



**UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA**

FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO DE UN SENSOR  
FUERZA/TORQUE PARA SER  
IMPLEMENTADO EN SISTEMAS DE  
CONTROL POR IMPEDANCIA**

Trabajo final de graduación sometido a la consideración de la

**UNIVERSIDAD DE COSTA RICA**

como parte de los requisitos  
para aspirar al título y grado de

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**Joshua Jafeth Carmona Vargas  
Jazmín Alexandra Cruz Sojo**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
Agosto del 2022

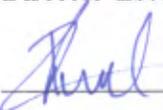
---

# Hoja de tribunal

Este proyecto de graduación fue aceptado por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado y título de Licenciatura en Ingeniería Mecánica.

  
\_\_\_\_\_ Director de la Unidad Académica

PhD. Pietro Scaglioni Solano  
Director Escuela de Ingeniería mecánica

  
\_\_\_\_\_ Asesor director

Lic. Israel Chaves Arbaiza  
Escuela de Ingeniería Mecánica

  
\_\_\_\_\_ Asesor interno

M. Eng. José Rubén Madrigal Cordero  
Escuela de Ingeniería Mecánica

  
\_\_\_\_\_ Asesor externo

Dr. Fer. nat. Federico Ruiz Ugalde  
Escuela de Ingeniería Eléctrica

  
\_\_\_\_\_ Docente curso Proyecto Mecánico II

Mag. Juan Gabriel Monge Gapper  
Escuela de Ingeniería Mecánica

  
\_\_\_\_\_ Ponente

Joshua Jafeth Carmona Vargas

  
\_\_\_\_\_ Ponente

Jazmín Alexandra Cruz Sojo

## Agradecimientos

Llevare siempre en mi corazón, el apoyo que me ha brindado la universidad y todos los colaboradores que han formado parte de mi formación. Realizar este proyecto fue posible gracias a mi familia y amigos, que me acompañaron durante el proceso. Con especial cariño agradezco a mi mamá Noile, a mi papá Gustavo, a mi hermana Reichel, a mi amigo Carlos, y a mi amiga y compañera de proyecto Jazmín, gracias a todos por acompañarme en el desarrollo de esta esta meta.

*Joshua Jafeth Carmona Vargas*

Agradezco a mis padres y hermano, amistades, profesores y a las personas que nos ayudaron durante este proceso. A mi tía Olga, a Natalia y a su familia, quienes con su apoyo incondicional me impulsaron en todo momento. A Joshua, por ser un gran compañero de trabajo y amigo en el que tengo toda mi confianza.

*Jazmín Alexandra Cruz Sojo*

## Dedicatoria

Dedicamos este Trabajo Final de Graduación a nuestras familias, amistades, profesores y a las personas que nos ayudaron durante este proceso.

## Epígrafe

*La investigación más fructífera surge de problemas prácticos.*

*- Ralph B. Peck*

# Índice general

Hoja de tribunal . . . . .	I
Agradecimientos . . . . .	II
Dedicatoria . . . . .	III
Epígrafe . . . . .	IV
Índice de ilustraciones . . . . .	VIII
Índice de cuadros . . . . .	IX
Abreviaturas . . . . .	X
Resumen . . . . .	XI
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Descripción general . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo general . . . . .	2
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	2
1.3. Justificación . . . . .	3
1.4. Antecedentes . . . . .	4
1.5. Metodología . . . . .	6
1.6. Alcance y limitaciones . . . . .	8
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>9</b>
2.1. Robótica colaborativa . . . . .	9
2.1.1. Clasificación de interacciones humano-robot . . . . .	10
2.1.2. Estándares de seguridad para interacciones entre robot y humanos	11
2.2. Impedancia . . . . .	13
2.2.1. Impedancia mecánica . . . . .	13
2.2.2. Control por impedancia . . . . .	14
2.3. Diseño mecánico . . . . .	17
2.3.1. Selección de materiales . . . . .	17

2.3.2.	Manufactura de prototipos . . . . .	20
2.3.3.	Calibración de prototipos . . . . .	23
2.3.4.	Modelado por elementos finitos . . . . .	25
2.4.	Sensores y medición . . . . .	27
2.4.1.	Transductores y sensores . . . . .	27
2.4.2.	Galgas . . . . .	28
2.5.	Electrónica de control . . . . .	32
2.5.1.	Circuitos de medición fuerza/torque . . . . .	32
<b>3.</b>	<b>Diseño preliminar</b>	<b>38</b>
3.1.	Requerimientos del sensor . . . . .	38
3.1.1.	Escenarios críticos de robot humanoide . . . . .	39
3.1.2.	Escenarios críticos de robot asistente . . . . .	43
3.2.	Diseño geométrico . . . . .	46
<b>4.</b>	<b>Análisis mecánico en simulación</b>	<b>49</b>
6.1.	Resultados y análisis del procedimiento experimental . . . . .	49
4.1.1.	Análisis mecánico del prototipo de pestañas . . . . .	49
4.1.2.	Análisis mecánico del prototipo externo . . . . .	52
4.1.3.	Valoración de la geometría en ambos robots . . . . .	55
<b>5.</b>	<b>Configuración del experimento</b>	<b>57</b>
5.1.	Condiciones y configuración de las galgas extensiométricas . . . . .	57
5.2.	Elaboración del procedimiento experimental . . . . .	59
5.3.	Construcción del prototipo y banco de pruebas . . . . .	61
<b>6.</b>	<b>Corroboración del comportamiento del prototipo</b>	<b>63</b>
6.1.	Resultados y análisis de procedimiento experimental . . . . .	63
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>67</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>73</b>
	<b>Apéndices</b>	<b>74</b>
A.	Memoria de cálculo . . . . .	74
B.	Procedimiento experimental . . . . .	76
C.	Diagramas de construcción . . . . .	78

# Índice de figuras

2.1. Desempeño de sensores por impedancia o admitancia en función de la rigidez. Fuente: Ott <i>et al.</i> (2010) . . . . .	14
2.2. Diagrama de bloque y resorte. Fuente: (Grioli y Bicchi, 2010) . . . . .	15
2.3. Diagrama de bloques de control por impedancia. Fuente: (Chinchilla, 2014)	16
2.4. Diagrama de bloques de control por admitancia. Fuente: (Chinchilla, 2014)	16
2.5. Gráfico del esfuerzo en función de la deformación unitaria del acero, donde se ilustra la zona de trabajo según el factor de seguridad seleccionado. Fuente: (Carro y Tioli, 2012) . . . . .	18
2.6. Partes de una galga extensiométrica. Fuente: (Areny, 2005) . . . . .	30
2.7. Diagrama y funcionamiento de puente Wheatstone. Fuente: (Hoffman, sfb) . . . . .	33
2.8. Representación de configuraciones del puente de Wheatstone. Fuente: Hoffman (sfb) . . . . .	36
3.1. Ejes de referencia del modelo de sensor. Fuente: elaboración propia . . . . .	39
3.2. Prototipo de sensor usando “pestañas”. Fuente: Elaboración propia . . . . .	47
3.3. Prototipo de sensor basado en esfuerzos externos. Fuente: Elaboración propia . . . . .	48
4.1. Prototipo de pestañas con puntos preliminares de deformación. Fuente: Elaboración propia . . . . .	50
4.2. Prototipo de pestañas deformación producto de fuerza en eje x. Fuente: Elaboración propia . . . . .	50
4.3. Prototipo de pestañas deformación producto de fuerza en eje z. Fuente: Elaboración propia . . . . .	51
4.4. Prototipo de pestañas deformación producto de momento en eje z. Fuente: Elaboración propia . . . . .	51

4.5. Prototipo externo, zonas preliminares de deformación. Fuente: Elaboración propia . . . . .	53
4.6. Prototipo externo, deformación producto de fuerza en eje z. Fuente: Elaboración propia . . . . .	54
4.7. Prototipo externo, deformación producto de fuerza en eje x. Fuente: Elaboración propia . . . . .	54
4.8. Prototipo externo, deformación producto de momento en eje z. Fuente: Elaboración propia . . . . .	55
5.1. Ubicación de galgas extensiométricas en el sensor fuerza/torque. Fuente: Elaboración propia . . . . .	58
5.2. Configuración de fuerzas aplicadas en pruebas de deformación. Fuente: Elaboración propia. . . . .	60
5.3. Equipo de medición utilizado en pruebas de deformación. Fuente: Elaboración propia. . . . .	61
5.4. Piezas auxiliares para la aplicación de cargas en prototipo. Fuente: Elaboración propia. . . . .	62
1. Ejes de referencia del modelo de sensor. Fuente: Elaboración propia . .	74

# Índice de tablas

3.1. Peso estimado de robot asistente . . . . .	44
5.1. Configuración de galgas extensiométricas en Puentes Wheatstone . . .	58
6.1. Mediciones de deformación eje axial ( $F_x$ ) puente #1 dadas en $\mu\varepsilon$ . . . .	63
6.2. Mediciones de deformación eje radial ( $-F_z$ ) puente #1 dadas en $\mu\varepsilon$ . . .	64
6.3. Mediciones de deformación de torque en eje axial ( $M_z$ ) en puente #1 dadas en $\mu\varepsilon$ . . . . .	64
6.4. Mediciones de deformación eje radial ( $F_x$ ) puente #3 dadas en $\mu\varepsilon$ . . .	64
6.5. Mediciones de deformación eje radial ( $-F_z$ ) puente #3 dadas en $\mu\varepsilon$ . .	65
6.6. Mediciones de deformación de torque en eje axial ( $M_z$ ) en puente #3 dadas en $\mu\varepsilon$ . . . . .	65
1. Pesos indicados contra pesos reales medidos . . . . .	77

## Abreviaturas

**ABS:** Traducido del inglés, Acrilonitrilo Butadieno Estireno.

**AISI:** Traducido del inglés, Instituto Americano de Hierro y Acero.

**ARCOS-Lab:** Laboratorio de Investigación en Robots Autónomos y Sistemas Cognitivos.

**ASTM:** Asociación Americana de Ingenieros Mecánicos.

**CFIA:** Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos.

**CNC:** Control Numérico por Computadora.

**DIN:** Traducido del alemán, Instituto Alemán de Normalización.

**INII:** Instituto de Investigación en Ingeniería.

**ISO:** Traducido del inglés, Organización Internacional de Normalización.

**SIBDI:** Sistema de Bibliotecas, Documentación e Información.

## Resumen

El trabajo consiste en el diseño de un sensor fuerza/torque para ser implementado en el sistema de control por impedancia del robot humanoide, a su vez evaluando su geometría en el robot asistente del ARCOS-Lab. El sensor, nombrado en el desarrollo del proyecto como “prototipo externo”, plantea una deflexión controlada en las columnas horizontales ubicadas en las zonas superior e inferior del dispositivo. Con la aplicación de fuerzas en los sentidos axial y radial en el sensor, así como el torque en el sentido axial, las zonas de deformación, tienden a estar en tensión o compresión de forma correspondiente con la dirección de las cargas. La medición de la deformación, se realiza por medio de galgas extensiométricas ubicadas en las zonas de medición. El prototipo se valida por medio de un modelado computacional mediante el método de elementos finitos. El análisis se realiza a partir de las condiciones de fuerza y torque críticas a las que se ven expuestos los robots en su funcionamiento habitual, estudiadas y cuantificadas previamente a realización del análisis. Asimismo, se realizó el prototipo del modelo por medio de impresión 3D, con lo cual fue posible corroborar el comportamiento y dirección de las deformaciones y de las señales emitidas en las zonas de deflexión. Se presenta un diseño con una geometría y ubicación de los puntos de medición que propicia comportamientos definidos dependiendo de la fuerza o torque presente. El prototipo externo además, reduce la interferencia entre señales, con lo que se da una mayor claridad en las reacciones detectadas, y permite identificar correctamente el tipo de fuerza o torque aplicado.

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Descripción general

La búsqueda de robots con una mejor interacción con el entorno y una mejor colaboración con humanos es un desafío que ha permitido el desarrollo de tecnologías enfocadas en la realización de estas tareas. El Laboratorio de Investigación en Robots Autónomos y Sistemas Cognitivos (ARCOS-Lab) de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica y del Instituto de Investigación en Ingeniería (INII), consciente de la necesidad de desarrollar este tipo de tecnologías, se encuentra en proceso de desarrollo de 2 robots, llamados por el laboratorio como “robot humanoide” y “robot asistente”. Estos trabajan con el principio de robótica colaborativa y se diseñaron con el fin de trabajar con seres humanos.

Una de las tecnologías que ha permitido este desarrollo es conocida como control suave. En sistemas con este tipo de tecnología, la trayectoria o movimiento de un robot puede ser modificada a partir de la información de un sensor. Adicionalmente, es posible ver este tipo de funcionamiento asociado al uso de celdas de carga, las cuales, consisten en geometrías diseñadas para deformarse de forma controlada, para que dicha deformación pueda ser medida mediante galgas extensiométricas. El cambio en la resistencia eléctrica en la galga es transformado a señales de voltaje y amplificado para posteriormente, mediante un sistema de control por impedancia, determinar la fuerza asociada a dicha deformación y la acción que debe realizar el robot para responder a esa magnitud física.

En este Trabajo Final de Graduación se elabora el diseño de un sensor de fuer-

za/torque a partir del análisis de los escenarios de trabajo del robot humanoide y la cuantificación de las fuerzas y torque a las que estará sometido el mismo en su base.

Se realiza el análisis mecánico del sensor, mediante análisis de elementos finitos con el fin de definir la geometría que aporta la mayor funcionalidad y la mejor captación de señal para las galgas. Finalmente, la validación del diseño requiere la realización de un prototipo del mismo y realización de pruebas de deformación.

Finalmente, se evalúa el sensor propuesto para el robot humanoide conforme a las condiciones de trabajo del robot asistente del ARCOS-Lab.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Diseñar un sensor fuerza/torque para ser implementado en el sistema de control por impedancia del robot humanoide, a su vez evaluando su geometría en el robot asistente del ARCOS-Lab.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Delimitar los requerimientos de los escenarios críticos para cada uno de los entornos de trabajo del robot humanoide y del robot asistente.
- Diseñar la geometría del prototipo de sensor fuerza/torque de forma que propicie la deformación controlada en zonas de su geometría, en concordancia con los escenarios críticos establecidos.
- Analizar los esfuerzos y deformaciones del prototipo de sensor fuerza/torque en el robot mediante simulaciones de análisis de elementos finitos para determinar la cantidad y ubicación de las galgas.
- Elaborar el prototipo de sensor fuerza/torque por medio de impresión 3D, así como los planos del mismo.
- Corroborar el funcionamiento del prototipo de sensor fuerza/torque por medio del análisis de su comportamiento ante pruebas de deformación.

