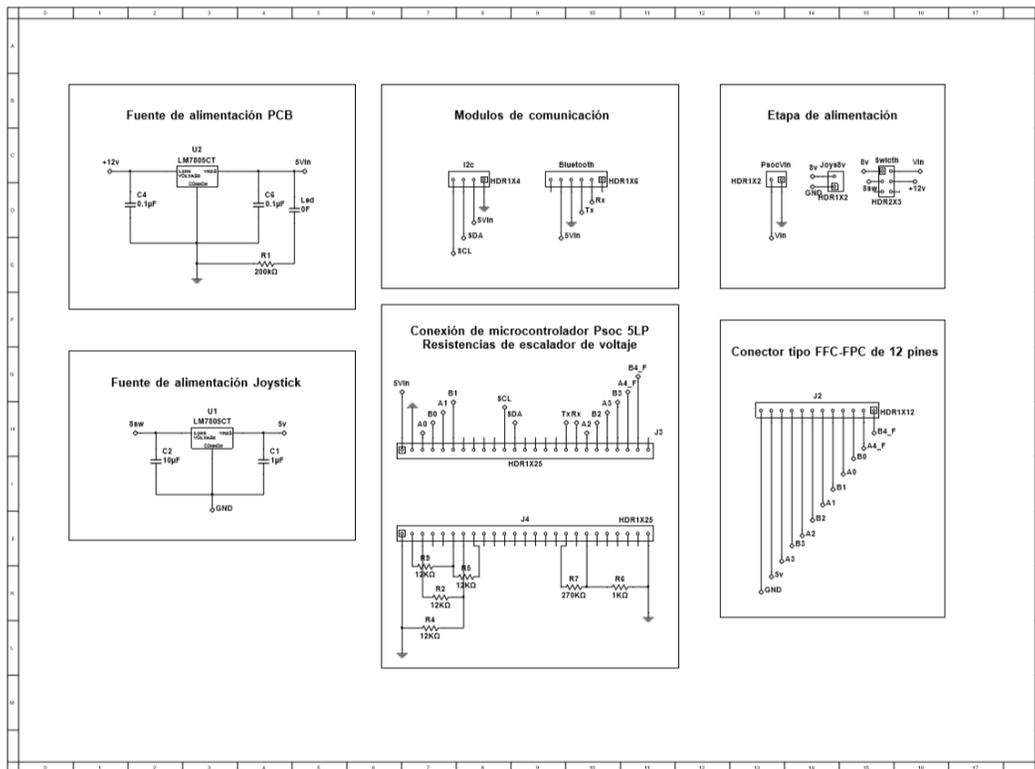


Figura 82 Circuito eléctrico de pcb para el microcontrolador.

El circuito está dividido en diferentes etapas, contiene la etapa de alimentación a la placa electrónica, dos fuentes de voltaje una para alimentar el microcontrolador junto con los módulos de comunicación y la pantalla LCD, también integra el conector para el cable plano que transfiere los datos de los voltajes de cada uno de los sensores. El diseño de la placa en NI Ultiboard, se muestra en la figura 83.

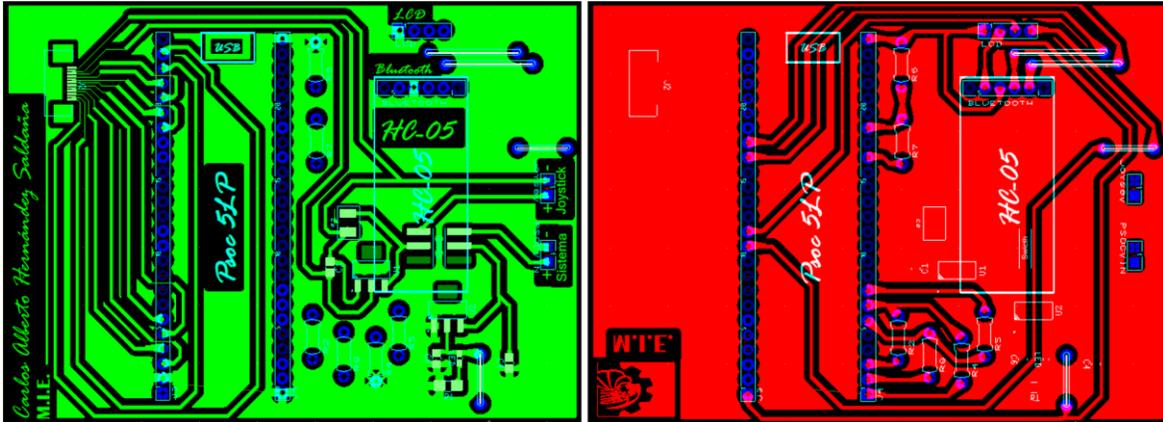


Figura 83 Diseño del pcb del microcontrolador en Ultiboard.

La figura 84 muestra la placa terminada junto con el PsoC 5LP, el módulo HC-05 de comunicación bluetooth y el porta baterías en formato AA para las fuentes de alimentación del circuito.

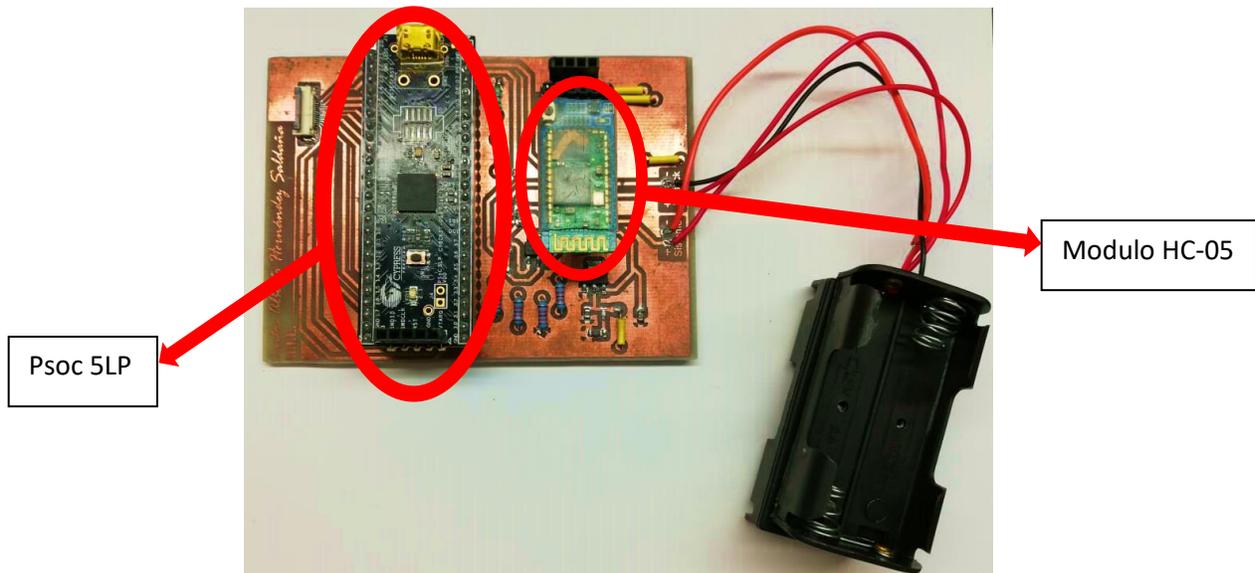


Figura 84 Pcb manufacturado con PsoC 5LP y modulo HC-05.

Tal como se planteaba en el inicio de este capítulo, se aplicó la electrónica para validar lo que se mostraba en capítulos anteriores, dando como resultado una respuesta satisfactoria que ya no

solamente apoya al desarrollo del joystick, sino que, da valores en graficas que se acercan a los resultados finales, pero aun así deben ser considerados como parte del procedimiento de la investigación para llegar a los resultados finales. Cabe resaltar que, en el desarrollo de este capítulo, se fabricó y usó un módulo para la calibración de galgas, en el cual es un producto que no llego a ser la versión final del medidor de fuerza, pero si un prototipo que puede ser usado para proyectos alternos al presentado en esta tesis. Por último, en el siguiente capítulo, se logra trabajar con el sensor de fuerza final, que fue diseñado a lo largo de este capítulo. Se llevará a cabo la integración de sensores de deformación en la geometría del joystick y se realizaran las pruebas finales del sistema.

Capítulo IV INTEGRACIÓN DEL JOYSTICK AL ROBOT PLANAR Y PRUEBAS FINALES

En el trayecto de este capítulo se mostrará la etapa de integración del sistema, el ensamble mecánico y la adhesión de los sensores de deformación, siendo un tema de suma importancia y único en su realización. De igual manera se mostrarán los resultados de las pruebas finales las cuales dan el valor agregado sobre la confiabilidad en los resultados obtenidos tras el desarrollo del proyecto.

4.1 MANUFACTURA DEL JOYSTICK

Como se determinó en la etapa de la simulación, el material seleccionado de fabricación fue el Aluminio 7071

Una vez llevado el proceso de manufacturación, se realizó el ensamblado de la interfaz mecánica del joystick, así como se muestran en la figura 85.