### 1.3. Justificación

Los avances en el campo de la robótica han tenido un cambio significativo a lo largo del tiempo. Algunos de los primeros robots usados en industrias sólo podían ser concebidos para ser utilizados en ambientes con poco contacto humano con el fin de evitar el riesgo a accidentes, sin embargo, con el paso del tiempo, se ha dado un desarrollo hacia tecnología que permita la convivencia segura y activa con seres humanos en diferentes tareas de la vida cotidiana.

La inmersión de la robótica en ambientes humanos dependerá de un desempeño práctico y competente de sistemas que sean intuitivos, amigables y seguros de utilizar (Khatib, 2009). Los robots con estas propiedades se definen dentro de la categoría de “Robots amigables con los humanos” del inglés “Human friendly robots” (Kazuo, 1999). Para lograr este desarrollo se hace necesario el trabajo de adaptación de las características que van desde la apariencia del robot hasta las características propias de su movimiento. El control por impedancia es uno de estos sistemas, el cual permite dar una percepción de las diferentes fuerzas a las que puede estar sometido el robot humanoide y reaccionar en proporción a las mismas.

La implementación de robots seguros ha sido de gran interés del ARCOS-Lab, el cual tiene como objetivo “crear robots que ayuden y asistan a las personas en sus tareas de la vida cotidiana, lo que significa estar a su lado colaborándoles” (Chacón, 2019). Se tiene un interés especial en el trabajo en entornos con personas con discapacidad o personas mayores, donde se desea respetar la intimidad y autonomía de los participantes. En cuanto al desarrollo del robot y al control de su interacción con las fuerzas externas, ambas extremidades de la estructura poseen control por impedancia debido a que estas fueron adquiridas con esta particularidad, sin embargo no se ha implementado el funcionamiento por impedancia en la base del robot.

El diseño del sensor de fuerza/torque, aporta conocimiento importante en el desarrollo de la robótica colaborativa en el país, ya que permite a futuros estudiantes e investigadores partir de este diseño para aplicar el control por impedancia a diferentes proyectos. Además, con el diseño se contribuye al desarrollo de tecnología por parte del ARCOS-Lab en concordancia con sus objetivos.

## 1.4. Antecedentes

A partir de la investigación realizada se determinó la existencia de múltiples diseños de sensores fuerza/torque en la industria. Existen patentes inscritas como “*Force-torque sensor, force-torque sensor frame and force-torque measuring method*” (Corea del Sur, Patente N°. KR20130126082A, 2013), “*Set of multi-axis force and torque sensors and assembly methods*” (Alemania, Patente N°. DE112009004288T5, 2012) y “*Force-torque sensor in the manner of a strain gauge and method for producing the same*” (Alemania, Patente N°. DE102012202425A1, 2019), donde a nivel general, se describen prototipos con geometrías y configuraciones de la posición de galgas extensiométricas en los dispositivos que permiten la medición de fuerzas y/o momentos según cada caso específico.

Por otro lado, empresas comerciales especializadas ya sea en el ámbito de la robótica o la tecnología sensorial, han desarrollado y patentado sensores de fuerza/torque, los cuales se han incluido en dispositivos robóticos de uso en entornos donde se ameriten movimientos precisos con una respuesta gentil al entorno. Tal es el caso empresas como *ATI Industrial Automation* y *KUKA Roboter GmbH*, donde se desarrollan sensores de gran precisión usados en brazos robóticos industriales.

El desarrollo de sensores con mejores capacidades, se encuentra en constante investigación. En el ámbito internacional, se encuentran trabajos como “*Design and optimization of a novel six-axis force/torque sensor with good isotropy and high sensitivity*” en la Conferencia Internacional en Robótica y Biomimética (ROBIO) (Sun *et al.*, 2013), donde se inicia con el estudio de diseños realizados para sensores con 6 grados de libertad. El estudio busca determinar las posiciones precisas de las galgas mediante el análisis de elementos finitos. Se tiene énfasis en obtener un sensor con una buena isotropía de medición, alta sensibilidad y frecuencia natural. El diseño propuesto requiere el trabajo en conjunto de 32 galgas extensiométricas, de las cuales se requiere utilizar 4 para la captación de cada uno de los grados de libertad. Posteriormente, la investigación “*Design of a Novel Six-axis Force/Torque Sensor Based on Strain Gauges by Finite Element Method*”, realizada por el Instituto de Tecnología de Harbin, China (Yongjun Sun, 2014), es una continuación del trabajo mencionado previamente. El mismo realiza una aproximación analítica de parámetros usados como criterios de diseño. La prueba del funcionamiento del sensor construido se plantea para trabajos futuros.

Algunos de los estudios se han basado en la medición de un solo grado de libertad, como es el caso del trabajo “*Towards scalable strain gauge-based joint torque sensors*” realizado en el Instituto de Ciencias Médicas y Tecnología de la Universidad de Dundee en Escocia (Khan *et al.*, 2017), donde se estudia la rotación producida por el torque en uno de los ejes. En este se elaboró el diseño de un sensor de torque para una de las articulaciones del robot cuadrúpedo MiniHyQ abreviado de inglés “Miniaturized Hydraulically actuated Quadruped Robot”. Se simularon por medio de elementos finitos diferentes propuestas geométricas tales como sensores de geometría circular sólida y hueca, cruciforme rellena o hueca, tubos huecos, entre otros. En el estudio se definió la geometría con la mayor sensibilidad posible sin afectar la rigidez torsional. La solución propuesta se basa en un diseño simétrico, con el fin de que las mediciones en sentido horario o anti horario sean equivalentes. Posteriormente se compara la respuesta de diferentes aleaciones metálicas con el fin determinar la más adecuada para sus requerimientos, siendo la aleación de acero DIN 1.6510, la utilizada para construir el modelo y realizar la validación mediante pruebas de deformación y finalmente implementarlo en el robot.

A nivel nacional, se cuenta con el Trabajo Final de Graduación “*Diseño de un sensor fuerza/torque para la base móvil de un robot humanoide*”, realizado en el 2018 por el entonces estudiante Daniel Ortuño Lizano para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica (Ortuño, 2018). En este trabajo se diseño y construyó en material tipo ABS, un prototipo de sensor fuerza/torque con tres grados de libertad, a partir de la modificación de la placa base del carruaje y motor del robot humanoide del ARCOS-Lab de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica. El prototipo tiene la capacidad de soportar los esfuerzos provocados por las fuerzas propias del robot como el peso, además de poder deformarse ante las fuerzas externas aplicadas. Estas deformaciones fueron medidas por galgas extensiométricas ubicadas en el cuerpo del sensor. Se diseñó un banco de prueba para la calibración del prototipo. Asimismo se realizó un estudio de las propiedades mecánicas de diferentes metales, así como el costo y la disponibilidad en el mercado nacional para una futura consideración al construir el modelo final, con lo que se determina que el Acero AISI 1020 es el escogido debido a que cumple de la mejor forma con las especificaciones dadas. Finalmente se recomienda modificar la geometría del sensor para mejorar el desempeño, así como realizar pruebas de simulación con otras aleaciones y rediseñar el banco de pruebas de calibración.

Los diferentes estudios recopilados hasta la fecha aportan una fuente de información de gran importancia, a partir de los cuales es posible optimizar el diseño existente, tomando en cuenta las características específicas de los robots humanoides tomados en cuenta en este trabajo.

## 1.5. Metodología

Este trabajo se realizará mediante el desarrollo de las siguientes etapas:

**Etapa 1:** Determinación de los escenarios críticos de cada uno de los entornos de trabajo del robot.

1. Definir los escenarios de trabajo del robot y los requerimientos críticos de cada escenario.
2. Cuantificar la magnitud física de cada fuerza y torque asociado a cada escenario crítico.

**Etapa 2:** Diseño de las geometrías preliminares del sensor fuerza/torque.

1. Analizar ampliamente los sensores de fuerza/torque existentes a nivel de investigaciones, patentes comerciales y geometrías recomendadas.
2. Elaborar geometrías preliminares para el estudio posterior por análisis de elementos finitos.

**Etapa 3:** Análisis de los esfuerzos del prototipo de sensor fuerza/torque mediante simulaciones de análisis de elementos finitos para los escenarios establecidos.

1. Analizar cada uno de los esfuerzos en los grados de libertad basado en los casos críticos de cada uno de los escenarios contemplados.

**Etapa 4:** Definición de las condiciones y configuración en las que se incorporan las galgas en el modelo.

1. Definir los puntos en los que se posicionan las galgas con base en los resultados del análisis de elementos finitos y la bibliografía consultada.
2. Definir la cantidad de galgas a colocar para cada uno de los puntos seleccionados con base en los parámetros de funcionamiento.

**Etapa 5:** Elaboración de los planos y el prototipado de sensor fuerza/torque por medio de impresión 3D.

1. Diseñar los planos correspondientes al modelo definitivo.
2. Construir un prototipo del sensor por medio de impresión 3D.

**Etapa 6:** Prueba del funcionamiento del prototipo de sensor fuerza/torque el análisis del comportamiento del sensor ante pruebas de deformación.

1. Incorporar las galgas al modelo.
2. Corroborar el funcionamiento del banco de pruebas, rehacer en caso necesario.
3. Corroborar el funcionamiento de circuitos de medición de deformación.
4. Elaborar un procedimiento experimental para analizar el comportamiento del sensor ante pruebas de deformación.
5. Someter los sensores a pruebas de deformación con el fin de determinar la captación y caracterización de señales.

## 1.6. Alcance y limitaciones

Se plantea el diseño de un sensor fuerza/torque para el funcionamiento en un sistema de control por impedancia del robot humanoide del ARCOS-Lab, así como la evaluación del dispositivo diseñado en las condiciones de trabajo de un robot asistente del mismo laboratorio, con el fin de establecer recomendaciones para una futura optimización en trabajos posteriores.

El diseño del sistema busca ser capaz de realizar una captación de deformaciones mediante el uso de galgas extensiométricas. Se aborda el análisis de esfuerzos, así como la construcción de un prototipo con las características planteadas por el estudio realizado.

El prototipo construido se evalúa por medio de pruebas de deformación en un banco de pruebas adaptado a las características del mismo, las cuales se realizan al someter el sensor a diferentes cargas y analizar el comportamiento de los resultados obtenidos.

La fundamentación teórica del proyecto se hará con base en las plataformas digitales y repositorios disponibles por medio de SIBDI, así como las investigaciones realizadas por el ARCOS-Lab, con el objetivo de dar una base correcta al desarrollo del trabajo. La sección de análisis mecánico de los prototipos se hará por medio de programas de simulación de elemento finito capaces de someter el modelo a los diferentes esfuerzos requeridos por cada entorno estudiado según el robot a considerar.

A la fecha de realización del proyecto, el país pasa por un momento de alerta sanitaria debido a la pandemia de COVID-19, por lo que el acceso a las instalaciones de la Universidad es limitado e incierto. Esto condiciona el objetivo de construir un prototipo y de realizar las pruebas respectivas, ya que no se tiene certeza del acceso a las condiciones y herramientas necesarias para su realización. Por otro lado, en caso de poderse realizar la construcción del prototipo se cuenta con una limitación económica de presupuesto, por lo que los diseños se verán ligados a una cotización rentable acorde a los recursos disponibles.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. Robótica colaborativa

Un robot se puede definir como una máquina capaz de llevar a cabo una serie de acciones complejas automáticamente. Específicamente, en la característica de automatización, reside el principal diferenciador de los dispositivos robóticos entre las máquinas con la capacidad de funcionar de forma autónoma (Ben-Ari y Mondada, 2018).

Los ambientes industriales fueron los primeros en contar con un desarrollo robótico, debido a las condiciones definidas y simplificadas propias de estos entornos. En un inicio el contacto de los dispositivos robóticos con los seres humanos era limitado, con una distinción entre las labores realizadas por cada uno. Sin embargo, con los avances tecnológicos se han ampliado las aplicaciones a ámbitos donde los robots son capaces de coexistir con los seres humanos; ya sea desde el punto de vista productivo y social, en esto reside precisamente el concepto de robótica colaborativa (Suarez y Rosell, 2019). Los avances en el estudio de las interacciones entre los robots y los humanos han aumentado el potencial y la factibilidad del uso activo de estos sistemas en entornos de trabajo colaborativos entre ambos participantes; ya que el riesgo de afectaciones por parte del contacto físico entre ellos puede ser mitigado (Siciliano y Khatib, 2016).

Al tomar en cuenta las necesidades y preferencias del ser humano en el diseño, el comportamiento y la interacción de los robots, se desarrollan tecnologías consideradas bajo el concepto de “Robótica amigable con los seres humanos”. Estos robots deben contar con características esenciales para la interacción adecuada, tales como contar con la capacidad de entender y adaptarse a los movimientos humanos en ambientes

dinámicos y poco estructurados, de manera que las interacciones puedan darse de forma segura y autónoma por parte de los dispositivos robóticos (Siciliano y Khatib, 2016).

Por otra parte, la efectiva comunicación en las interacciones realizadas es clave para la interpretación y uso de los sistemas por parte de los seres humanos, de forma que se pueda transmitir por ejemplo, si la situación presente es o no segura. Para esto, los mensajes pueden darse no sólo de forma verbal sino también utilizando recursos no verbales, tales como gestos (Siciliano y Khatib, 2016).

El desarrollo de este tipo de tecnología tiene un gran potencial en la automatización de labores que antes no podrían haberse realizado debido al costo, tecnología o eficiencia. Muchos de los campos prometedores en la aplicación de la robótica radican en áreas profesionales como hospitales. También se utilizan en entornos de control logístico como inspección de calidad o acomodo de objetos, o en entornos domésticos, participando como asistentes de hogar, asistentes en el cuidado de adultos mayores y personas con discapacidad; tareas que actualmente su realización es hecha en su mayoría de manera manual (Siciliano y Khatib, 2016).