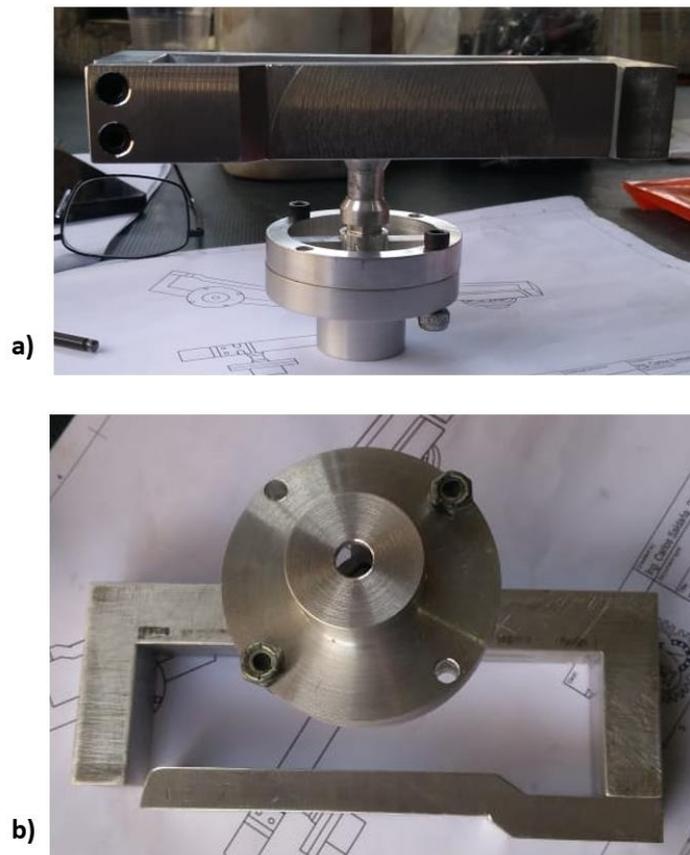


Figura 85 Joystick manufacturado en aluminio 7071, a) Vista frontal b) Vista inferior.

Una vez obtenido el maquinado completo de la pieza mecánica, se continuo a realizar el diseño en fusión 360 de la funda que recubrirá el agarre digito palmar, el cual cumplirá con dos objetivos principales, el primer objetivo, es delimitar y restringir el área de impacto al momento de interactuar con el joystick y así conseguir repetibilidad en los resultados

4.2 INTEGRACION DE SENSORES DE DEFORMACION

4.2.1 Adecuación de la superficie

Para llevar a cabo el pegado de los sensores de deformación a la estructura mecánica, fue necesario adecuar la superficie ya que el proceso del pagado de los sensores es único en toda la etapa de la fabricación de la celda de carga.

Se buscaron imperfecciones en la superficie del material, tales como grietas, porosidad, abultamientos, cualquier irregularidad que llegase a presentar alguna deformación en la galga extensiométrica y poder así interferir con la sensibilidad resistiva. Dicho proceso se muestra en las figuras 86.

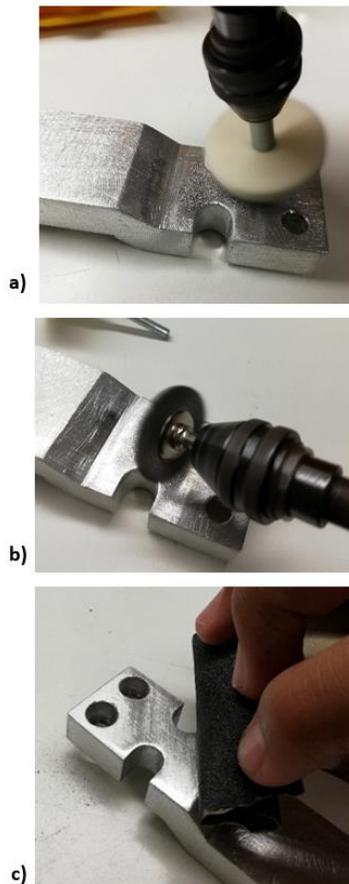


Figura 86 a) Pulido, b) Desbaste, c) Lijado de sensor de fuerza digito palmar.

Por último, se realizó una limpieza profunda de las piezas mecánicas, para retirar cualquier película de grasa, partículas generadas por el desgaste, polvo y agua.

4.2.2 Adhesión de los sensores de deformación

Una vez que se llevó a cabo la adaptación de la superficie, se siguió a adherir una por una de las galgas extensiométricas a las piezas mecánicas. Cuando se fabrica un sensor de fuerza se busca aprovechar el 100% de la eficacia de la geometría, es decir, encontrar el punto o la zona dónde se encuentre la mayor concentración de esfuerzo para de allí obtener la lectura de la variación de resistencia que nos otorgan los medidores de deformación. Por eso mismo se pensó en una estrategia para determinar dicha zona; se recurrió al diseño CAD de la celda de carga previamente diseñado y se tomó la simulación de elemento finito de igual manera previamente realizado, como referencia para encontrar la zona de mayor estrés y ubicar las galgas extensiométricas. Tomando en cuenta las dimensiones reales de la celda de carga se colocó un punto en la pieza mecánica, de igual manera se colocó el punto en la simulación de elemento finito, dicho punto se tomó como un origen o cero, esto para coincidir desde un mismo punto de partida, tanto real, como dentro de la simulación. A partir de este origen coincidente, se colocaron varias puntas de pruebas a una distancia de 1 mm entre ellas, en sentido hacia donde se observaba a simple vista una mayor deformación dentro de la simulación, tal como se muestra en la figura 87.

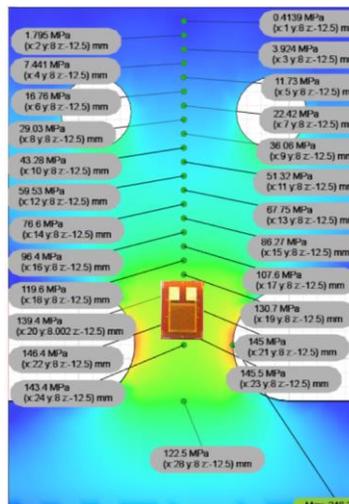


Figura 87 Puntos de prueba de estrés sensor de fuerza digito palmar.

Las puntas de prueba dan información del estrés que sufre el material en ese origen, el estrés lo arroja en unidades de mega Pascales (MPa). Una vez obtenida la información del estrés del material se dio paso siguiente para realizar por medio de Origin Pro 8, una gráfica con cada uno de los valores

que se muestran en la figura 88, para observar la razón de cambio y la sensibilidad que muestre el sistema, la gráfica nos indica en el eje de las ordenadas la variación del estrés del material en MPa, mientras que en el eje de las abscisas, apreciamos la distancia en la que se encuentran cada uno de los puntos de prueba.

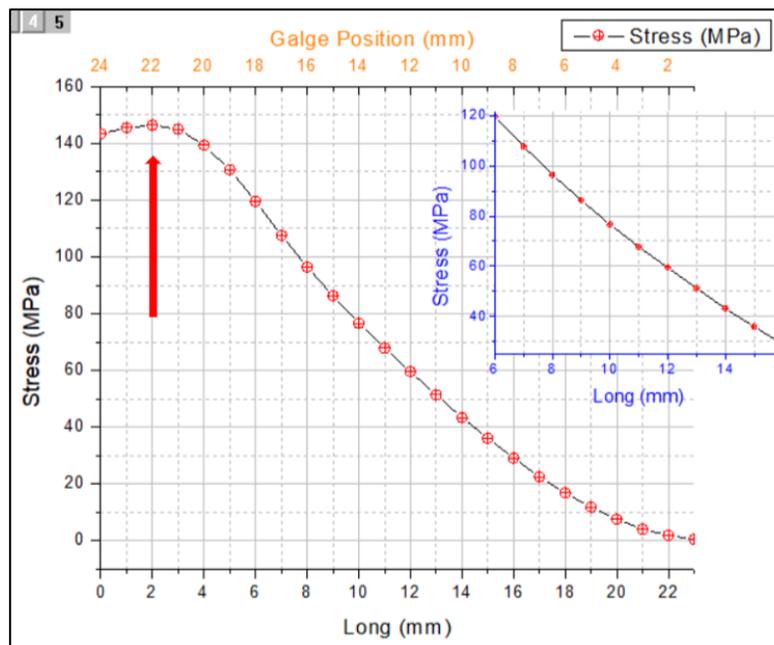


Figura 88 Gráfica posición de galga en sensor de fuerza digito palmar.

Retomando aun la figura 88, señalamos con una flecha roja el punto con mayor estrés dentro del sensor mecánico, el cual fue el punto donde se colocó el inicio de la rejilla de la galga extensiométrica, ya que de acuerdo a la teoría anteriormente señalada, la rejilla de la galga no debe quedar centrada en el punto de mayor estrés debido a que no se obtendría una lectura optima de la deformación, mientras que si la rejilla tiende hacia una zona donde seda la tensión generada, se obtendrá una sensibilidad aun mayor, esto siempre y cuando, la flexión que presente la galga extensiométrica no comprometa una deformación permanente en el sensor de fuerza. Para colocar la galga extensiométrica, una vez que se indago sobre el punto estratégico para su ubicación, fue necesario guiarse con la simulación y la distancia de los puntos de prueba para trazar la ubicación en la pieza mecánica, una vez obtenida esta información trazada, se procedió al pegado de la galga, colocándola encima de pieza mecánica guiándose por medio de los triángulos de orientación hechos del mismo material de la rejilla que contiene la galga extensiométrica y con la cara que tiene impreso el diseño en cobre-niquel boca arriba; con ayuda de una cinta adhesiva, se recubrió el sensor de deformación sin mover su ubicación, posteriormente, se levantó con mucho cuidado la cinta

adhesiva para no afectar la galga y para no perder el origen de la posición de interés; todo esto mencionado se aprecia en la figura 89.



Figura 89 Ubicación de la zona de adhesión de galga extensiométrica.