### 2.1.1. Clasificación de interacciones humano-robot

Según Siciliano y Khatib (2016), el tipo de interacción física entre los seres humanos y los robots puede clasificarse con base en la proximidad entre los participantes, así como por el tipo de tareas realizadas y el contexto de estas. En todos los escenarios a considerar, un factor clave consiste en la autonomía del robot al realizar las labores asignadas. De esta manera, las interacciones a nivel físico pueden clasificarse de la siguiente manera:

- **De soporte:** en esta categoría se agrupan las interacciones donde el robot no participa de forma íntegra en las actividades realizadas, sino que provee al ser humano de las herramientas, material e información necesarios para la optimización en el desarrollo de las tareas establecidas. Por ejemplo, los robots pueden ejercer las funciones de guía o de asistentes en labores domésticas. Las interacciones físicas comúnmente son breves y poco frecuentes. Con el fin de dotar de mayor seguridad al sistema, la comunicación toma un papel fundamental. Esta se puede dar por medio de gestos en el intercambio de información, así como en señales de preaviso a la hora de realizar actividades de contacto o de gran proximidad.

- **Colaborativo:** en este tipo de correlación el ser humano y el robot trabajan en una misma tarea, de forma que las labores son asignadas a cada participante según sea su habilidad. Frecuentemente el ser humano realiza labores que involucran la toma de decisiones, mientras el robot desempeña tareas de carácter repetitivo, alta precisión, o en las que son requeridas altas habilidades de fuerza o que impliquen un riesgo a la integridad, como lo son la exposición a ciertas sustancias.
- **Cooperativo:** en este tipo de interacción a diferencia de las de tipo colaborativas o de soporte, el robot en vez de funcionar como asistente, se desempeña como un agente independiente. El humano y el robot trabajan en contacto físico directo, o en contacto físico indirecto a través de un objeto con un control continuo y cooperativo de la labor. Entre las labores realizadas en esta categoría se encuentran la manufactura coordinada de materiales, la rehabilitación y el cuidado de la salud de pacientes o en el uso como exoesqueletos con la objetivo de aumentar las habilidades físicas del operador como la fuerza o la estatura.

### 2.1.2. Estándares de seguridad para interacciones entre robot y humanos

El desarrollo de tecnología que permita las interacciones entre el humano y el robot trae consigo el desarrollo de sistemas seguros que inhiban los riesgos a la integridad de sus participantes, poniendo en primera estancia el bienestar del ser humano. Para esto se hace necesario evaluar las condiciones presentes en el humano, el robot y el ambiente circundante, de forma que se puedan establecer las amenazas potenciales y controlar las interacciones de forma que se encuentren dentro de los estándares de seguridad correspondientes (Siciliano y Khatib, 2016).

En cuanto normativas de seguridad existentes, el estándar más importante en el campo de la robótica corresponde a la ISO 10218, el cual reconoce los posibles riesgos presentes al utilizar tecnología robótica. Inicialmente, sólo se contemplaban contextos industriales, sin embargo con el avance del desarrollo de robótica colaborativa se ha incluido la especificación técnica 15066. En esta especificación se da una guía para la operación de robótica colaborativa, en entornos donde el robot y la persona conviven en el mismo espacio de trabajo. Entre los requerimientos especificados se encuentran la distancia de separación mínima entre los participantes y su monitoreo, velocidades, tiempos de reacción y paro, así como los límites de fuerza y poder (Siciliano y Khatib,

2016).

Para el establecimiento de estos parámetros es necesaria una evaluación de las condiciones del robot y del entorno de trabajo. Para identificar los riesgos en la operación se debe considerar las posibles colisiones a ocurrir, además de prever los posibles errores a cometer por parte de los operadores en el trabajo conjunto. Se debe incluir un mapeo de las zonas afectadas por los efectos de estas condiciones críticas. Los valores límites establecidos en el sistema van a depender de la afectación en cada área específica y la geometría presente en las zonas. Considerando todo esto, la ISO 15066 da un criterio de daño, el cual consiste en valores máximos permisibles en regiones específicas del cuerpo con el fin de prevenir lesiones (Siciliano y Khatib, 2016).

Por otro lado, la ISO 13482 regula las interacciones físicas cercanas entre robot-humano. Describe normativas para el uso de tres tipos de robots: servidores móviles, asistentes físicos y robots con la función de cargar personas. Se dan los riesgos significativos para cada tipo de robot, así como los pasos a seguir en caso de que estos escenarios se presenten (Siciliano y Khatib, 2016).

## 2.2. Impedancia

### 2.2.1. Impedancia mecánica

La interacción de los robot con su entorno es un desafío de gran importancia en la investigación en robótica; las mejoras en los sistemas de control permiten dotar a los robots de mayor versatilidad en funciones como el uso de herramientas o una cooperación más cercana con los humanos (Hogan y Buerger, 2018).

Dicha interacción, puede estar enfocada en cumplir funciones sensoriales o motoras y para ambos casos la interacción mecánica es distinta. Se puede considerar que existe una impedancia mecánica, asociada a un valor específico de rigidez. En una analogía con los humanos, se evidencia cuando se realizan tareas relacionadas con la manipulación de objetos frágiles, instintivamente se remite al uso de nuestras extremidades de menor impedancia, como es el caso de nuestros dedos, de forma que se tenga un manejo más preciso. En otros tipos de interacción como en el manejo de una herramienta, suele requerirse la aplicación de una mayor impedancia mecánica para un control estable de la herramienta. (Hogan y Buerger, 2018)

La impedancia es un concepto utilizado por la teoría de circuitos eléctricos para referirse a la relación de voltaje-corriente entre dos puntos de distinta polaridad. Este concepto puede generalizarse de forma que se defina como la relación entre una variable y una constante física de un sistema entre dos estados (Couroussé, 2007). De esta forma, el control por impedancia se describe como la prescripción dinámica de la relación entre las fuerzas y la posición de los objetos (Ferretti *et al.*, 2000). Consiste en un sistema de control de fuerzas aplicado en entornos con interacciones externas no lineales donde se requiere de gran precisión, gentileza y estabilidad en los movimientos, tales como procesos de ensamblaje o rehabilitación en el área médica. (Lahr *et al.*, 2016).

Tanto el control por impedancia como el control por admitancia, son 2 implementaciones que permiten llegar al mismo objetivo, aunque cada uno cuenta con sus propias características que lo hacen capaz de trabajar en un entorno específico. Aunque sus definiciones son bastantes cercanas, desde un enfoque muy simplificado se podría concebir uno como el inverso del otro; incluso poniendo como marco de referencia el robot con su entorno, se podría entender como impedancia la forma en la que el ambiente percibe el manipulador robótico y la admitancia la percepción del robot con respecto al entorno

(Chinchilla, 2014).

En el caso de la articulación de un robot, la impedancia permite obtener una posición deseada a partir de la velocidad y la aceleración de la articulación. Usando estos parámetros de entrada, se genera una señal de fuerza o torque necesarios para corregir el cambio en la posición. La admitancia, de forma inversa a la impedancia, parte del conocimiento de la fuerza o torque y a partir de ella determina la velocidad y aceleración necesarias para corregir el cambio en la posición (Chinchilla, 2014).

Es posible clasificar los sensores por admitancia y por impedancia de acuerdo con su respuesta a los ambientes u operaciones con distinta rigidez; autores como Ott *et al.* (2010) se han encargado de graficar su funcionamiento en cada uno de estos entornos. Se puede observar, en la figura 2.1, como los resultados obtenidos con sensores de control por impedancia tienen un mejor desempeño en ambientes con mayor rigidez, a diferencia de los sensores de control por admitancia que destacan en ambientes de baja rigidez.

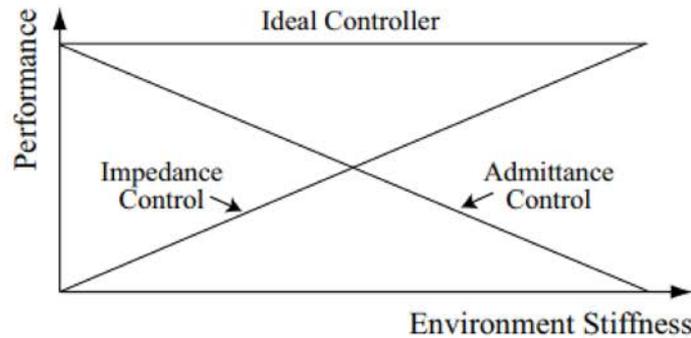


Figura 2.1: Desempeño de sensores por impedancia o admitancia en función de la rigidez. Fuente: Ott *et al.* (2010)

### 2.2.2. Control por impedancia

De acuerdo con Grioli y Bicchi (2010), caracterizar los sistemas de impedancia a tiempo real es de suma importancia, para conocer la respuesta mecánica de un cuerpo, en interacción con el medio ambiente. Muchos robots cuentan con sistemas que permiten cambiar su impedancia mecánica para realizar mejor una tarea y adaptarse a un entorno; esto es posible mediante diferentes mecanismos, tales como actuadores de rigidez variable o mediante control por impedancia. No obstante, la impedancia es

muy difícil de medir, dado que no se puede caracterizar como una cantidad física que se pueda expresar con una cantidad y una referencia; si no más bien como un operador que relaciona el curso temporal de las magnitudes físicas de fuerza y desplazamiento.

Con el fin de elaborar un modelo matemático de la impedancia de un sistema, se parte del modelo más simplificado de impedancia mecánica, el cual corresponde al análisis de un bloque con resorte y amortiguador, como se muestra en la figura 2.2.

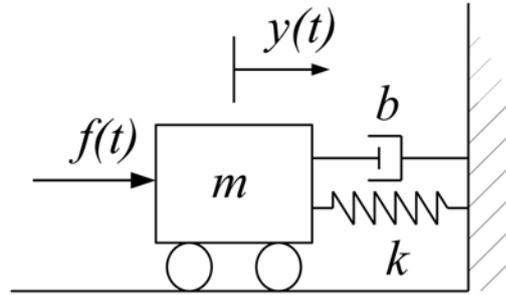


Figura 2.2: Diagrama de bloque y resorte. Fuente: (Grioli y Bicchi, 2010)

Elaborando el diagrama de fuerzas sobre el bloque, se obtiene la ecuación 2.1, en la cual la variable  $f(t)$  corresponde a la fuerza externa aplicada sobre el bloque,  $y(t)$  la posición en función del tiempo, las constantes  $b$ ,  $m$  y  $k$  y corresponden a la viscosidad, masa y coeficiente de elasticidad respectivamente.

$$f = m\ddot{y} + b\dot{y} + ky \quad (2.1)$$

Aplicando la transformada de Laplace sobre las variables:

$$F(s) = (ms + bs + k)Y(s) \quad (2.2)$$

$$Z(s) = ms + bs + k \quad (2.3)$$

Por lo tanto, la impedancia mecánica del sistema corresponde a la expresión 2.3. Finalmente para determinar la admitancia, esta se puede entender como el inverso de la impedancia, tal y como se muestra en la ecuación 2.4:

$$A(s) = \frac{1}{ms + bs + k} \quad (2.4)$$

De acuerdo con Chinchilla (2014), la diferencia principal entre un sistema de control por impedancia y uno de control por admitancia radica en su implementación. La impedancia requiere la lectura de la velocidad y posición para generar una referencia de torque o fuerza, contraria al control por admitancia, donde se necesita la medición del torque o fuerza y la posición para crear una referencia de velocidad. A continuación se muestra el diagrama de control de ambos sistemas.

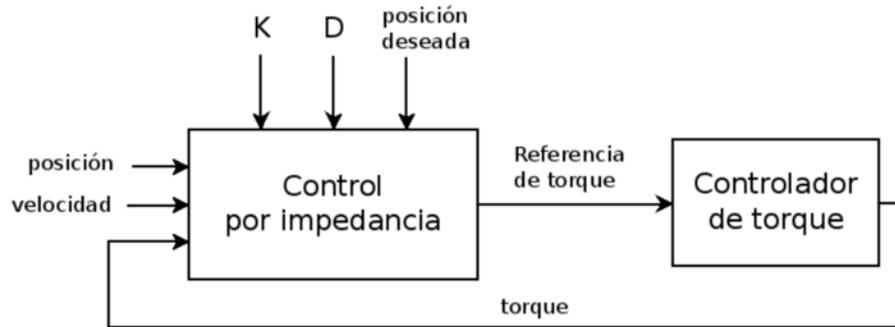


Figura 2.3: Diagrama de bloques de control por impedancia. Fuente: (Chinchilla, 2014)

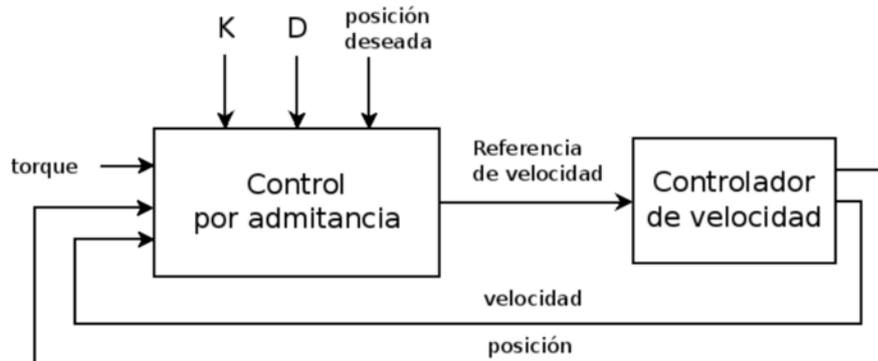


Figura 2.4: Diagrama de bloques de control por admitancia. Fuente: (Chinchilla, 2014)

En la figura 2.3 se muestra el diagrama de control por impedancia y en la figura 2.4 el diagrama de control por admitancia; se puede observar como un sistema representa el inverso del otro.

Existen propuestas de solución que permiten la obtención de sistemas más equilibrados, con respuestas precisas para un amplio rango de rigidez. En estos casos se requiere la implementación de sistemas híbridos que intercambien su funcionamiento entre impedancia y admitancia en función de la rigidez. Autores como Ott *et al.* (2010)

y Mathis (2012) muestran el desarrollo de sistemas de control híbridos de admitancia e impedancia.