Después de tener lista la galga extensiométrica para su pegado se colocó sobre la superficie una gota de pegamento a base de cianoacrilato de secado instantáneo, teniéndose cuidado de no poner en exceso para evitar dejar una moldura de pegamento debajo del sensor de fuerza. Una vez colocada la galga extensiométrica, se presionó firmemente sobre de ella por detrás de la cinta adhesiva y se froto hacia los extremos del sensor de deformación para retirar el exceso de pegamento que se pudiese presentar. Después de haber pegado la galga uniformemente se retiró con mucho cuidado de no estropear la galga extensiométrica la cinta adhesiva. La figura 90 muestra el resultado de la galga extensiométrica pegada a la estructura mecánica.

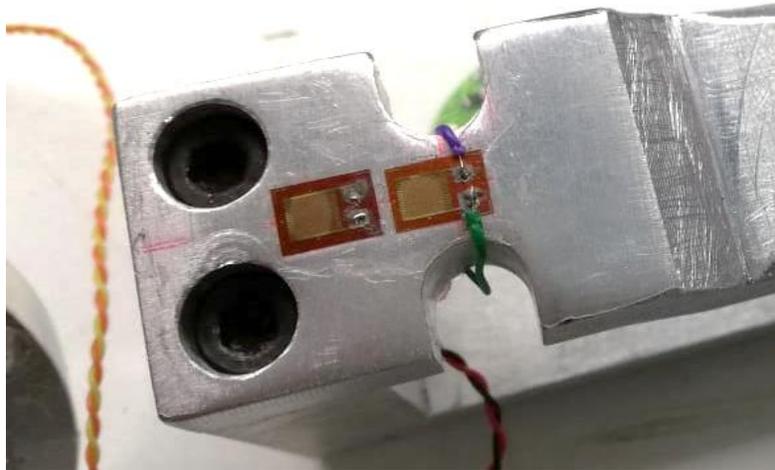


Figura 90 Soldado de galga extensiométrica adherida.

Como se observa de igual manera en la figura 90, se soldaron las terminales de la galga extensiométrica, para ello se usó soldadura en pasta **Mechanic Sn63 / Pb37 42 gms**, la cual es una soldadura hecha a base de polvo con 63% de estaño y 37% plomo con flux.

Al momento de soldar el sensor de fuerza se requirió tener en demasía precaución con la temperatura del cautín, debido a que en la hoja de datos de la galga que se usó **BF-350**, recomienda una temperatura de entre los 135°C hasta los 165°C, esto debido a que, si se trabaja con otros valores de temperatura, se puede dañar la estructura de esta o puede variar su valor resistivo debido a la excesiva temperatura.

En el caso de las galgas que se pegaron en la estructura mecánica de la figura 94, las cuales se dedican a medir la deformación ocasionadas por el empuje y jale del usuario al momento de interactuar con el joystick, se siguió el mismo procedimiento.

Como tal se comenzó por la adecuación de la superficie, llevando a cabo la inspección de la zona, con ayuda de lijas para pulir y quitando imperfecciones, así como se realizó con la primera galga, la figura 91 muestra este proceso mencionado.



Figura 91 Lijado de sensor de fuerza aplicada.

Para la adhesión de las galgas, se llevó a cabo la simulación de elemento finito de la estructura mecánica tomando en cuenta los puntos de sujeción del joystick, en la figura 92 se muestra la simulación de elemento finito realizada.

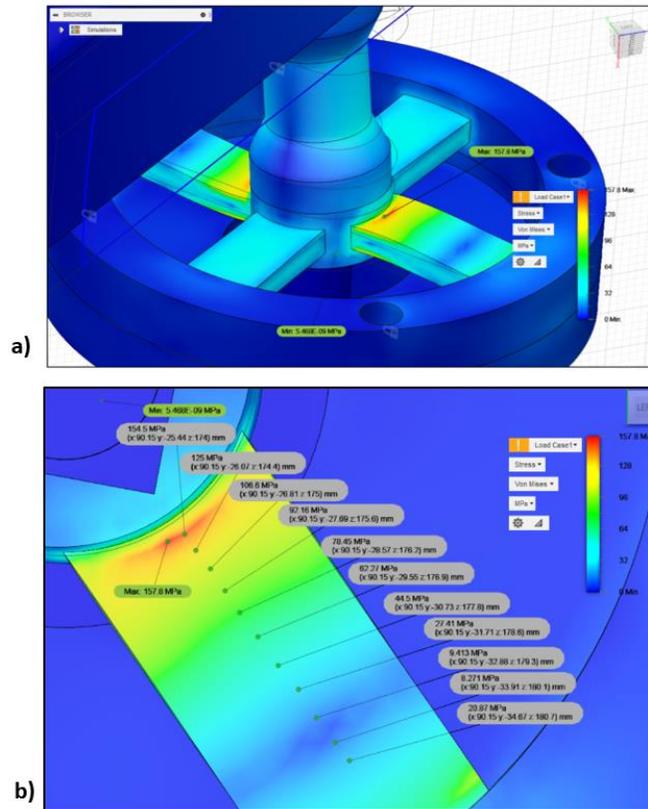


Figura 92 Puntos de prueba con valores de MPa.

En la figura 91, se muestra el mismo concepto utilizado para determinar la posición de la galga extensiométrica, por medio de puntos de prueba colocados a lo largo de la estructura mecánica para obtener los valores de estrés en MPa, posteriormente se graficaron en Origin Pro 8, como se muestra en la figura 93.

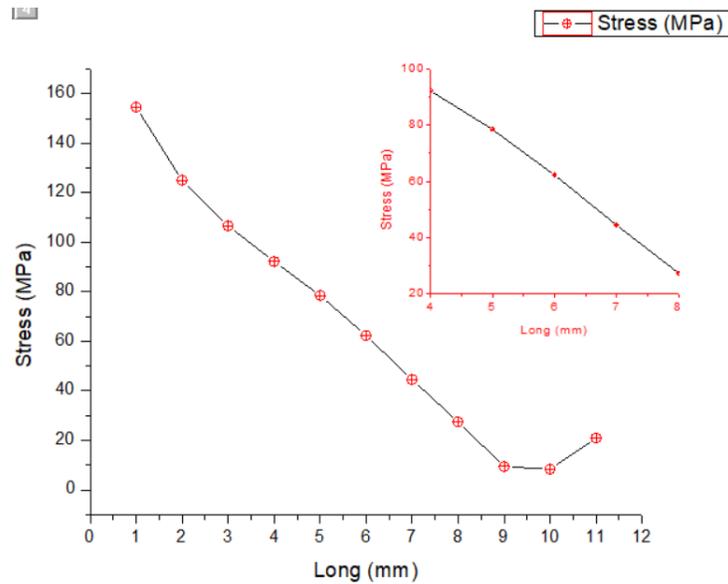


Figura 91 Grafica de posición galga sensor de fuerza aplicada.

El gráfico que nos mostró, se asemejaba a la primer grafica de estrés que anteriormente se habló, con esta información se obtuvo que el área que se presentó mayor estrés se encontraba en el primer punto de prueba, por esto mismo se tomó la decisión de colocar la rejilla de la galga a un milímetro de la parte central de la pieza guiándose con los triángulos de orientación que tiene en su diseño. Se realizó el mismo proceso con la cinta adhesiva y el pagamento cianoacrilato de secado instantáneo, en la figura 94, se aprecia la galga ya incorporada a la estructura mecánica.

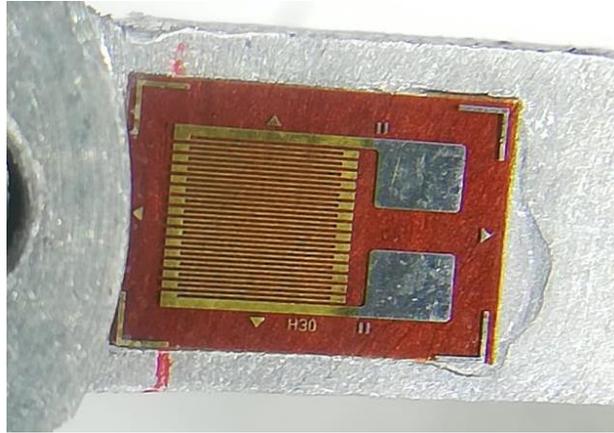


Figura 94 Galga extensiométrica adherida a sensor de fuerza aplicada.

Una vez realizado la adhesión de los ocho sensores de deformación a la estructura, se llevó a cabo el soldado de cada una de las galgas extensiométricas. El resultado final de la estructura con los 8 sensores de deformación soldados se muestra en la figura 95.

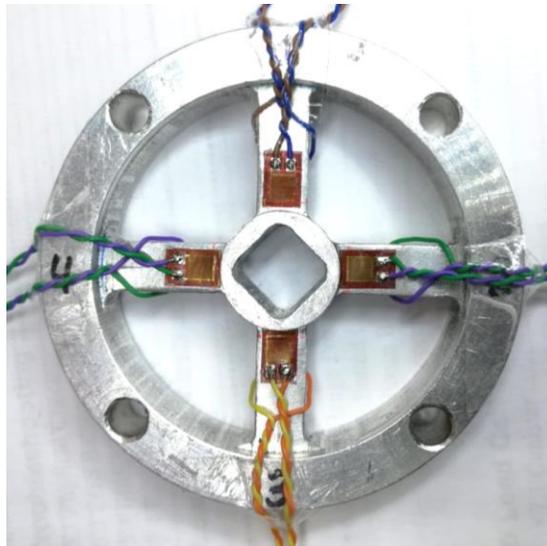


Figura 92 Sensor de fuerza aplicada terminado.