## 2.3. Diseño mecánico

De acuerdo con Budynas y Nisbett (2012) “diseñar es formular un plan para satisfacer una necesidad específica o resolver un problema particular” (p.5), este proceso se puede aplicar a distintas ramas del saber y suele requerir la toma de decisiones que lleven a un proceso innovador. Un diseño es altamente iterativo y en algunos casos no se cuenta con suficiente información.

El diseño de un prototipo contempla la aplicación de diferentes disciplinas, y se deben estudiar multitud de factores tales como, su desempeño mecánico, las características del material, su manufactura, el costo, entre otras; es por este motivo que se debe realizar una fundamentación adecuada con el fin de que el diseño cumpla sus objetivos de forma óptima y eficiente.

El diseño de la geometría de una celda de carga, debe ser tal que propicie la deformación controlada en algunas zonas de su geometría, dicha deformación debe ser uniforme y de una magnitud suficiente para que pueda ser captada mediante el uso de galgas extensiométricas. Por otra parte, debe de asegurarse el menor esfuerzo posible en las zonas donde no se colocaran las galgas de forma que no se tengan esfuerzos o deformaciones en zonas que no están siendo controladas (Measurement Group, 1988).

### 2.3.1. Selección de materiales

En el proceso de diseño, uno de los principales factores a tener en cuenta es la selección de los materiales. Una correcta selección, debe estar enfocada en buscar un material con el mejor desempeño para los requerimientos, sin dejar de lado el costo del mismo. Se podría considerar un sensor fuerza/torque, como un resorte de alta precisión que trabaja con deformaciones muy pequeñas; el material del sensor debe contar con propiedades tales como linealidad en la deflexión, baja o nula histéresis, baja probabilidad de creep y baja relajación de esfuerzos (Measurement Group, 1988).

La magnitud en la que los materiales resisten los esfuerzos es una de las propiedades más importantes en un diseño, es común en materiales realizar lo que se conoce como

una prueba de tracción; a partir de la cual se muestra el comportamiento que exhiben los materiales al ser sometidos a una fuerza que tiende a estirarlos. Este tipo de pruebas están normadas por los estándares de la ASTM, los cuales indican los parámetros bajo los cuales se realizan las pruebas. (Budynas y Nisbett, 2012)

En estas pruebas se obtiene como resultado una curva de esfuerzo-deformación, tal y como la que se muestra en la figura 2.5. Es posible caracterizar 2 etapas, conocidas como etapa elástica e inelástica. En la región elástica, la relación entre el esfuerzo y la deformación es lineal, y el material vuelve a su longitud original luego de que se remueve la fuerza aplicada. Una vez que se sobrepasa el límite de fluencia del material, la deformación que experimenta se vuelve permanente impidiendo que el material recupere la forma que tenía antes de deformarse.

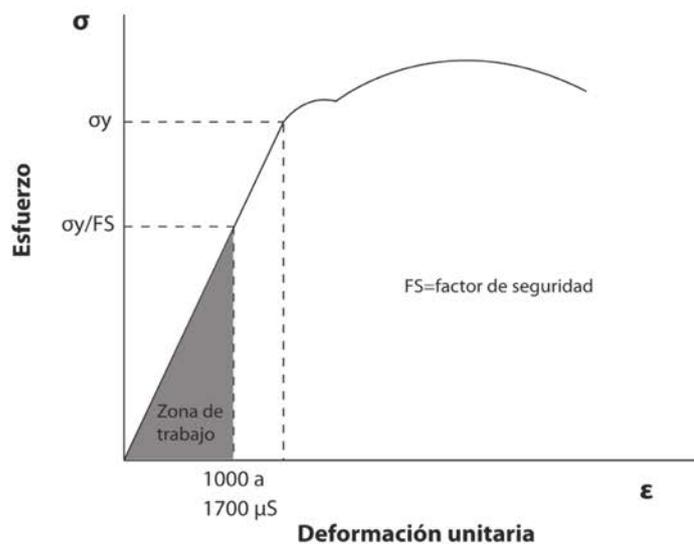


Figura 2.5: Gráfico del esfuerzo en función de la deformación unitaria del acero, donde se ilustra la zona de trabajo según el factor de seguridad seleccionado. Fuente: (Carro y Tioli, 2012)

Conocer estas regiones permite seleccionar un material con propiedades que vayan acorde al diseño requerido; un sensor de fuerza/torque, requiere que el material cuente con una elasticidad suficiente para que el material no alcance su esfuerzo de fluencia y como consecuencia se deforme permanentemente.

Es por este motivo que se establecen factores de seguridad en el material que permitan operar siempre en el rango elástico. La mayor parte de los diseños comerciales deben ser capaces soportar un sobreesfuerzo de un 150 % o 200 % del esfuerzo máximo de operación. Muchas características de este tipo de instrumentos, tales como la ausencia de fluencia, la linealidad, baja histéresis, se consiguen minimizando los niveles de esfuerzo en toda la estructura. Bajos esfuerzos propician un comportamiento más cercano al ideal (Measurement Group, 1988).

Por otra parte, la deformación que experimenta el material, debe ser congruente con la deformación de diseño de la galga, en la sección 2.4.2 *Galgas* se presenta mayor detalle sobre los rangos de operación; a modo de síntesis, la mayor parte de las galgas comerciales operan en un rango entre  $1000 \text{ } \varepsilon\mu$  y  $1700 \text{ } \varepsilon\mu$  (Measurement Group, 1988).

Existen diversas formas en las que se puede seleccionar los materiales para este tipo de sensores, se puede dividir en dos categorías, en las que se encuentran los materiales con un módulo de elasticidad alto como es el caso de los aceros y los materiales de bajo modulo de elasticidad, tales como los aluminios y otras aleaciones de material no ferroso.

Se realiza esta distinción al comparar ambos tipos de materiales ante escenarios de alta y baja carga. A modo de ejemplo, en condiciones con esfuerzos muy altos, si se utiliza un material de bajo modulo, es necesario utilizar un gran área de sección para que la deformación del material se mantenga en el rango de operación de la galga. Por otra parte, si el esfuerzo es muy bajo y se utiliza un material de modulo alto, las zonas en las que se centraliza el esfuerzo deben tener un area de sección muy pequeña y se corre el riesgo de que sucedan efectos como el pandeo.

Se destacan entre los aceros, los de designación AISI 4140 y AISI 4340 los cuales, son usados a nivel comercial en el desarrollo de celdas de carga de gran capacidad debido a sus excelentes propiedades y su fácil maquinabilidad. Por otra parte, sus propiedades pueden ser modificadas luego de ser maquinado, mediante un tratamiento térmico a baja temperatura (Measurement Group, 1988).

De acuerdo con Carro y Tioli (2012), se recomienda el uso del acero AISI 1020, a pesar de que no es comúnmente recomendado para el desarrollo de celdas de carga, exhibe características adecuadas para esta aplicación debido a que cuenta con un com-

portamiento muy cercano al lineal en el rango elástico. Además, es un material de un bajo costo, fácil acceso y fácil de maquinar.

En el caso de materiales de bajo módulo, se destacan las aleaciones de aluminio 2024-T4, 2024-T351 y la 2024-T81. Cabe destacar, que no existe un límite a partir del cual se pueda definir si se debe utilizar un material de alto o bajo modulo, por lo tanto, las propiedades de cada material deben ser evaluadas para las condiciones geométricas y los requerimientos de esfuerzo, con el fin de determinar el material que mejor se adapte a las condiciones (Measurement Group, 1988)

### 2.3.2. Manufactura de prototipos

Según Groover (2007), la manufactura se define como “la aplicación de procesos físicos y químicos para alterar la geometría, propiedades o apariencia de un material de inicio dado para fabricar piezas o productos”. Este proceso puede involucrar la utilización de máquinas, herramientas, energía y trabajo manual o por maquinaria automatizada y controlada por computadora supervisada de forma manual. Asimismo, deben valorarse las características del material a manufacturar, con el fin de realizar un procesamiento adecuado, así como de tomar las medidas necesarias en el tratamiento del mismo, con el fin de evitar afectaciones que perjudiquen las propiedades del diseño final.

#### Procesos de manufactura

Las operaciones de procesamiento en la manufactura utilizan energía para modificar la forma, las propiedades físicas o la apariencia de la pieza en forma controlada por medio de maquinaria y herramientas. Dentro de las operaciones de procesamiento, se encuentran las operaciones de formado, las cuales alteran la geometría del material utilizado inicialmente con procesos como el moldeado, la forja y el maquinado (Groover, 2007).

Uno de los procedimientos presentes dentro de las operaciones formado consiste en la remoción de material, en el cual, a partir de una pieza inicial, se retira el exceso de material, de manera que la forma resultante consiga la geometría deseada. En este tipo de método, uno de los procesos más importantes es el maquinado, el cual tiene como

ventaja la gran variedad de materiales de trabajo que se pueden utilizar, así como la variedad de geometrías que se pueden generar y la gran precisión dimensional lograda en el prototipo final (Groover, 2007).

En las operaciones de maquinado se encuentran el torneado, el taladrado y el fresado. El fresado consiste en hacer pasar una pieza enfrente de una herramienta cilíndrica rotatoria con múltiples bordes o filos cortantes. En las máquinas que realizan esta acción, llamadas fresadoras, el eje de rotación de la herramienta cortante es perpendicular a la dirección de avance. La acción consiste en una “operación de corte interrumpido”, debido a que los dientes de la herramienta de corte, llamada fresa o cortador para fresadora, entran y salen de la pieza diseñada. El eje de rotación de la fresa es perpendicular a la dirección de avance (Groover, 2007).

### **CNC aplicado a fresadoras**

Se considera un dispositivo de CNC cuando se puede dirigir el posicionamiento de algunos de sus componentes mediante órdenes elaboradas de forma automática. El control de los movimientos de la herramienta de trabajo se da con relación a un sistema de coordenadas de la máquina (Ovalle Yusti, 2017).

Dentro de la clasificación de estas máquinas, se encuentra la máquina fresadora CNC. Como menciona Ruiz, el sistema cuenta de una computadora y una máquina fresadora, la cual está diseñada para obedecer las órdenes de un programa dado. De esta forma, para su funcionamiento, primeramente, se da una programación con las órdenes de maquinado establecidas en el diseño del prototipo, luego esta pasa a una interfaz para finalmente llegar a la fresadora CNC y poder ejecutar las órdenes especificadas.

La programación de las máquinas CNC consiste en un conjunto de órdenes con una secuencia lógica, las cuales forman un programa de maquinado; asimismo puede darse de forma manual o automática (Jiménez Vásquez, 2014). En la programación de tipo manual, el operario debe realizar los cálculos y razonamientos necesarios para escribir el programa necesario. Para estos casos, los códigos de programación se encuentran normados según DIN 66024 y 66025. En la programación automática, la fresadora trabaja con los mismos comandos utilizados en la programación manual, sin embargo, los cálculos se realizan en el ordenador, el cual provee como resultado un programa de la pieza en el lenguaje de la máquina (Ovalle Yusti, 2017).

En los sistemas CNC existen 3 tipos de control básicos para el movimiento, de punto a punto, paraxial y de contorno. En el control de punto a punto, se posiciona la herramienta de corte en un punto predefinido sin importar la trayectoria seguida, ya que el único interés es que la herramienta alcance con precisión y rapidez el punto. El movimiento de tipo paraxial permite el mecanizado en direcciones paralelas al eje de la máquina y se controla por el accionamiento de un eje mientras los otros permanecen bloqueados. El contorno permite que la herramienta de corte siga cualquier dirección por medio de la regulación simultánea y continua de los ejes distintos (Ovalle Yusti, 2017).

### **Consideraciones del material en la manufactura**

Las propiedades del material utilizado en la manufactura poseen una influencia significativa en el maquinado efectivo del prototipo. La maquinabilidad se refiere a la facilidad con la que se puede maquinar un material, utilizando las herramientas y condiciones de corte adecuadas (Groover, 2007). De esta forma, es esencial la elección de un material con las propiedades requeridas para el correcto desempeño de la pieza diseñada, con la consideración de las características que este posea al ser tratado, de forma que sea posible obtener la geometría deseada con los procedimientos de manufactura disponibles (Measurement Group, 1988).

Además de la maquinabilidad, también debe considerarse el comportamiento del material en las condiciones de maquinado y su variación respecto a las condiciones a temperatura y presión ambientales. Algunos materiales pueden deformarse fácilmente a altas temperaturas, por lo que si se llega a esta condición en el maquinado de la pieza, la geometría de la misma puede desfigurarse en el proceso. Además, debe tomarse en cuenta la accesibilidad comercial del material, así como la cantidad y la forma disponibles para la adquisición, ya que estas deben ser concordantes con las necesidades del proyecto. Como último aspecto, con relación a las condiciones del material en el mercado, debe considerarse el costo del mismo en las condiciones requeridas por el diseño, el cual debe ajustarse a el presupuesto establecido para el desarrollo del prototipo (Measurement Group, 1988).

### 2.3.3. Calibración de prototipos

Para un efectivo funcionamiento de dispositivos de medición en general, se debe realizar una calibración de los mismos. La calibración consiste en “un procedimiento en el cual el instrumento de medición se verifica contra un estándar conocido” (Groover, 2007). Este estándar conocido, cuyo valor verdadero es aceptado se denomina patrón (Creus Solé, 2009). Una vez realizada la calibración, el instrumento debe ser capaz de conservar su calibración, de forma que pueda continuar midiendo la cantidad deseada sin desviarse del estándar. La capacidad de conservar la calibración se denomina estabilidad y la tendencia a perder su precisión gradualmente en relación con el estándar se llama desviación (Groover, 2007).

Al realizar una medición, la magnitud sujeta a medición por parte del instrumento se denomina mensurando. Por otro lado, las mediciones obtenidas vienen asociadas a un valor de incertidumbre, la cual se define como la dispersión de los valores de medida dados por el instrumento asociados a un mismo mensurando. De esta manera, la incertidumbre está compuesta por un campo de valores dentro de los que se encuentra el valor verdadero del mensurando. La incertidumbre, puede verse afectada por las condiciones ambientales, variaciones de la medida en las observaciones repetidas en condiciones similares, valores inexactos de los instrumentos patrón, así como muestras de producto o magnitudes de medición poco representativas (Creus Solé, 2009).