4.2.2 Metodología de galgas extensiométricas

Como se puede apreciar desde la etapa de adecuación de la superficie, adhesión de los sensores de fuerza y el soldado final de los elementos; presentan una un proceso repetitivo, lo cual cae en el desarrollo de una metodología práctica, ya que estos mismos pasos se usan para cualquier otro tipo de material, por ejemplo, cobre, plástico, acero, hierro por mencionar algunos. Teniendo en cuenta la repetibilidad de eventos para el pagado de galgas, en la tabla, se muestra la metodología básica pero fundamental para asegurar un buen pegado de galgas extensiométricas y poder así obtener

una señal de voltaje limpia, sin distorsión por la interfaz mecánica. A continuación, se muestra la tabla la cual muestra la metodología que se desarrolló en este trabajo de tesis.

Metodología para la integración de galgas extensiométricas BF-350	
Adecuación de superficie	<ol style="list-style-type: none"> 1. Identificar grietas, porosidad, abultamientos e irregularidades en la superficie a trabajar. 2. Pulido de la superficie. 3. Lijado 4. Remover por completo pintura, grasa, humedad, polvo, etc. Superficies metálicas o similares: limpiar con removedor.
Adhesión de sensores de fuerza	<ol style="list-style-type: none"> 5. Tener conocimiento de la zona con mayor estrés de la estructura mecánica. (Apoyo con simuladores CAD) 6. Trazar ubicación del sensor en la pieza mecánica. 7. Colocar sensor con ayuda de triángulos o marcas de referencias de este. 8. Cubrir con cinta adhesiva y alzar hacia un costado con demasía precaución. 9. Colocar pegamento (cianoacrilato), sobre la superficie. 10. Ejercer presión y frotar del centro hacia afuera del sensor por encima de la cinta adhesiva. 11. Retirar cinta adhesiva.
Soldado de terminales del sensor	<ol style="list-style-type: none"> 12. Seleccionar alambre recubierto calibre AWG 30. 13. Colocar soldadura en pasta (63% estaño y 37% plomo y flux), en las terminales del sensor. 14. Calentar cautín como mínimo 135°C máximo 165°C (En caso de usar BF-350).

4.3 PRUEBAS POR SENSOR DE FUERZA

Una vez diseñada, manufacturada la celda de carga y diseñados y manufacturados los circuitos electrónicos, se dispuso a realizar las conexiones eléctricas, para observar el funcionamiento del joystick y descartar anomalías en la salida de voltajes de los sensores de fuerza. La figura 96 muestra las pruebas realizadas por sensor.

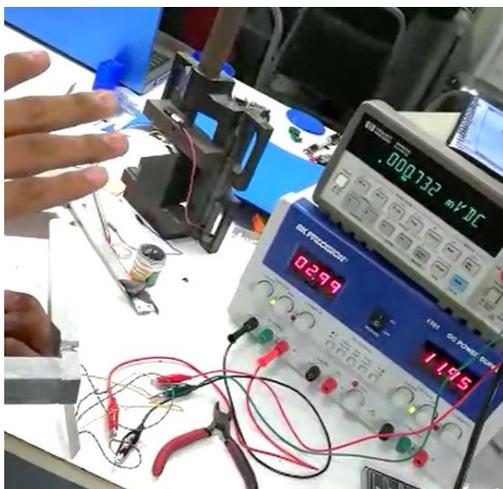


Figura 936 Mediciones de funcionamiento del joystick.

4.3.1 Caracterización del joystick

Se dispuso a realizar la caracterización del joystick para que fuese capaz de trabajar en el rango de interés. Pero antes de trabajar con el rango de voltaje que la celda de carga trabajara fue necesario tener información de la señal de entrada de todo el sistema, el cual, es la fuerza que aplique el usuario al manipular el joystick, para ello se realizó una previa investigación sobre medidas antropométricas de fuerza de la mano dominante, tal como se muestra en el desarrollo teórico, en el cual se obtenían resultados de que la media de fuerza que abundan en personas sanas es de 20 a 25 kgF.

Para cerciorar los resultados que se obtuvieron en la investigación, se hizo uso de un dinamómetro **Mark-10 Series 5 Modelo M5-50**, figura 97, el cual es un medidor digital de fuerza usado para pruebas de fuerza de compresión y tensión en numerosas aplicaciones. El cual dentro de su sistema digital es capaz de seleccionar diferentes medidas de fuerza como, 50 LbF, 800 OzF, 25 KgF, 25000 GF y 250 N.

Cuenta con una tasa de muestreo de 7000 Hz, una precisión $\pm 0.1\%$ y con una resolución 1/5000, además de que el modelo M5-50, tiene la peculiaridad de ser directamente compatibles con los bancos de prueba y/o empuñaduras.



Figura 947 Dinamómetro Mark-10 Series 5 Modelo M5-50.

El dinamómetro Mark-10 es unido al banco de pruebas que se muestra en la figura 98 que se encontraba en el laboratorio de interfaces multimodales para implementarlo con un agarre de sujeción digito-palmar.



Figura 958 Prensa mecánica.

Se realizaron diferentes medidas de la fuerza máxima de agarre respecto al tiempo, figura 99, y se obtuvo que la máxima fuerza fue de 19 kgF permitiéndonos trabajar con la fuerza teórica de 25 kgF sin correr el riesgo de sobrepasar los valores nominales del sistema.



Figura 969 Pruebas de fuerza máxima de agarre.

Una vez obtenido el valor de trabajo que se desea para la celda de carga, el cual preside de entre los 15 KgF hasta los 25 KgF, se llevó a cabo la integración del dinamómetro con el banco de trabajo y se buscó la forma de poder integrar el joystick al módulo de pruebas de tensión.

4.3.2 Delimitación de la zona de impacto

Fue muy importante tener controlada la orientación y ubicación de la zona en la que se aplicó la fuerza de compresión, en este caso, se tomó la decisión de tomar como referencia, la parte central del joystick, esto debido a las medidas antropológicas de la mano, el punto medio donde se aplicó la fuerza de compresión fue a la mitad de la superficie donde el usuario tiene una mayor interacción con la celda de carga. Con la información obtenida, se adaptó el dinamómetro para aplicar la fuerza el lugar anteriormente indagado, tal como se muestra en la figura 100.



Figura 97 Aplicación de fuerza por medio de prensa mecánica en el sensor de fuerza dígito palmar.

4.3.3 Pruebas de sensibilidad del sistema

Para las pruebas de sensibilidad del sistema, se siguió usando el dinamómetro **Mark-10 Series 5 Modelo M5-50** adaptado con la prensa mecánica. La primera prueba del sistema que se realizó fue la prueba de sensibilidad del sistema o también conocida como factor de escala del sistema, la cual como se observa en el marco teórico, es la pendiente de la curva de calibración del sensor la cual está dada por la mínima magnitud de entrada al sistema, la cual está dada en KgF, para producir una determinada magnitud de en la señal de salida dada en esta ocasión en milivolts.

Sabiendo esto, se tomó la decisión de agregar una señal de entrada controlada, tomando valores desde 2 KgF hasta 26 KgF, con aumentos de 2 KgF, registrando los valores de voltaje de salida que se encuentran en valores de milivolts. Como resultado a esta prueba se obtuvo la gráfica que se muestra en la figura 101.

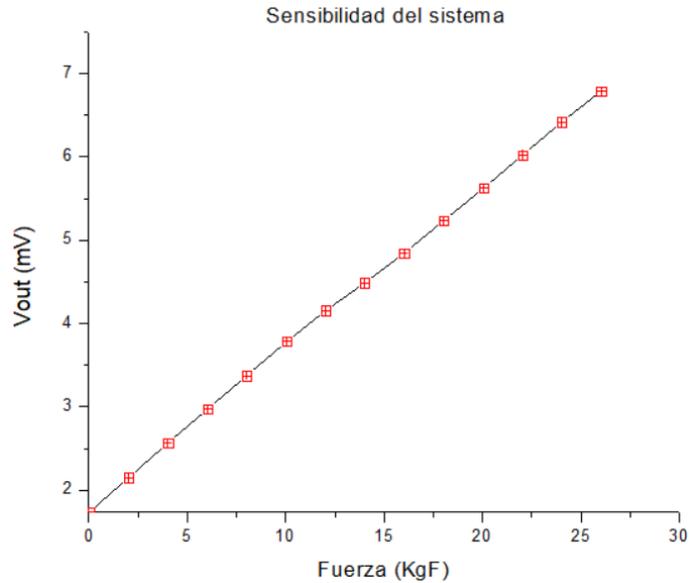


Figura 98 Gráfica de prueba de sensibilidad del sistema.

Como se puede observar, la respuesta que arroja el sistema tras esta prueba de sensibilidad es una respuesta lineal, por lo tanto, se obtiene la sensibilidad tomando dos puntos de la recta, el primer punto es tomado a los 6.015kgF y el segundo tomado a 18.005kgF; el cálculo se muestra a continuación:

Puntos considerados, $A(6.015, 2.94)$, $B(18.005, 5.241)$

Tomando en cuenta la fórmula de la pendiente $m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ y sustituyendo;

$$\text{Ecuación 16. } m = \frac{5.241 - 2.94}{18.005 - 6.015}$$

$$m = \frac{2.301}{11.99}$$

$$m = 0.19190$$

Por lo tanto, si tomamos en cuenta que:

$$6.015KgF = 2.94mV$$

Hacemos la relación para:

191.90mV

$$0.00019190V * 6.015KgF = 0.00115427$$

$$\text{Ecuación 17. } \frac{0.00115427}{0.00294V} = 0.3926117KgF$$

Como observamos la mínima resolución de fuerza que puede detectar el sistema es de 0.392611KgF

4.3.4 Prueba de repetibilidad del sistema

Como se muestra en el marco teórico, la repetibilidad es tomada como la cercanía entre los resultados de mediciones sucesivas efectuadas dentro de las mismas condiciones de medición, por ejemplo, el mismo instrumento, el mismo método de medición hasta la misma técnica de incorporar la variable física de entrada al sensor. Teniendo en cuenta que el número de mediciones mínimas para considerar la repetibilidad es de dos eventos.