En la calibración, al comparar las mediciones obtenidas mediante un instrumento dado con respecto a la medida del mensurando, existe una relación entre la medida del estándar y el valor obtenido con el error asociado respecto al valor de la referencia, la cual se define como exactitud. De esta forma, una baja incertidumbre implica una baja exactitud. Asociada a esto puede definirse la precisión de una medida como el grado de dispersión del resultado de la medida cuando se repite un número determinado de veces en condiciones especificadas (Creus Solé, 2009).

Por otra parte, la calibración también se encuentra asociada al concepto de tolerancia, denominado como la desviación permitida respecto a un valor especificado. Dentro de los factores que influyen en la tolerancia de una medición está la capacidad del proceso de calibración y la consistencia del dispositivo. Las tolerancias especificadas deben encontrarse dentro de los requerimientos del proceso contemplado; asimismo, deben ser mayores a los valores de exactitud, de forma que las variaciones entre la medición

obtenida por el instrumento y el mensurando puedan ser previstas en el procedimiento (Creus Solé, 2009).

La calibración realizada debe tener trazabilidad, es decir, debe poder relacionarse con las normas adecuadas a nivel nacional e internacional por medio de una cadena continua de comparaciones. Como parte de los requerimientos necesarios para asegurar un proceso trazable, los equipos utilizados en la calibración deben ser calibrados de forma periódica por equipos de referencia normalizados de alto nivel (Creus Solé, 2009).

### **Calibración de celdas de carga**

Para el caso de la calibración de celdas de carga, en el trabajo realizado por Carro y Tioli (2012) se recomienda realizar el procedimiento con base en normas como la ISO 376 y la ASTM E74. Los resultados de la calibración son el indicativo del funcionamiento del dispositivo calibrado, ya que, dependiendo de los resultados obtenidos, se puede determinar si la celda cumple con los requerimientos de la aplicación propuesta (Carro y Tioli, 2012).

La norma ASTM E74 se describe las prácticas para la calibración y verificación para instrumentos de medición de fuerza. La calibración de los dispositivos de medición de fuerza se describe como la relación entre la fuerza aplicada y la deflexión ocasionada en el instrumento. Conforme la fuerza se aplica, la forma del elemento cambia, lo que causa una alteración su resistencia a la deformación. Esto causa un cambio gradual y continuo en la gráfica de fuerza contra deformación del material utilizado en el instrumento de deformación a través del rango de medición del mismo. Este comportamiento es una característica constante del instrumento y se modifica únicamente de que se apliquen cargas que causen la sobrecarga del elemento (ASTM E74-18e1, 2019).

En sobreposición a la curva de la gráfica de fuerza contra deformación se encuentran las variaciones de las medidas indicadas por el instrumento, las cuales son causadas por imperfecciones del sistema físico y eléctrico. La estabilidad de estas imperfecciones es variable y algunas pueden ser menos estables que la curva de fuerza contra deformación del material, lo cual puede causar un cambio significativo entre una calibración y otra (ASTM E74-18e1, 2019).

La curva de fuerza contra deformación del instrumento se determina por medio de

la medición de la deformación lograda con la aplicación de fuerzas conocidas en el rango de medición del dispositivo. Posteriormente se ajusta una ecuación polinomial con el fin de predecir la deflexión en el rango de de fuerzas verificado. Esta ecuación compensa la no linealidad de la curva obtenida. La desviación estándar resultado de la diferencia entre los valores de deflexión medidos por el instrumento y los obtenidos por medio de la ecuación polinomial provee una medida del error de los datos obtenidos en la curva por medio de la ecuación (ASTM E74-18e1, 2019).

Para la aplicación de las fuerzas, en esta misma norma se especifica el uso de 30 fuerzas por cada calibración, con al menos 10 fuerzas de distinto valor. Según esto, la selección de las fuerzas debe hacerse cuidadosamente, ya que consiste en un factor esencial para la obtención de muestras apropiadas e imparciales del rango de medición. Por esta razón, se recomienda que la selección de las fuerzas a aplicar se realice por el laboratorio de calibración o en su defecto, con las indicaciones dadas por la norma (ASTM E74-18e1, 2019).

#### 2.3.4. Modelado por elementos finitos

En muchos problemas en los que se usan geometrías sencillas, tales como vigas, barras, elementos de sección constante, entre otros es posible elaborar soluciones mediante ecuaciones mecánicas. Para estos casos, los modelos empleados permiten obtener soluciones muy cercanas a las reales. No obstante, con forme se aumenta la complejidad de elementos que se estudian, es requerido usar otros métodos de solución tales como la experimentación o los métodos numéricos (Budynas y Nisbett, 2012).

El modelado por elementos finitos, es uno de los métodos usados para solución de problemas de mayor complejidad, una de las ventajas que aporta es una excelente integración con software de diseño asistido por computadora. De esta forma, se puede pasar de los modelos dibujados a su análisis mecánico con gran facilidad.

Cabe destacar, que un modelo de solución por elementos finitos debe estar basado en un modelo matemático del problema. El análisis computacional permite dar solución a modelos matemáticos de gran complejidad, pero la solución por elementos finitos es incapaz de generar más información de la que esta contenida en el propio modelo matemático (Bathe, 2006).

### Procedimiento para el modelado por elementos finitos

Autores como Logan (2011), han establecido una serie de pasos requeridos para la solución de un problema mediante el método de elementos finitos, a modo de síntesis, a continuación se muestran las principales consideraciones del procedimiento descrito por el autor:

- Paso 1. En primera instancia, se debe discretizar la pieza en un sistema equivalente de elementos con nodos asociados. La discretización puede realizarse mediante el uso de diferentes geometrías. Como norma general, se debe buscar la discretización que asegure un modelo funcional, pero que sea lo suficientemente óptimo para que se minimicen los requerimientos de capacidad computacional.
- Paso 2. Consiste en la elección de una función de desplazamiento para cada uno de los elementos. A partir del uso de funciones lineales, cuadráticas, cúbicas o polinomiales, se determinan las relaciones para los nodos.
- Paso 3. Se establecen las relaciones de esfuerzo y deformación para cada uno de los elementos finitos. La calidad de los resultados depende directamente de una predicción precisa del comportamiento de los materiales.
- Paso 4. En esta etapa, se desarrolla la matriz de rigidez. Algunos de los métodos que pueden ser usados para establecer esta matriz son el método de equilibrio directo, métodos de trabajo y energía, entre otros.
- Paso 5. Se establecen las ecuaciones de cada elemento en la matriz global y se establecen las condiciones de frontera.
- Paso 6. Se desarrolla la solución de la matriz expandida a partir de las ecuaciones desarrolladas en el punto 4 y las condiciones de frontera del punto 5. A partir de este punto se obtienen los desplazamientos en cada punto de análisis.
- Paso 7. Se puede obtener las deformaciones y esfuerzos de cada punto mediante relaciones matemáticas con los desplazamientos obtenidos en el punto anterior. Finalmente, se realiza una interpretación de los resultados obtenidos. Se puede utilizar programas de post procesamiento en computadora para presentar la información de forma gráfica.

Cabe destacar, que este proceso puede variar, y en muchos casos algunas herramientas computacionales automatizan algunas partes del proceso, no obstante, es de utilidad como una guía básica de la dirección a seguir en este tipo de análisis.

## 2.4. Sensores y medición

### 2.4.1. Transductores y sensores

Un sistema de medida es aquel que permite la asignación de manera objetiva de un valor numérico para describir una cualidad o un evento. Una medición se realiza con el objetivo de vigilar o dar seguimiento a un proceso, siempre y cuando sea experimental e independiente del observador; además de permitir que exista una correspondencia entre las propiedades numéricas y las relaciones entre las propiedades descritas. Se define como transductor en términos generales a un dispositivo que es capaz de convertir señales de forma física. Esto se consigue mediante la extracción de una pequeña parte de la energía del entorno que se mide, asegurándose de que no lo perturbe de forma significativa. (Areny, 2005)

Por su parte, en comparación con el transductor, un sensor tiene una definición más general, siendo así un dispositivo que convierte una señal de entrada en una de salida que es función de la variable medida. Un sensor amplía las capacidades sensoriales para captar cantidades físicas, mientras que un transductor únicamente genera una transformación entre las señales de entrada y salida. (Areny, 2005)

En algunas literaturas, los términos pueden llegar a ser usados como sinónimos y la diferenciación suele ser sutil. En el caso específico de la captación de deformación, la pieza del material al estar en contacto con la magnitud física, como es el caso de la fuerza, se genera una variación de su geometría. La variación puede ser transformada en una señal eléctrica mediante el uso de una galga extensiométrica. En este ejemplo, la pieza al estar en contacto con la magnitud física y variar una de sus propiedades, está actuando como un sensor y la galga extensiométrica cumple el papel de transductor.

### 2.4.2. Galgas

#### Funcionamiento

Las galgas extensiométricas se encuentran dentro de la categoría de sensores resis-tivos, dado que este tipo de sensores se basan en la variación de la resistencia eléctrica a partir del cambio en una variable física, tales como térmicas, magnéticas, ópticas químicas y mecánicas.

Es posible definir una galga extensiométrica, de acuerdo con Areny (2005) como: “un resistor dispuesto en una forma que sea sensible a la deformación” (p. 63), estos sensores varían su resistencia cuando son sometidos a un esfuerzo mecánico.

En 1856 Lord Kelvin estableció las bases para comprender los parámetros que esta-blecen la resistencia eléctrica. Analizando el caso de un hilo metálico, se puede deter-minar la resistencia eléctrica como:

$$R = \frac{l\rho}{A} \quad (2.5)$$

Donde:

$\rho$  resistividad del material.

$A$  área transversal del hilo metálico.

$l$  longitud del hilo metálico.

A partir de la expresión anterior, se puede analizar individualmente la variación a la que se someten cada uno de los parámetros al ser sometidos a un esfuerzo mecánico, de forma que se establece una expresión más apropiada para las galgas.

Para este tipo de sensores se establece la resistencia eléctrica mediante la siguiente expresión:

$$R = R_0(1 + K\varepsilon) \quad (2.6)$$

Donde:

$\varepsilon$  es la deformación unitaria.

$R_0$  es la resistencia en reposo.

El parámetro  $K$  es la sensibilidad de la galga y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$K = 1 + 2\nu + C(1 - 2\nu) \quad (2.7)$$

Donde:

$\nu$  es el coeficiente de Poisson.

El parámetro  $C$  se define como la constante de Bridgman, y depende de los materiales usados en el diseño de las galgas. Para aleaciones típicamente utilizadas ronda entre 1,13 y 1,15 en el caso del platino adquiere un valor de 4,4 (Areny, 2005).

### **Consideraciones de implementación**

Las galgas extensiométricas no funcionan de forma ideal y pequeñas variaciones en parámetros de operación, tales como la dirección de los esfuerzos, cambios de temperatura, sobreesfuerzos, entre otros, ocasionan la obtención de resultados erróneos.

Se deben seguir las siguientes consideraciones para propiciar la exactitud de las mediciones con las galgas:

**Deformación no lineal:** las propiedades elásticas de las galgas permiten que se deformen en un rango definido, sin que el esfuerzo ocasione que se deforme permanentemente; en otras palabras, que no se sobrepase el punto de fluencia del material. Basado en estudios del comportamiento elástico lineal de los materiales, compatibilidad del instrumento y fatiga en galga, se recomienda operar en un rango entre  $1000 \varepsilon\mu$  y  $1700 \varepsilon\mu$ .

Un diseño adecuado de una celda de carga, debe estar protegido contra el sobreesfuerzo, dado que este es el principal motivo de falla en este tipo de dispositivos; en los casos en los que no se puede proteger al instrumento mediante una restricción mecánica, se debe tener un factor de seguridad conservador que evite el fallo del sensor.

**Instalación:** por otra parte, se debe asegurar una correcta instalación de la galga al material, dado que se busca que el esfuerzo sea totalmente transmitido a la galga. Se debe proteger de agentes del medio que puedan afectar su funcionamiento, así como usar adhesivos que se mantengan estables con el tiempo y la temperatura. En galgas con materiales orgánicos, o adhesivos, no deben superar rangos de operación con temperaturas que rondan entre 66 °C y 260 °C (Measurement Group, 1988).

Además, las galgas pueden ser sensibles a la rugosidad de la superficie, se debe buscar la homogeneidad de esta con el fin de evitar errores en la medición, producto de singularidades.

**Dirección del esfuerzo:** las galgas extensiométricas están diseñadas para cambiar su resistencia eléctrica cuando se someten a un esfuerzo longitudinal, por lo tanto la instalación y el diseño de la geometría en la que se incorporen debe evitar la existencia de esfuerzos perpendiculares a la superficie de la galga. El diseño propio de la galga busca reducir la sensibilidad transversal, tal y como se observa en la figura 2.6; en esta se observa como la sección longitudinal es la más amplia, y en la cual se colocan varios tramos de cable con el fin de que se deformen cuando se aplique la carga en esa dirección. Con esto se consigue reducir la sensibilidad transversal entre un 1% y 2% de la longitudinal (Areny, 2005).

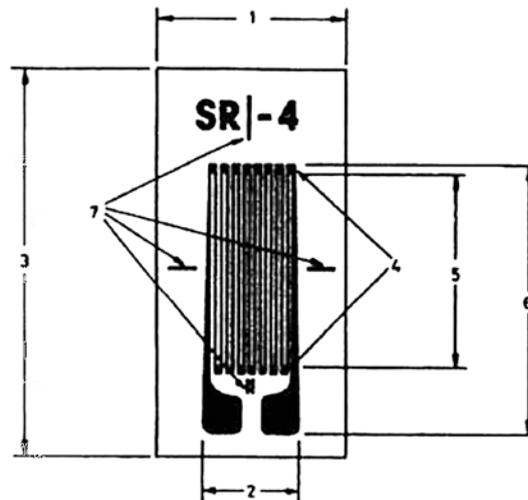


Figura 2.6: Partes de una galga extensiométrica. Fuente: (Areny, 2005)

Las partes numeradas en la figura anterior corresponden a: 1 Anchura de soporte; 2 anchura de la galga; 3 longitud del soporte; 4 extremos ensanchados; 5 longitud activa; 6 longitud total de la galga; 7 marcas de alineación.