De acuerdo con las condiciones para obtener el porcentaje de la repetibilidad del sistema, se realizaron tres veces las mediciones llevadas a cabo para obtener la sensibilidad del sistema tal como se muestra en la figura 102.

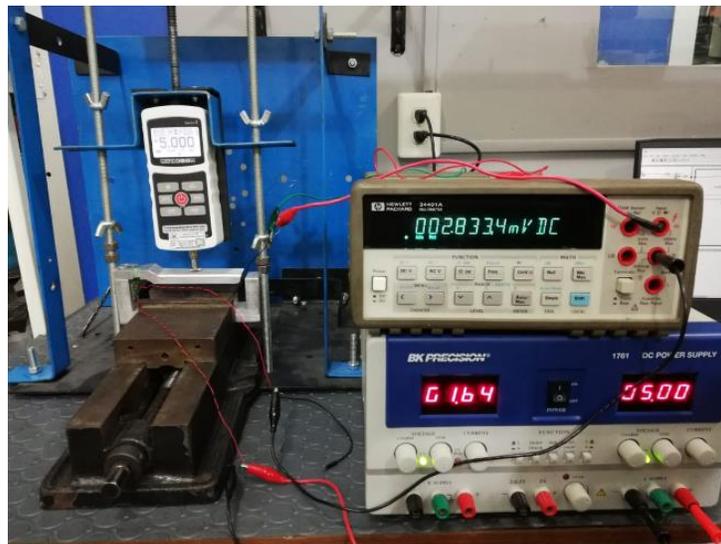


Figura 992 Pruebas de repetibilidad en el joystick.

Los resultados que se obtuvieron se almacenaron y se graficaron con ayuda de **Origin Pro 8**, tal como se aprecia en la figura 103, con el cual podemos apreciar que al graficar las tres señales de salida,

cada una independiente, se sobreponen, mostrando una similitud tanto como en la salida que presentan sin offset y su comportamiento lineal.

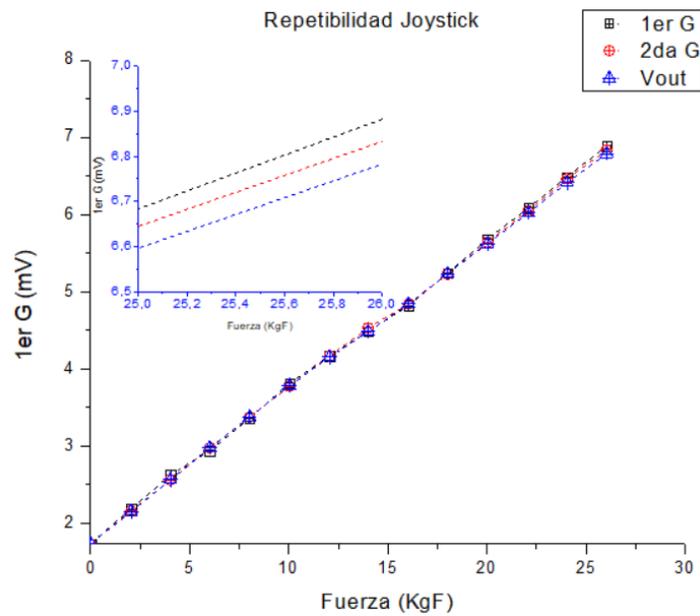


Figura 1003 Gráfica de repetibilidad del sistema, con desviación de señales.

4.3.5 Error del sistema

Para el análisis del error se llevó a cabo el cálculo del coeficiente de variación, el cual está dado de acuerdo con la ecuación 18.

$$\text{Ecuación 18. } CV = \frac{S}{\bar{X}} * 100$$

Donde:

S = Desviación estándar de los datos

\bar{X} = Media aritmética de los datos

Para ello se tomaron un total de veinte valores dados por el sistema del módulo de calibración y el sistema final con el Psoc 5LP para obtener un indicador del error en ambos sistemas.

Módulo de calibración		
Dato	Vout	$(X_n - \bar{X})^2$
1	0.0528	4.8841E-6
2	0.0511	1.52881E-5
3	0.0521	8.4681E-6
4	0.0543	5.04E-7
5	0.0546	1.681E-7
6	0.0554	1.521E-7
7	0.0548	4.41E-8
8	0.0545	2.601E-7
9	0.0545	2.601E-7
10	0.0546	1.681E-7
11	0.0559	7.921E-7
12	0.0561	1.1881E-6
13	0.0567	2.8561E-6
14	0.0552	3.61E-8
15	0.0563	1.6641E-6
16	0.0569	3.5721E-6
17	0.0562	1.4161E-6
18	0.0554	1.521E-7
19	0.0566	2.5281E-6
20	0.0565	2.2201E-6

Psoc 5LP		
Dato	Vout	$(X_n - \bar{X})^2$
1	0.00494	1.43073E-9
2	0.0049406	7.700625E-12
3	0.00494	4.730625E-12
4	0.0049398	3.900625E-12
5	0.0049393	2.175625E-12
6	0.0049399	4.305625E-12
7	0.0049387	7.65625E-13
8	0.0049395	2.805625E-12
9	0.0049401	5.175625E-12
10	0.0049398	3.900625E-12
11	0.0049397	3.515625E-12
12	0.0049394	2.480625E-12
13	0.0049398	3.900625E-12
14	0.0049391	1.625625E-12
15	0.0049392	1.890625E-12
16	0.0049389	1.155625E-12
17	0.0049396	3.150625E-12
18	0.0049393	2.175625E-12
19	0.0049388	9.50625E-13
20	0.0049396	3.150625E-12

Posteriormente se calculó la media aritmética y la desviación estándar de los datos del módulo de calibración, así como se muestra en las ecuaciones (19 y 20)

$$\text{Ecuación 19. } \bar{X} = \frac{1.1002}{20} = 0.05501$$

$$\text{Ecuación 20. } S = \sqrt{\frac{4.66219E-5}{20}} = 1.526792389E-3$$

Por lo tanto, el coeficiente de variación del módulo de calibración es igual a:

$$\text{Ecuación 21. } CV = \left(\frac{1.526792389E-3}{0.05501} \right) * 100 = 2.77548$$

Posteriormente se calculó la media aritmética y la desviación estándar de los datos del sistema con el Psoc 5LP, así como se muestra en las ecuaciones ()

$$\text{Ecuación 22. } \bar{X} = \frac{0.0987565}{20} = 0.004937825$$

$$\text{Ecuación 23. } S = \sqrt{\frac{1.4901868E-9}{20}} = 8.631879503E - 6$$

Por lo tanto, el coeficiente de variación del módulo de calibración es igual a:

$$\text{Ecuación 24. } CV = \left(\frac{8.631879503E-6}{0.004937825} \right) * 100 = 0.1748113694$$

Como podemos observar el coeficiente de variación de los datos de ambos sistemas es diferente, de acuerdo con la literatura es posible determinar que un sistema es repetible cuando el coeficiente de variación de sus datos es menor o cercano a la unidad. Por lo tanto, con esto concluimos que el módulo de calibración presenta resultados no repetibles debido a que su coeficiente de variación mostrado en la ecuación 21, está dado alrededor de 2.77, mientras que el sistema con el Psoc 5LP se considera repetible debido a que el valor del coeficiente de variación de su respuesta mostrado en la ecuación 24, está por debajo de la mitad de la unidad

4.3.6 Estudio de deriva temporal (Drift)

Teniendo en cuenta que la deriva instrumental de un sistema es la variación continua o incremental de una indicación a lo largo del tiempo, debido a las variaciones de las características metrológicas del instrumento de medida. Se realizó el estudio de la deriva temporal del sistema, realizando una lectura de los valores de salida durante el tiempo transcurrido de 300 segundos (5 minutos), el instrumento usado para la lectura de voltaje se realizó con el **HP34401a** el cual se muestra en la figura 104.



Figura 1014 Multímetro digital de alta resolución HP34401a

La comunicación de los datos fue realizada por medio de un cable de comunicación de datos **GPIB** el cual se muestra en la figura 105.



Figura 1025 Cable de datos USB/GPIB Agilent Technologies 82357A.

La recepción de los valores de voltaje se realizó por medio de LabView usando la librería del controlador del **Multímetro HP**, la programación realizada, se muestra en la figura 106.

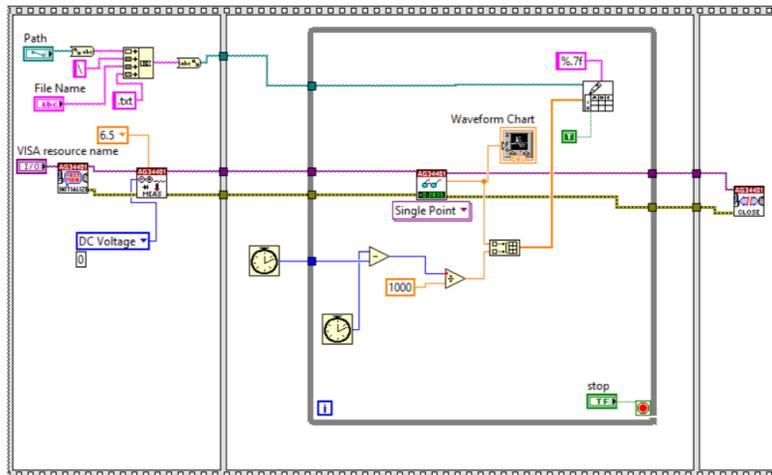


Figura 1036 Programación visual en LabVIEW para lectura de datos.

Para el estudio de deriva temporal se tomaron en cuenta tres constantes de fuerzas diferentes como variables de entrada al sistema la primera fue de 5KgF, la segunda se realizó con 15KgF y la tercera con 25KgF, todas durante un tiempo de 300 segundos, a rededor de 5 minutos, los resultados de los voltajes se almaceno y grafico con ayuda de **Origin Pro 8**, la figura 107, muestra los resultados obtenidos.

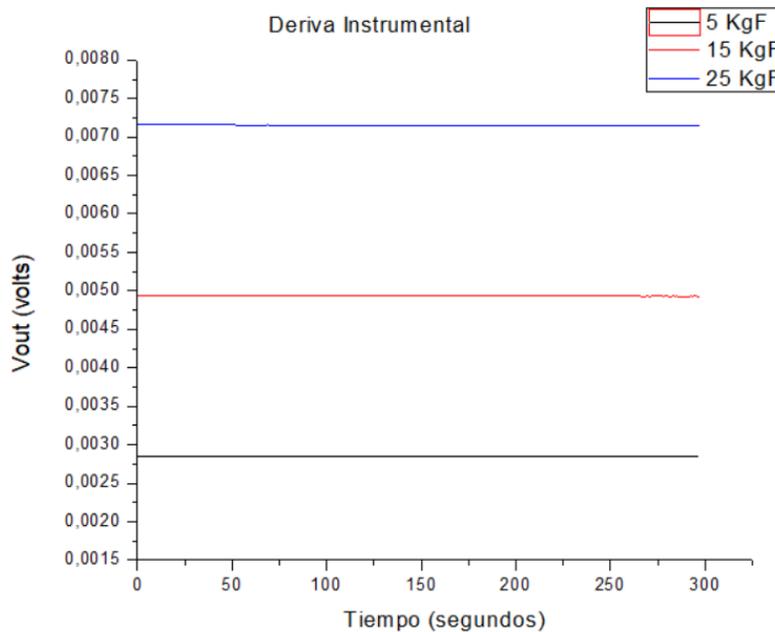


Figura 1047 Gráfica de deriva instrumental del sistema durante 5 min.

4.4 INTEGRACION DEL JOYSTICK AL ROBOT PLANAR

Una vez realizado la calibración del joystick, se llevó a cabo la integración mecánica en el robot planar para obtener los datos de las fuerzas que actúen sobre dicho joystick, en la figura 108 se muestra el sensor joystick ensamblado al robot planar.



Figura 1058 Joystick integrado al robot planar.

Es importante recalcar que cada se habilitaron cinco mediciones de fuerza para el usuario del robot en las cuales dichas fuerzas retomando lo escrito en el capítulo 2 son la fuerza digito palmar, fuerza de flexora y de extensión de la extremidad superior y las fuerzas de aducción y abducción del hombro, en la figura 109 se da un claro ejemplo de cada una de las fuerzas que se manifiestan sobre el joystick.



Figura 1069 Fuerzas generadas sobre el joystick.

En el desarrollo de este capítulo, se logró obtener las gráficas del sistema, las cuales presentaron un error de variación menor a la unidad, por lo tanto, se logró cumplir no solo con el objetivo inicial del capítulo, si no que hacer valida la hipótesis que se planteó en el capítulo uno de este trabajo de tesis. De igual manera se logró satisfacer las necesidades iniciales del trabajo, las cuales eran las restricciones del rango de trabajo del joystick y de la geometría para llevar a cabo el ensamble con el robot planar. En este último capítulo, fue posible integrar todo el sistema final.

CONCLUSIONES

Retomando los objetivos iniciales y la hipótesis mostrados en el capítulo uno de este trabajo de investigación, se diseñó y manufacturó el sistema mecatrónico basado en una celda de carga configurada como un joystick. Como se aprecia en el capítulo tres, la simulación de elemento finito fue crucial para la toma de decisión en el diseño del joystick, el método de las gráficas del esfuerzo puntual distribuida a lo largo de la estructura mecánica del sensor determinó el lugar ideal para obtener la mayor variación de fuerza en el joystick, gracias a la certeza que esto permitió, el sistema presentó una respuesta del tipo lineal, lo que quiere decir, que el sistema logró mantener una relación de fuerza-voltaje lo cual definió la sensibilidad del prototipo.

En el acondicionamiento de los sensores de deformación, se usó la configuración del puente Wheatstone; se determinó que este circuito de acondicionamiento fue el correcto, debido a la compensación de valor a cero o en reposo que logró crear en conjunto con las galgas extensiométricas, por lo tanto, se comprobó que es el circuito óptimo para obtener una señal de deformación al momento de trabajar con galgas extensiométricas.

Por último, el sistema además de presentar una respuesta lineal y sensible, fue sometido a pruebas de deriva instrumental para obtener su repetibilidad, haciendo uso de métodos de probabilidad y estadística, se determinó el coeficiente de variación en los datos dados por el joystick, y como resultado se obtuvo un coeficiente de variación muy por debajo de la unidad, por lo tanto, con esto afirmamos que la metodología seguida en esta tesis fue la correcta, ya que se logró cumplir con todas las restricciones iniciales, como el diseño del joystick que cumplió con las dimensiones ideales para llevar a cabo la adaptación al robot planar respetando la higiene postural del usuario, también se logró construir una celda de carga configurada como un joystick capaz de trabajar en rangos de la fuerza ejercida por la extremidad superior y más aún, de otorgar una señal confiable y repetible.

TRABAJO FUTURO

Como se observa, el joystick es capaz de dar datos confiables sobre las fuerzas que genera el usuario al momento de trabajar con el robot planar, por lo tanto, es una herramienta fundamental para dicho robot. El primer desafío en puerta es el de realizar un lazo de control entre el robot paralelo y el joystick para retroalimentar la fuerza generada por el usuario y por medio de módulos de tensión modificar la resistencia en el movimiento del usuario con el robot paralelo, por lo tanto, esto iniciaría una modalidad más en la rehabilitación del usuario. El joystick junto con el robot

paralelo busca un lugar dentro de la fisioterapia para que sea posible asignar pacientes con algún tipo de lesión en la extremidad superior y que requieran de rehabilitación. Por último, una de las ideas comprometedoras para futuros proyectos es el de adaptar el robot junto con el joystick y generar un entorno de inmersión virtual.