Además, se debe buscar en el diseño del sensor que las mediciones sean independientes del punto de aplicación de la carga, con este fin se debe realizar un correcto posicionamiento de la galgas y una adecuada estructura de soporte (Measurement Group, 1988).

**Temperatura:** se debe tener en cuenta los cambios de temperatura, dado que es uno de los principales factores que puede afectar el funcionamiento de las galgas, incluso en las de materiales metálicos pueden haber variaciones de hasta  $50 \mu\epsilon/^\circ C$ . Existen métodos tales como el uso de galgas autocompensadas, en las cuales se aumenta la resistividad mediante una disminución en la resistencia producto de una expansión en el material de soporte. Cabe destacar que el cambio de temperatura, puede darse incluso por la misma disipación de calor del circuito de la galga (Areny, 2005).

**Compatibilidad de materiales:** se debe realizar una consideración adicional cuando se realizan uniones de galgas con un material distinto al metal base; cuando se trabaja con corriente continua, se genera una interferencia producto de las fuerzas termo electromotrices. Esto se puede solucionar, filtrando la señal, seleccionado galgas del mismo material, usando alimentación de corriente alterna o por medio del método de insensibilidad intrínseca (Areny, 2005).

**Punto de análisis de la galga:** además, se parte de un modelo idealizado en el que se asume que la medición de la galga se realiza en su centro geométrico, no obstante, las propias dimensiones de la galga pueden afectar si no se tiene una distribución regular de esfuerzos sobre la superficie, por ejemplo, en casos los que se tiene esfuerzos producto de vibraciones, la longitud de onda de estas debe ser mucho mayor que la de las galgas (Areny, 2005).

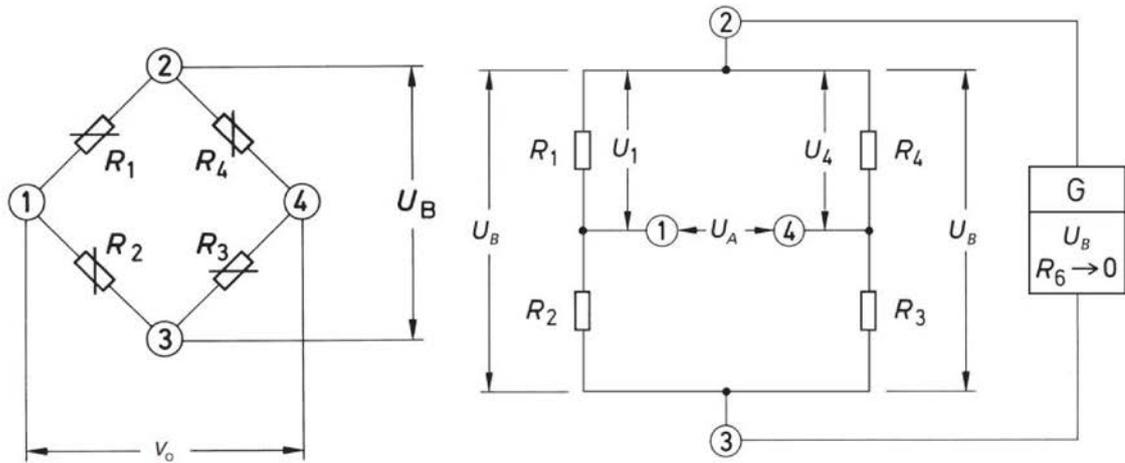
**Maquinado e instalación accesible:** se debe contemplar que los aspectos relacionados con la fabricación e instalación de una celda de carga deben ser razonables y económicamente competitivos, en comparación con las opciones disponibles en el mercado. Además, la geometría diseñada debe poder ser fabricada mediante métodos accesibles a nivel industrial. El procedimiento de preparación e instalación de las galgas debe ser contemplado en el proceso de estimación del costo del dispositivo (Measurement Group, 1988).

## 2.5. Electrónica de control

### 2.5.1. Circuitos de medición fuerza/torque

Según Carro y Tioli (2012), “una galga extensiométrica consiste en una lámina de material a la cual se le ha impreso un circuito eléctrico resistivo”. Para su funcionamiento, es adherida al elemento de carga de forma que cuando es sometido a fuerzas, el material en conjunto con la galga va a deformarse, por lo que se va a presentar un cambio en la resistencia del circuito eléctrico del material correspondiente a la deformación unitaria existente en el elemento.

Con el fin de medir las deformaciones unitarias con mayor exactitud y precisión, las galgas se conectan en una configuración de manera que formen un circuito conocido como “Puente Wheatstone”. Este permite realizar una autocompensación por la temperatura, de forma que no se tenga que hacer correcciones posteriores por este efecto, así como compensar esfuerzos no deseados. El circuito de puente Wheatstone funciona de forma que permite determinar el valor de la resistencia absoluta en comparación con una resistencia conocida. De esta manera permite también conocer el cambio relativo en el valor de las resistencias (Hoffman, sfb).



(a) Representación de puente Wheatstone

(b) Alimentación de voltaje de puente Wheatstone

Figura 2.7: Diagrama y funcionamiento de puente Wheatstone. Fuente: (Hoffman, sfb)

La representación del circuito de puente Wheatstone se muestra en la figura 2.7a. En esta, las galgas se representan como las resistencias variables  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  y  $R_4$ . Las esquinas 2 y 3 corresponden a los ramales donde se conecta el voltaje de la fuente, designada en este caso como  $U_B$ . El circuito en el contexto de aplicación en la determinación se utiliza esencialmente con el fin de obtener la medición del voltaje en  $V_O$  y así conocer la magnitud de la variación en la magnitud de las resistencias de los ramales. Debido a esto, para el funcionamiento del circuito, se procede a realizar una medición del voltaje  $V_o$  entre los puntos 1 y 4.

En la figura 2.7b da la representación del puente Wheatstone equivalente a la dada en la figura 2.7a con el voltaje de la fuente de alimentación y una configuración de forma cuadrangular. En esta figura el voltaje entre los ramales se denota como  $U_A$  y el voltaje equivalente de los ramales se denota como  $U_B$ , el cual tiene el mismo valor de voltaje de la fuente al estar conectados en paralelo. Para determinar esta diferencia entre los voltajes  $U_A$ , primeramente se considera el circuito en estado neutro, es decir, los voltajes en los puntos 1 y 4 tienen el mismo valor. De esta forma, la relación entre las resistencias del circuito se da de la siguiente manera:

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

Por otra parte, el voltaje  $U_1$  ubicado entre  $R_1$  y  $R_2$  y el voltaje  $U_4$  ubicado entre  $R_3$  y  $R_4$ , por medio de un análisis de cada ramal en la figura 2.7b se dan de la siguiente forma:

$$U_1 = U_B \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \qquad U_4 = U_B \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right)$$

Asimismo, el voltaje en el punto  $U_A$  corresponde a la diferencia entre los voltajes de los puntos intermedios de cada ramal, de la siguiente forma:

$$U_A = U_1 - U_4$$

De esta manera, la ecuación para determinar el voltaje entre ramales en el puente de Wheatstone se da de la siguiente manera:

$$U_A = U_B \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \qquad (2.8)$$

En aplicaciones de medición con galgas, los valores de  $R_1$  y  $R_2$  son equivalentes, así como los valores de  $R_3$  y  $R_4$ . Al realizar esta equivalencia así como las simplificaciones respectivas, la ecuación 2.8 se da de la siguiente manera:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

En la manufactura de las galgas extensiométricas, el fabricante estipula indica la sensibilidad de deformación del elemento por medio del factor adimensional  $k$ . Este se mide para cada lote de producción y es especificado con un valor nominal con una tolerancia (HBM, sf). Es proporcional al cambio relativo de la resistencia y a la deformación unitaria  $\varepsilon$  que se desea medir en el material, por lo que la relación entre ambas se da de la siguiente forma:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon$$

Con estas sustituciones, a partir de la ecuación 2.8, la relación entre el voltaje de alimentación del puente Wheatstone y el voltaje entre los ramales se puede expresar en términos de la sensibilidad de deformación de la galga extensiométrica  $k$ , así como de la deformación unitaria  $\varepsilon$  a medir en el material de la siguiente manera:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (2.9)$$

Donde:

$U_A$  es el voltaje de alimentación del puente Wheatstone.

$U_B$  es el voltaje entre los ramales del puente Wheatstone.

$k$  es el factor de sensibilidad de deformación de las galgas extensiométricas.

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$  son las deformaciones unitarias del material medido en las galgas correspondientes a las resistencias  $R_1, R_2, R_3$  y  $R_4$  en el puente Wheatstone.

El cambio en el valor de las deformaciones del material  $\varepsilon$  y por tanto de las resistencias, causa un desbalance entre los ramales del circuito, por lo que las señales de la relación de voltaje obtenidas pueden tener un valor positivo o negativo. Una indicación positiva se da debido a que  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$  y/o  $\varepsilon_3 > \varepsilon_4$ ; de forma contraria, una indicación negativa de la señal de voltaje se da si  $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$  y/o  $\varepsilon_4 > \varepsilon_3$ , esto considerando los valores de mayor o menor que en un sentido algebraico y no de magnitudes (Hoffman, sfb).

El desarrollo realizado se dio considerando la configuración de puente Wheatstone dado en la figura 2.7, el cual contiene cuatro galgas extensiométricas, las cuales se representan por las resistencias variables presentes en el circuito. Este tipo de circuito se llama como puente Wheatstone de “puente completo”, sin embargo, este puede modificarse según la cantidad de elementos activos incluidos en el circuito. En forma general, según la configuración y cantidad de galgas en el sistema, se puede dar la siguiente clasificación:

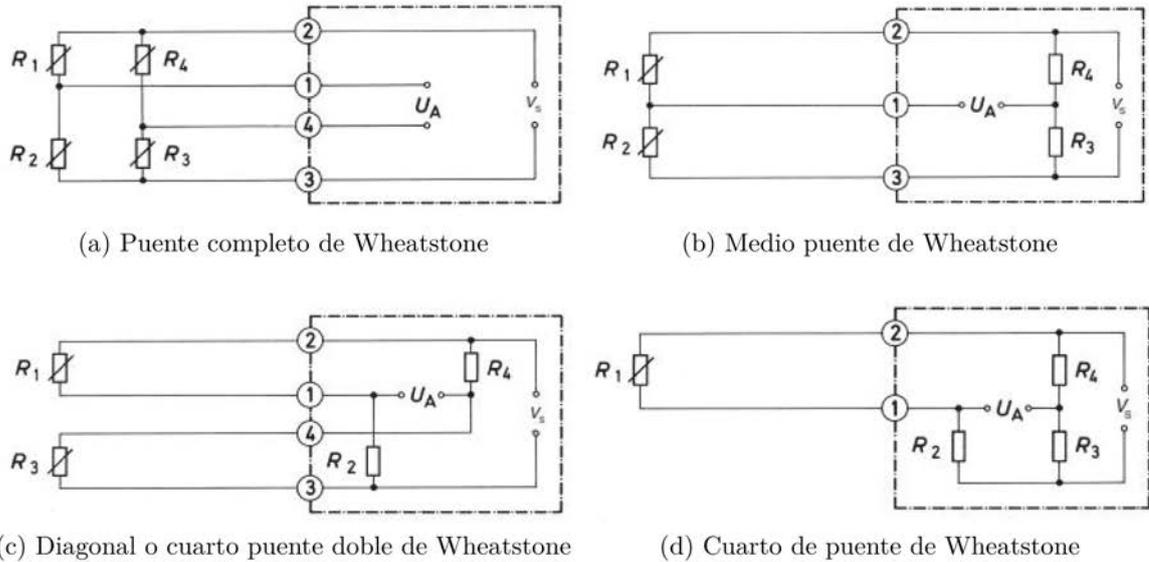


Figura 2.8: Representación de configuraciones del puente de Wheatstone. Fuente: Hoffman (sfb)

En la figura 2.8, el área punteada representa al circuito interno y fuera de este se ubican los elementos en el circuito externo del sistema. Al igual que en la figura 2.7, las resistencias variables representan las galgas extensiométricas utilizadas en la medición de deformación del material. Las configuraciones incluyen distintas cantidades de elementos activos según cada caso, así, el puente completo cuenta con 4 resistencias variables contempladas en el sistema, mientras el medio puente incluye 2 al igual que el cuarto puente y el cuarto de puente considera 1 resistencia variable.

La clasificación dada en la figura 2.8 se da a modo general, sin embargo, cada configuración posee subcategorías, de forma que existe gran variedad de circuitos derivados a partir del puente completo de Wheatstone. El tipo de configuración a escoger depende de la aplicación de la medición, según los efectos a contrarrestar en cada contexto.

Para la correcta utilización del puente Wheatstone en la medición de deformaciones con galgas extensiométricas, y una correcta compensación de los efectos mecánicos y de temperatura, las configuraciones del circuito deben respetar ciertas condiciones. Para la efectiva compensación de los efectos de expansión y deformación del material por temperatura, el puente Wheatstone debe tener simetría y los coeficientes de expansión térmicos deben ser similares en todo los materiales usados. Las resistencias utilizadas

para la compensación deben ser idénticas, así como la temperatura. Con respecto a las galgas, estas deben tener la misma dirección y radio de curvatura (Hoffman, sfa).

El puente Wheatstone puede utilizarse con el fin de realizar compensaciones por interferencias mecánicas, por ejemplo, en la compensación de los efectos de flexión de un material. Para una compensación correcta por estos efectos, debe tomarse en cuenta las tolerancias en la alineación de las galgas extensiométricas, así como la sensibilidad de las tolerancias entre las galgas, la dependencia de los módulos de elasticidad y la dirección de las fuerzas. Además, debe tener presente la deformación en las diferentes secciones transversales del material, ya que puede afectar las mediciones en las secciones adyacentes al mismo. Por otra parte, también se debe determinar el comportamiento del material respecto a la dirección de las deformaciones aplicadas, y si este es constante o variable. A pesar de todas las posibles compensaciones realizadas, en las aplicaciones prácticas siempre existe un valor de tolerancia, por lo que al realizarse las mediciones debe preverse cierto valor de error asociado (Hoffman, sfa).

# Capítulo 3

## Diseño preliminar

En este capítulo se analizan las necesidades requeridas por el funcionamiento de las estructuras de los robots humanoide y asistente. Esto, se realiza con el objetivo de establecer parámetros de condiciones críticas sobre las que se pueda basar el diseño del sensor fuerza/torque del robot humanoide y su validación en las condiciones del robot asistente.