REFERENCIAS

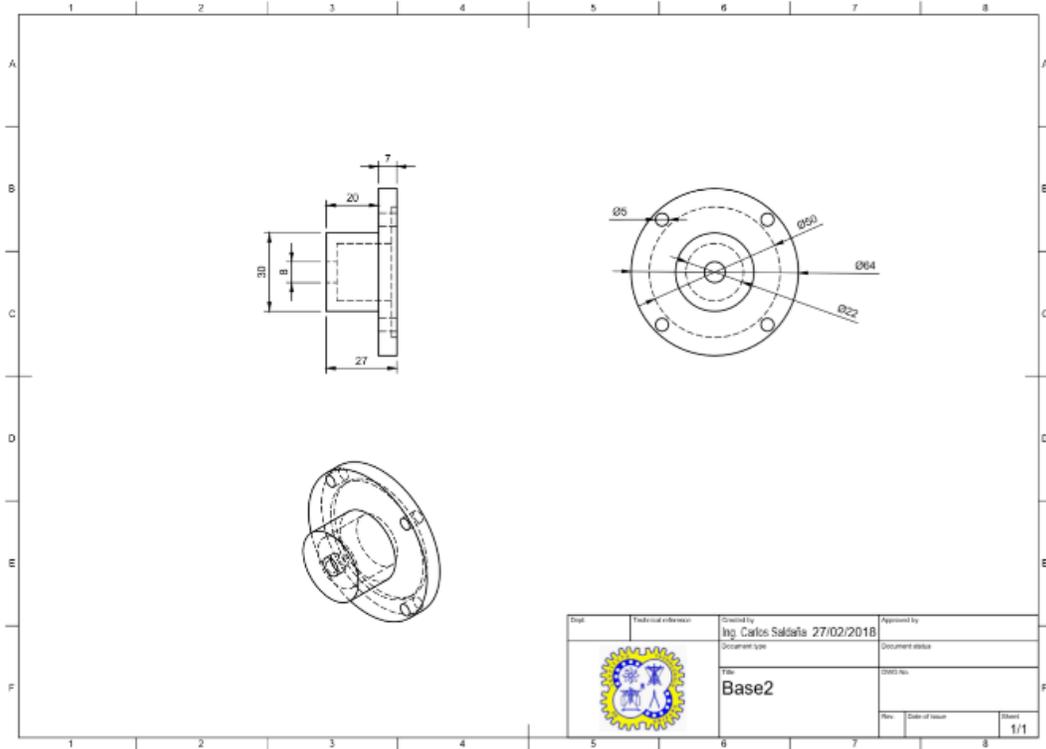
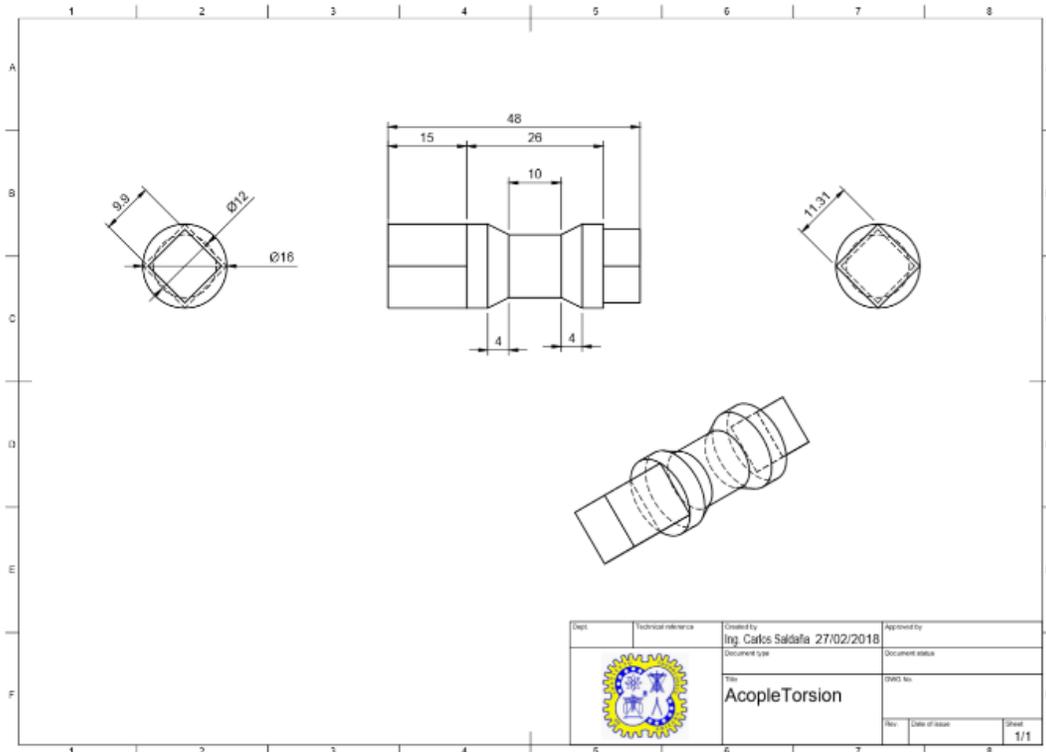
- [1] R. García-Gallego, L. Tormos-Claramunt, P. Vilanova-Salcedo, R. Morales-Rodríguez, A. Pérez-Villalba, and E. Segura-Ortí, "Efectividad de la punción seca de un punto gatillo miofascial versus manipulación de codo sobre el dolor y fuerza máxima de prensión de la mano," *Fisioterapia*, vol. 33, no. 6, pp. 248–255, 2011.
- [2] R. Hernandez Sampieri, C. Fernandez Collado, and M. del P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*. 2010.
- [3] S. B. C. Montano Gella Luis, "CONTROL DE ESFUERZOS CON UN ROBOT INDUSTRIAL," vol. 30, no. 2, pp. 1–28, 1997.
- [4] R. Eia, "MEDICIÓN DE FUERZA Y VELOCIDAD," pp. 147–160, 2010.
- [5] J. Gutiérrez-martínez, M. A. Núñez-gaona, and P. Carrillo-mora, "Avances tecnológicos en neurorrehabilitación," vol. 66, pp. 8–23, 2014.
- [6] U. Keller, V. Klamroth, H. J. A. Van Hedel, and R. Riener, "ChARMin : A Robot for Pediatric Arm Rehabilitation," pp. 3908–3913, 2013.
- [7] J. C. Fraile and P. R. Farina, "Robot Biocooperativo con Modulación Háptica para Tareas de Neurorehabilitación de los Miembros Superiores," *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind. RIAI*, vol. 8, no. 2, pp. 63–70, 2011.
- [8] R. Riener, T. Nef, and G. Colombo, "Robot-aided neurorehabilitation of the upper extremities," vol. 43, pp. 2–10, 2005.
- [9] D. I. Mecatrónico, "Sistema mecatrónico para rehabilitación de pacientes con parálisis total o parcial en miembros superiores Resumen," 2015.
- [10] J. M. Bea, "Diseño e implementación de un brazo robot para discapacitados," 2015.
- [11] P. Tripicchio, S. Superiore, S. Anna, and B. González-sánchez, "Diseño y desarrollo de un sistema vibrotáctil utilizado en un robot planar para la rehabilitación de las extremidades superiores .," no. January, 2012.
- [12] H. De Reyes and P. De Soto, "Pruebas de laberintos 2D y 3D con propósitos de uso en rehabilitación neuropsicológica."
- [13] E. Laforêt, E. Rocon, A. F. Ruiz, R. Ceres, L. Calder, and A. Rey, "Exoesqueletos Robóticos para la Rehabilitación : una revisión," pp. 613–618, 2006.
- [14] A. Mariela and A. Molina, "Departamento de ciencias de la energía y mecánica," 2015.
- [15] C. Israel, M. Campoverde, J. Marcelo, and N. Nacipucha, "Universidad de cuenca facultad de ingeniería," 2016.
- [16] P. Y. Marcas, "2 574 818," 2016.
- [17] H. I. Krebs *et al.*, "Rehabilitation robotics : pilot trial of a spatial extension for," vol. 15, pp. 1–15, 2004.
- [18] H. I. Krebs, J. Celestino, D. Williams, M. Ferraro, B. Volpe, and N. Hogan, "24 A Wrist Extension for MIT-MANUS," pp. 377–390, 2004.

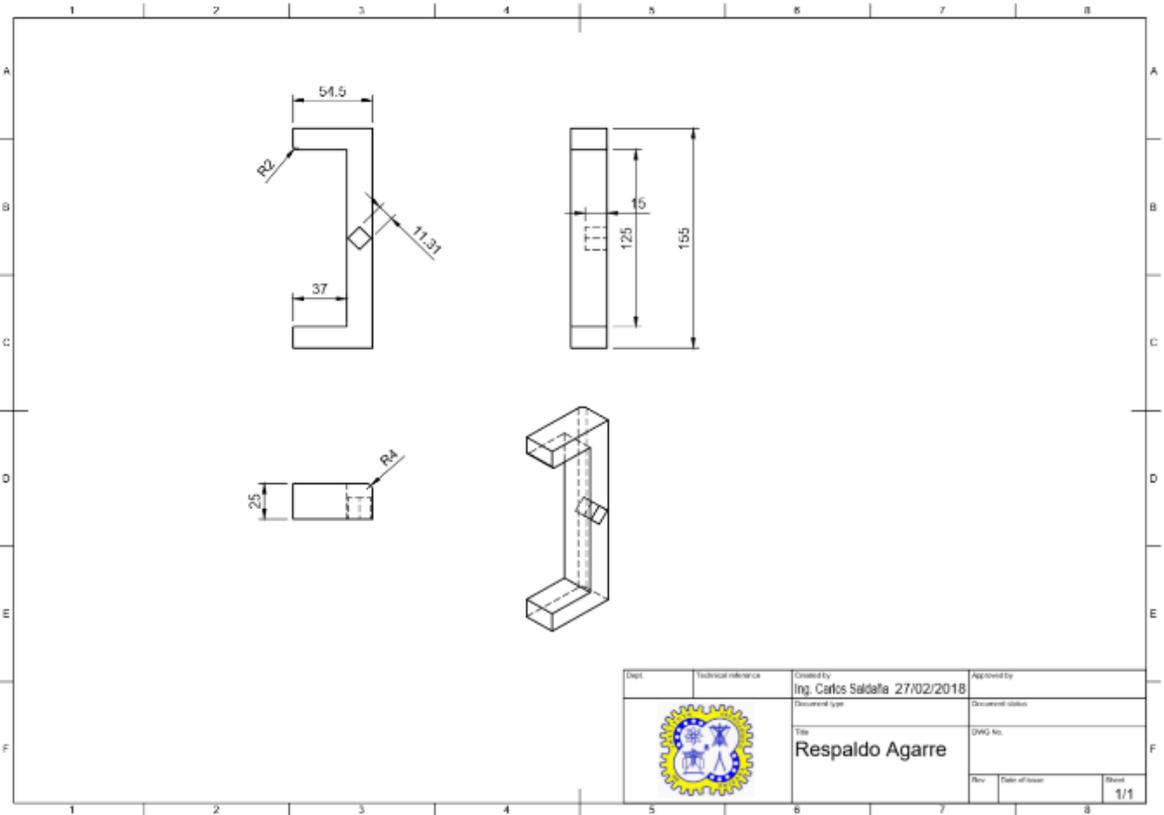
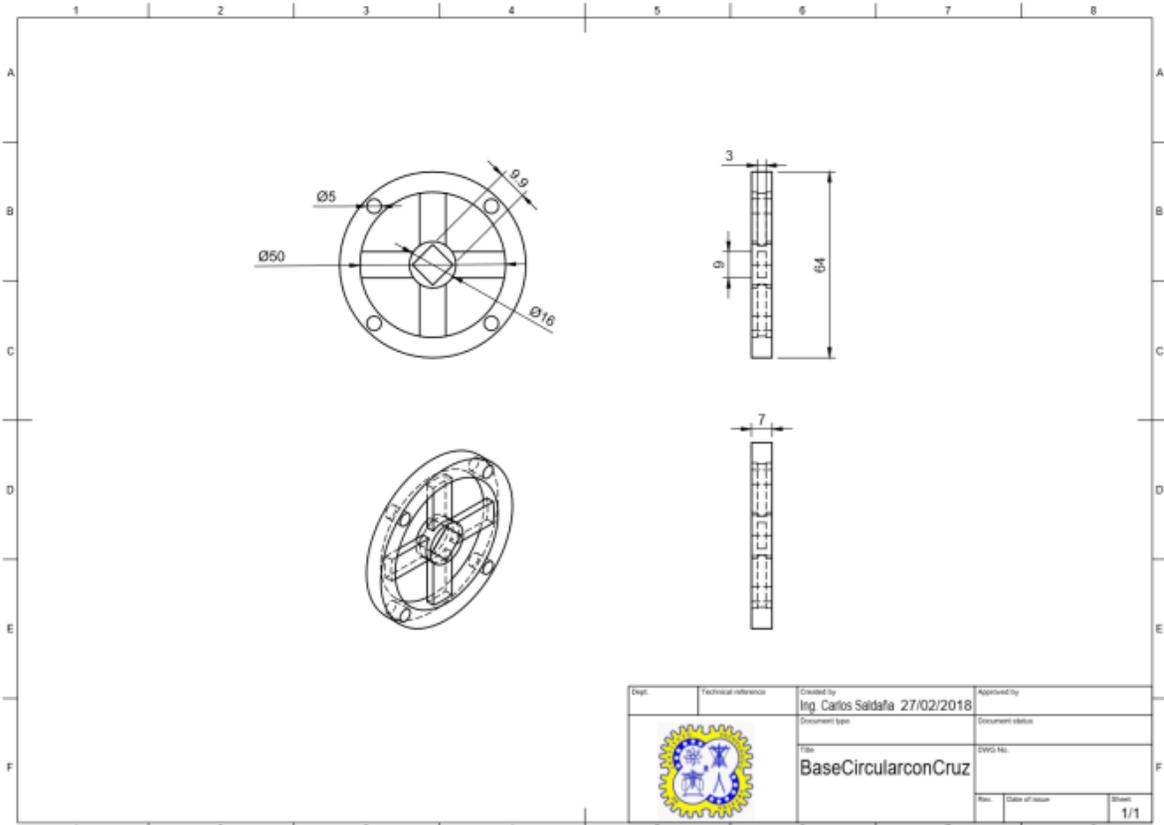
- [19] A. L. Área, D. E. R. Del, H. Del, and I. D. E. Ambato, "Universidad técnica de ambato facultad de ciencias de la salud carrera de terapia física," 2015.
- [20] R. L. Drake, W. Vogl, and A. W. M. Mitchell, *GRAY - Anatomía para estudiantes*, 1ra edicio. 2005.
- [21] M. Teresa, A. Carrere, A. Álvarez, and Y. F. Peñaranda, "Biomecánica clínica Biomecánica de la Extremidad Superior Exploración de la Muñeca," vol. 3, no. 4, pp. 65–81, 2011.
- [22] Prof. Cristina Gómez Calero, "PINZAS Y PRESAS: ADQUISICIÓN Y REEDUCACIÓN," 2012, pp. 9–14.
- [23] G. T. Z. Osorio., "Corrección postural, prevención de la inmovilidad y fomento de la actividad física en personas mayores con demencia," *Catálogo publicaciones la Adm. Gen. del Estado*, vol. 1, p. 41, 2014.
- [24] M. Rodriguez, "Manual de Higiene Postural," p. 32, 2005.
- [25] O. L. H. G, "Elaboración de estándares de la fuerza de agarre en individuos sanos entre 20 y 70 años residentes en la localidad de Usaquén, Bogotá," *Rev. Colomb. Rehabil.*, vol. Volumen 6, pp. 5–19, 2007.
- [26] K. Hoffmann, "An Introduction to Measurements using Strain Gages," *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH*, p. 257, 1989.
- [27] "Huajuapán de León, Oaxaca. Julio de 2005.," *Diseño, construcción y caracterización de un sensor para medir cargas a tensión por extensimetría.*, Huajuapán de León, Oaxaca, 2005.
- [28] E. Roque and J. Antonio, "Celdas de carga Celdas de carga Piezometros," *Logicbus SA CV*, no. 33, pp. 1–4, 2005.
- [29] A. V. Otero, "Teoría y Cálculo De Estructuras."
- [30] P. B. Jorge, "Resistencia de materiales, elasticidad y plasticidad.," *Retineo*, pp. 1–59, 2010.
- [31] AGS-Tech, "Datasheet rom AGS-Tech - Strain Gauges," pp. 1–8.
- [32] D. Ashlock and A. Warren, "Guía de acondicionamiento de señales para ingenieros," p. 14, 2015.
- [33] G. Francisco, "Capítulo 2 Acondicionamiento de señal ~," pp. 1–22, 2002.
- [34] CYPRESS Semiconductor Corporation, "Programmable System-on-Chip (PSoC) Datasheet," 001–84935, 2016.
- [35] D. O. do C. Aurelio Bonatto, "BLUETOOTH TECHNOLOGY(IEEE 802.15)," p. 11.
- [36] Ó. F. CORREDOR, L. F. PEDRAZA, and C. A. HERNÁNDEZ, "Bluetooth Technology: Alternative To Cellular Networks of Voice and Data," *Rev. Visión Electron.*, vol. 3, no. 2, pp. 73–84, 2009.
- [37] E. Carletti, "Comunicación - Bus I2C Descripción y funcionamiento," *Retrieved from http://robotsargentina.com.ar/Comunicacion_busI2C.htm*, pp. 1–5, 2008.
- [38] P. M. N and Q. Cerdip, "AD620N - Datasheet," pp. 1–16, 1999.
- [22] <http://www.inr.gob.mx/>

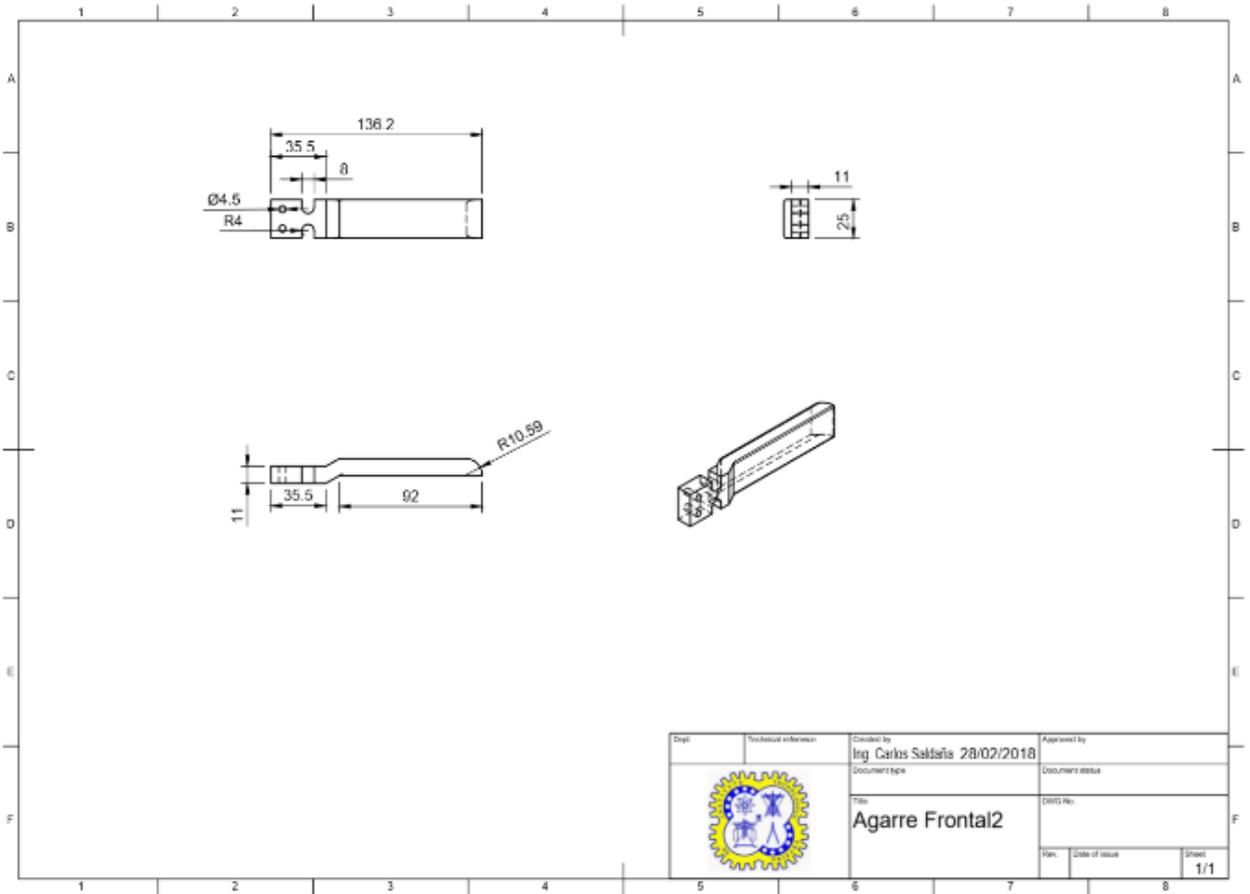
[23] <http://www.aporta.org.mx/>

[24] <http://www.who.int/>

Apéndice A Diagramas 2D manufacturación del Joystick







Apéndice B Diagrama de flujo con programación de Psoc Creator