En primera instancia, en la sección 3.1 se analizan las condiciones de trabajo de cada uno de los robots y con respecto a esto, se determinan las magnitudes de fuerza críticas para cada uno. El desarrollo realizado en esta parte consiste en la base para el diseño geométrico realizado en la sección 3.2, donde se proponen diferentes geometrías con el fin de cumplir con los requerimientos en el rango del diseño establecido. El análisis se realiza utilizando el software SolidWorks versión 2018.

### 3.1. Requerimientos del sensor

Se procede a realizar un análisis de los entornos críticos circundantes en las condiciones de operación de los robots humanoide y asistente. Para esto, se determinarán las fuerzas y torques a partir de los ejes coordenados, los cuales se muestran en la figura 3.1.

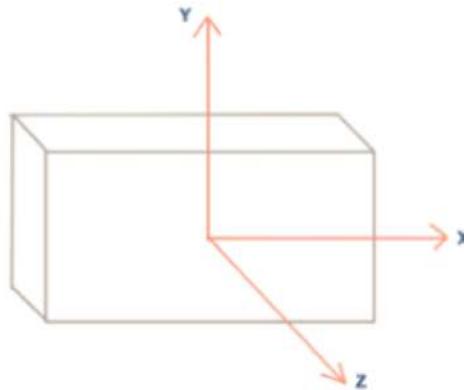


Figura 3.1: Ejes de referencia del modelo de sensor. Fuente: elaboración propia

Como parte de la búsqueda bibliográfica realizada en esta sección se concretaron reuniones con los encargados del laboratorio, el Dr. rer. nat. Federico Ruiz Ugalde y el Lic. Israel Chaves Arbaiza; asimismo se hizo un énfasis en el análisis de los trabajos desarrollados por Ortuño (2018) y Gómez (2015). A continuación se presentan los contextos críticos dados en cada robot.

### 3.1.1. Escenarios críticos de robot humanoide

Se determinan las condiciones críticas del robot humanoide con respecto a los grados de libertad establecidos para el sensor fuerza/torque de la siguiente manera:

#### I. Eje y

##### a) Fuerzas en eje y

Al considerar una distribución geométrica y de masa uniforme del robot, se puede establecer la fuerza vertical en cada sensor como la cuarta parte del peso total asociado al mismo. El peso total se determina en el trabajo final de graduación de Ortuño (2018), donde se especifica con un valor de 321,4 kg (3149,72 N) de forma total y se da un valor de 353,5 kg (3462,34 N) con un 10 % adicional a modo de factor de seguridad. De esta forma, la fuerza vertical en cada rueda y por tanto en el sensor es de 88,35 kg, correspondiente a 865,59 N.

##### b) Momento en eje y

No se considera la presencia de momentos en el eje y como parte del diseño del sensor.

## II. Plano x-z

Para determinar la fuerza máxima a aplicar en el sensor, a continuación se consideran dos escenarios con influencia en el eje x y en el eje z, con el fin de determinar los valores críticos influyentes.

### a) Fuerzas en el plano x-z

En esta categoría se contemplan las fuerzas producidas al robot por el empuje de un ente externo.

#### 1) Fuerza producida por fricción

Se estudia el caso de fuerza de fricción máxima, la cual se puede dar en la situación donde por activación del botón de emergencia, entran de inmediato los frenos de los motores. El frenado produce una fuerza de fricción máxima en el movimiento que lleva la plataforma del robot previamente.

Según P.Beer (2010), bajo el estudio mecánico de fuerzas de fricción, al considerar un cuerpo desde su estado estático al dinámico, se dan los siguientes escenarios:

- a' Las fuerzas aplicadas sobre el cuerpo no son suficientes para moverlo a través de la superficie de contacto, por lo que no existe la fuerza de fricción.
- b' Las fuerzas aplicadas tienden a mover al cuerpo a lo largo de la superficie, pero no son lo suficientes para moverlo. Se da una fuerza de fricción estática, la cual no alcanza su valor máximo en este punto.
- c' Las fuerzas aplicadas producen que el cuerpo esté a punto de deslizarse, momento en el cual se dice que se está en un estado de "movimiento inminente". En este instante, el valor de la fuerza de fricción **es máxima** y es opuesta al sentido del movimiento inminente.
- d' El cuerpo se desliza bajo la acción de las fuerzas aplicadas. Se da una fuerza de fricción dinámica, con un valor menor al alcanzado en el estado de movimiento inminente.

De esta manera, se considera el caso donde la fuerza de fricción es máxima, siendo esta cuando el robot se encuentre en un estado de movimiento inminente. En este escenario, la fuerza de fricción  $F_f$  se calcula mediante la siguiente expresión:

$$F_f = \mu \cdot N$$

Donde  $\mu$  corresponde al valor del coeficiente de fricción y N a la fuerza normal del cuerpo en cada una de las ruedas, con un valor equivalente a la cuarta parte del peso en el caso estático de consideración. Para el caso de movimiento inminente, se calcula con el valor del coeficiente de fricción estático debido a que en este punto el cuerpo se encuentra en reposo. El valor de este coeficiente de fricción es el máximo posible, lo cual da como consecuencia la fuerza de fricción máxima a la que se sometería el robot, por lo que corresponde a un caso crítico.

Para el valor del coeficiente de fricción se considera el valor dado para el contacto entre el material de las ruedas de hule o caucho, con un suelo de concreto seco en una condición máxima de fricción. Para este caso, el coeficiente según Health *et al.* (2003) es de 1,0, por lo que la fuerza de fricción máxima sería equivalente a la fuerza normal en cada rueda, con un valor de 865,59 N.

## 2) Fuerza de empuje

Se considera el escenario donde el robot es sometido a una fuerza de empuje por parte de una persona promedio, utilizando ambos brazos a la altura de los hombros, con lo cual según National Aeronautics and Space Administration (1995), se da una fuerza de empuje de 1285 N. Por lo tanto, la reacción en cada una de las 4 ruedas del robot es de 321,25 N.

## 3) Fuerza de impacto

A nivel cualitativo, tomando en cuenta la seguridad tanto del robot como del medio en el que se desempeña, se considera el escenario donde el robot es sometido a un impacto con algún objeto o persona en su entorno. La fuerza a la que es sometido el robot varía por varios factores

dentro de los que se encuentra: la velocidad a la que se desplazaba el robot, la masa del mismo, la superficie de impacto, o el tiempo que se produce la desaceleración. Con el fin de modelar la fuerza que recibe el robot en su centro de masa ante un impacto, a partir de las ecuaciones de mecánica general, al tomar la desaceleración de forma constante, se plantea la siguiente relación:

$$F_{\text{impacto}} = m_{\text{robot}} \cdot \frac{V_{\text{final}} - V_{\text{inicial}}}{t} \quad (3.1)$$

Donde  $F_{\text{impacto}}$  corresponde a la fuerza de impacto a la es es sometido el robot,  $m_{\text{robot}}$  a la masa del robot,  $V_{\text{final}}$  es la velocidad final del cuerpo luego del impacto y  $V_{\text{inicial}}$  la velocidad inicial del mismo. La variable  $t$  se define como el tiempo en el que se da el impacto, el cual es inversamente proporcional a la fuerza del impacto. El mismo, al ser dependiente de las condiciones en las que se da la colisión, puede ser aproximada mediante experimentación, en las que se den colisiones leves de forma controlada y de esta forma sea posible la medición del tiempo de desaceleración en impacto.

**b) Momentos en los eje x-z**

**1) Momento producido por fuerza de fricción**

El valor del momento dado por esta reacción en el centro de la rueda es el equivalente al valor de la fuerza de fricción máxima posible dado en un escenario de movimiento inminente en cada rueda, multiplicada por el radio. Las ruedas con las que cuenta el robot son marca *AndyMark*, modelo *am-0136*, las cuales poseen un radio de 3" (76,2 mm). El torque equivalente se da de la siguiente manera:

$$T_{\text{empuje}} = F_{\text{friccion por rueda}} \cdot R_{\text{rueda}}$$

Donde  $T_{\text{empuje}}$  corresponde al torque resultante en la rueda debido a la fuerza de fricción en Nm,  $F_{\text{friccion}}$  a la fuerza de fricción resultante en N y  $R_{\text{rueda}}$  al radio de la rueda en m. De esta forma, el cálculo del torque máximo se muestra de la siguiente forma:

$$T_{\text{empuje}} = 865,59 \text{ N} \cdot 0,0762 \text{ m}$$

$$T_{empuje} = 65,96 Nm$$

2) **Momento producido por fuerza de empuje**

Al considerar el diagrama estático de la estructura, la fuerza de empuje es equivalente a la reacción presente en las ruedas del robot, por lo que esta reacción puede trasladarse como un torque equivalente al eje de las ruedas. Esto se realiza al igual que en la sección anterior, considerado el radio de la rueda  $R_{rueda}$ , la fuerza de empuje  $F_{empuje}$ , el torque equivalente  $T_{empuje}$  se da la siguiente forma:

$$T_{empuje} = F_{empuje} \cdot R_{rueda}$$

$$T_{empuje} = 321,25 N \cdot 0,0762 m$$

$$T_{empuje} = 24,48 Nm$$

3) **Momento producido por el motor**

El torque máximo aplicado en el eje del sensor corresponde a 8 Nm. Este valor es dado por la máxima relación de transformación dada por las reducciones instaladas en los rodillos de las ruedas (Gómez, 2015).

### 3.1.2. Escenarios críticos de robot asistente

Se determinan las condiciones críticas del robot asistente con respecto a los grados de libertad establecidos para el sensor fuerza/torque de la siguiente manera:

I. **Eje y**

a) **Fuerza en eje y**

Para la determinación de la fuerza vertical máxima presente en el eje del sensor, se considera como caso crítico la fuerza ejercida por el peso de la estructura. Al momento de la realización de este trabajo el planteamiento del diseño mecánico del robot asistente se encuentra en proceso, por lo que se procede a realizar una estimación del peso máximo a alcanzar. De esta forma, para la evaluación del peso total del robot se toma en cuenta el peso aportado por los dos brazos robóticos tipo Panda, con los que se basa el diseño del robot. A lo anterior se le suma el peso máximo que son capaces de levantar ambos brazos. Los datos de los brazos robóticos son obtenidos de la hoja de datos correspondiente a los brazos robóticos tipo Panda (Franka

Emika GmbH, 2018). Adicionalmente, se suma el peso de la base para lo cual se toma como referencia la base del robot humanoide (Ortuño, 2018). Lo anterior se muestra de la siguiente manera:

Cuadro 3.1: Peso estimado de robot asistente

Elemento	Peso (kg)
Brazo Robótico Panda	25,70
Carga máxima levantada por brazo panda	41,84
Base (robot humanoide)	138,40
Total	205,94
Total con factor de seguridad (15 %)	236,83

Al peso total se le agrega un factor de seguridad del 15 % dado por el laboratorio con base en las condiciones de operación. De forma similar al caso abordado para el robot humanoide, se da a fuerza vertical en el sensor como la cuarta parte del peso total asumiendo una distribución geométrica de la estructura a desarrollar, por lo que la fuerza resultante corresponde a 59,21 kg, correspondiente a 580,26 N.

**b) Momento en eje y**

No se considera la presencia de momentos en el eje y como parte del diseño del sensor.

**II. Fuerzas plano x-z**

Para este caso se consideran las fuerzas influyentes en el robot de forma externa.

**a) Fuerza producida por fricción**

De forma análoga al análisis de fuerza de fricción estudiado para el robot humanoide (ver sección 3.1.1.II.a.1), al contemplar el robot asistente en condición de movimiento inminente con un coeficiente de fricción de 1,0 (Health *et al.*, 2003), la fuerza de fricción vertical máxima ejercida en el sensor es equivalente a la fuerza normal en la estructura. La fuerza normal en este caso es equivalente a la ejercida por el peso de la estructura de 236,83 kg, lo cual da una fuerza de peso y por tanto normal de 2320,93 N, correspondiente a la fuerza de fricción vertical máxima a aplicar en el sensor. En cada rueda,

la fuerza resultante sería la cuarta parte del total, con un valor de 580,26 N.

**b) Fuerza de empuje**

Se considera la fuerza de empuje de una persona utilizando ambos brazos a la altura de los hombros (National Aeronautics and Space Administration, 1995), lo cual da una fuerza resultante de 321,25 N por rueda.

**c) Fuerza de impacto**

A nivel cualitativo, tomando en cuenta la seguridad tanto del robot como del medio en el que se desempeña, se considera el escenario donde el robot es sometido a un impacto con algún objeto o persona en su entorno. El análisis corresponde al mismo estudiado en el caso del robot humanoide (ver sección 3.3.1.II.a.3).

**III. Momentos en los ejes x-z**

**a) Momento producido por fuerza de fricción**

Al igual que en el caso contemplado para el robot humanoide (ver sección 3.1.1.II.b.1), el momento se obtiene al multiplicar el valor de la fuerza de fricción máxima posible dado en un escenario de movimiento inminente en cada rueda (580,23 N) por el radio de la misma. Para el desarrollo del robot asistente se planea utilizar las mismas ruedas *AndyMark*, modelo *am-0136* utilizadas en el robot humanoide, por lo que el valor del radio se mantiene en 3" (0,0762 m). De esta manera, el valor del momento resultante es de 44,21 Nm.

**b) Momento producido por fuerza de empuje**

La fuerza de empuje es equivalente a la reacción en las ruedas del robot. De esta forma, se procede a trasladar la fuerza al eje de las ruedas, considerando un radio de 0,0762 m y una fuerza de empuje de 321,25 N por rueda, el momento resultante es de 24,48 Nm.

**c) Momento producido por el motor**

El valor de torque se determina de forma similar al caso del robot humanoide, debido a que se espera utilizar el mismo tipo de configuración en las reducciones de los ejes de las ruedas en ambos robots. De esta forma, el valor de torque del motor para el caso del robot asistente es de 8 Nm (Gómez, 2015).

## 3.2. Diseño geométrico

Para el diseño de los prototipos se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- **Límites geométricos:** por la zona en la que se contempla la instalación del sensor, se debe respetar las dimensiones entre los soportes de la placa, así como el largo total de 200 mm. Con respecto a las magnitudes de espesor y ancho de la placa, la primera de estas debe mantenerse fija, con un valor de 25 mm, sin embargo el ancho puede tener un máximo de 203,2 mm (8 pulgadas), lo cual corresponde al diámetro de las ruedas de la base del robot.
- **Disponibilidad de materiales:** como se menciona en la sección 2.3.1, el material a utilizar en el diseño de las galgas debe cumplir con el mejor desempeño sin dejar de lado el costo del mismo. Se puede optar con materiales de alto módulo de elasticidad como los aceros, o materiales con bajo módulo de elasticidad como los aluminios. Dentro de la disponibilidad de materiales en el mercado con las características de desempeño deseadas se encuentran el Acero 1020, Aluminio 6061 y Aluminio 6065.
- **Fuerzas críticas establecidas:** se contemplan las fuerzas críticas establecidas en la sección 3.1.1 para el sensor en el robot humanoide y asistente. Con base en las reacciones en el plano x-z, se estudian las cargas producidas por la fuerza de empuje, debido a que se considera la condición de mayor factibilidad en los entornos de trabajo de desempeño de los robots.
- **Galgas extensiométricas disponibles:** en el laboratorio ARCOS-Lab se cuenta con galgas tipo SGT-1/350-TY43, las cuales tienen un largo de 4mm, por lo que el espesor de la zona de medición debe ser mayor a esta dimensión.

Tomando en cuenta los elementos mencionados, se proponen los siguientes modelos preliminares:

### I. Prototipo de pestañas:

De las variables contempladas en el diseño del dispositivo, uno de principales retos consiste en proponer una alternativa que sea capaz de realizar mediciones de torque. Luego del análisis de los comportamientos esperados por parte de la pieza y de una revisión bibliográfica específica con respecto a sensores de medición de torque, se toma como base la propuesta dada por Sandakalum *et al.* (2018).

Sandakalum *et al.* plantea una configuración de la geometría de manera que las reacciones medidas en el centro del dispositivo se transmitan a columnas, las cuales presentan cierta flexibilidad debido a la colocación de pestañas en la parte posterior de las mismas, por lo que se propicia la medición del torque en las columnas. De esta manera, se propone el diseño mostrado en la figura 3.2, con la premisa de propiciar la deformación en la zona ubicada entre las pestañas y el círculo interior como producto de los momentos aplicados.

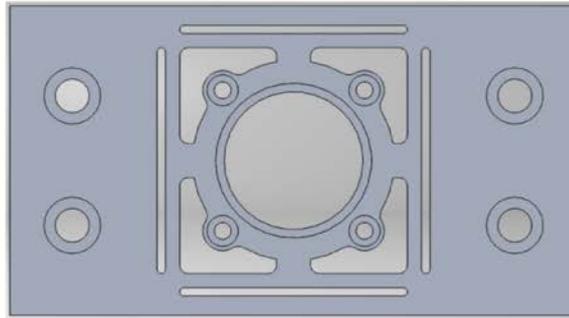


Figura 3.2: Prototipo de sensor usando “pestañas”. Fuente: Elaboración propia

## II. Prototipo externo:

A partir de las condiciones de apoyo de la placa base, se plantea el diseño de un prototipo con configuración asimétrica, como se muestra en la figura 3.3. Se elabora esta propuesta tomando en cuenta que los apoyos de la pieza están constituidos por soportes fijos en los dos pines izquierdos y apoyos libres en los pines en la zona derecha. Bajo esta configuración de soportes, cuando se aplica una fuerza o torque externos, se pretende lograr una deflexión controlada en las columnas horizontales en las zonas superior e inferior.

De forma preliminar, con la aplicación de fuerzas en los sentidos axial y radial, dependiendo de la dirección de las reacciones, las zonas de deformación tenderían a estar en tensión o compresión de forma correspondiente. La ubicación de los puntos de medición y los comportamientos definidos dependiendo de la reacción presente propiciarían una reducción en la interferencia entre señales, con lo que se daría mayor claridad en la reacción detectada.

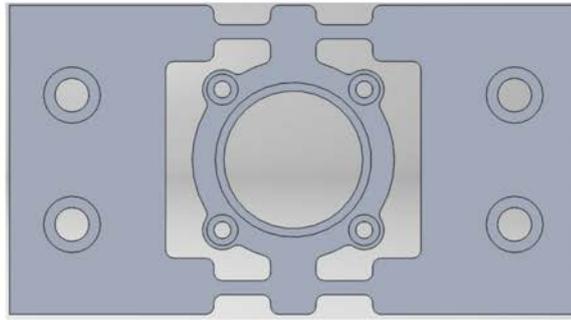


Figura 3.3: Prototipo de sensor basado en esfuerzos externos. Fuente: Elaboración propia

# Capítulo 4

## Análisis mecánico en simulación

### 4.1. Resultados y análisis de procedimiento

El análisis se realiza utilizando el software Ansys versión 19.2, a partir de los sólidos diseñados en la sección de diseños geométricos. Con respecto a las condiciones del análisis, la pieza es fijada en los 2 orificios de la sección izquierda, mientras los dos orificios derechos permanecen libres de carga. Además, las fuerzas son aplicadas acorde a las magnitudes definidas en la sección de escenarios críticos, y son aplicadas sobre el área superficial interior del cilindro central.

Inicialmente, se estudia la influencia del peso en los prototipos tanto del robot asistente como en el humanoide, dado que esta representa la fuerza de mayor magnitud, por lo tanto permite asegurar el cumplimiento de un sensor que se mantenga debajo del límite de fluencia. Posteriormente, se estudia la deformación en los puntos preliminares de medición producto de cada una de las cargas y momentos.

#### 4.1.1. Análisis mecánico del prototipo de pestañas

Como se menciona en el capítulo 3.2, el modelo desarrollado con pestañas en su estructura tiene como objetivo localizar las deformaciones en las zonas ubicadas entre las pestañas y el círculo interior, estas zonas se observan en la figura siguiente:

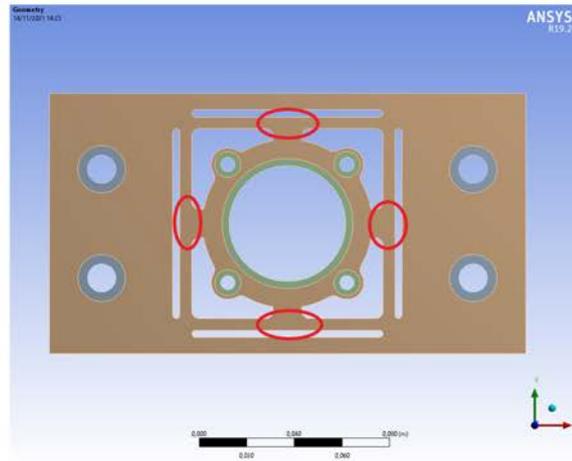


Figura 4.1: Prototipo de pestañas con puntos preliminares de deformación. Fuente: Elaboración propia

A pesar del planteamiento inicial, al realizar la simulación respectiva del diseño con las fuerzas críticas establecidas, no se denota una diferenciación significativa entre las deformaciones causadas por las fuerzas aplicadas en el eje radial, en comparación con las deformaciones causadas por el torque.

A continuación, se muestran los resultados para cada uno de los escenarios:

### Simulación para la fuerza en eje x

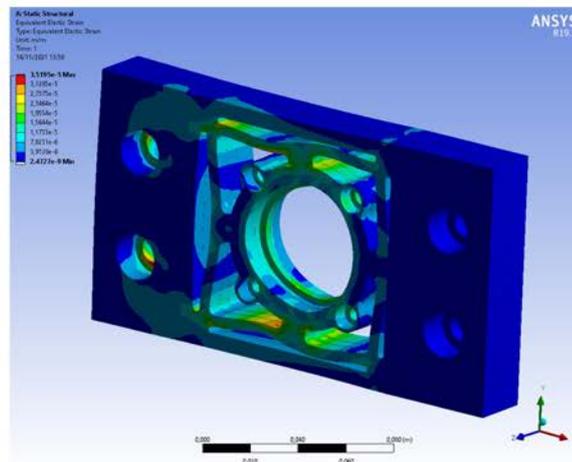


Figura 4.2: Prototipo de pestañas deformación producto de fuerza en eje x. Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que las zonas mostradas en la figura 4.1 se encuentran bajo deformación, principalmente la superior e inferior.

Simulación para la fuerza en eje z

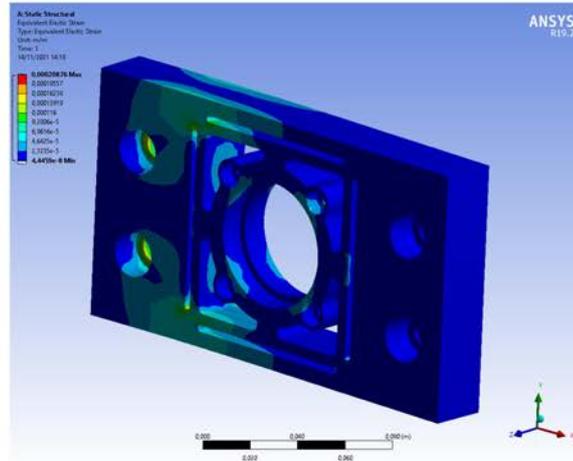


Figura 4.3: Prototipo de pestañas deformación producto de fuerza en eje z. Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en el resultado de la simulación, que la deformación producto de la fuerza en z, no se da en las zonas mostradas en la imagen 4.1, imposibilitando la medición de esta fuerza usando galgas extensiométricas colocadas en esa configuración.

Simulación para la el momento en z

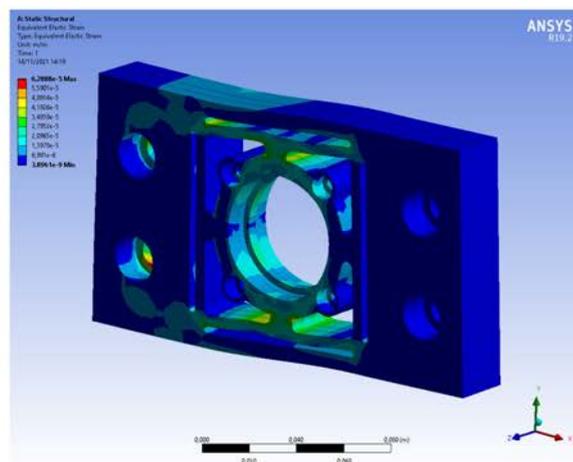


Figura 4.4: Prototipo de pestañas deformación producto de momento en eje z. Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en el resultado de la simulación, que la deformación producto del momento en z se puede percibir en las zonas delimitadas en la figura 4.1. No obstante,

el prototipo no permite distinguir fácilmente el momento en  $z$  de la fuerza en  $x$ .

Si no existe una diferenciación clara en la deformación en las zonas de medición con respecto a las zonas que aportan rigidez a la pieza, se puede incurrir en el error de una alta interferencia entre las variables y una poca claridad en las mediciones.

Por otra parte, se valoró la opción de ampliar el ancho de la pieza con el fin de que la estructura externa tenga una mayor rigidez dado que tal y como se muestra en las figuras, la deformación se muestra en una proporción muy similar en diferentes zonas que no están pensadas para deformarse.

Si la estructura externa se vuelve más rígida se puede estimar que las columnas internas se deformarían simétricamente incluso en las zonas con una menor sujeción a la estructura. No obstante, anteriormente, dentro de las limitaciones geométricas, se comentó la imposibilidad de extender en sobre medida el ancho de la pieza dado que no debe sobrepasar el diámetro de la rueda.

Tomando en cuenta todas estas consideraciones se decide proceder con una segunda geometría con una mayor claridad sin requerir ampliar las dimensiones.

#### **4.1.2. Análisis mecánico del prototipo externo**

Tal y como se comenta en la sección de diseño de prototipos, este sistema plantea la medición de esfuerzos en las columnas horizontales ubicadas en la sección superior e inferior del dispositivo. La idea es que se permita distinguir entre las direcciones de las fuerzas y el sentido de giro de acuerdo al tipo de deformación de la columnas, ya sea de compresión o tensión.

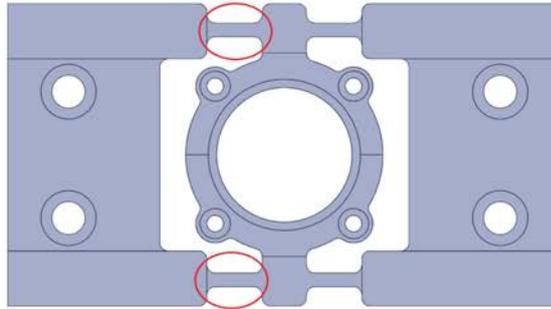


Figura 4.5: Prototipo externo, zonas preliminares de deformación. Fuente: Elaboración propia

Los resultados de las simulaciones realizadas revelan una concentración de esfuerzos en las columnas superior e inferior. Además, la deformación presentada en las mismas se comporta en concordancia con el planteamiento.

A partir de los primeros resultados se procede mediante un proceso iterativo a afinar las dimensiones de la pieza. Una de las limitantes del modelo es que existe una diferencia de proporción entre las magnitudes de las fuerzas aplicadas en el eje  $z$  en comparación con las aplicadas en el eje  $x$ , en otras palabras a pesar de que la magnitud de la fuerza aplicada es equivalente, la deformación en la columna producto de una fuerza en  $z$  se amplifica por el brazo de palanca que se genera desde el centro del eje hasta la posición de medición. En el caso las fuerzas aplicadas en el eje  $x$ , las mismas producen una fuerza que permanece constante a lo largo de toda la columna.

Para poder igualar las fuerzas y acercarse a una distribución regular entre las diferentes variables se realizan varias mejoras, se incrementa el momento de inercia de las columnas en el  $y$  y para disminuir el esfuerzo normal producido por las fuerzas aplicadas en el eje  $z$  y se acerca el punto de máximo esfuerzo al centro del eje mediante el acortamiento del de la unión entre las columnas superiores.

A partir de todas las mejoras realizadas fue posible llegar a un prototipo adecuado para elaborar pruebas experimentales. A continuación, se muestran las simulaciones para cada una de las variables estudiadas

Simulación para la fuerza en eje z

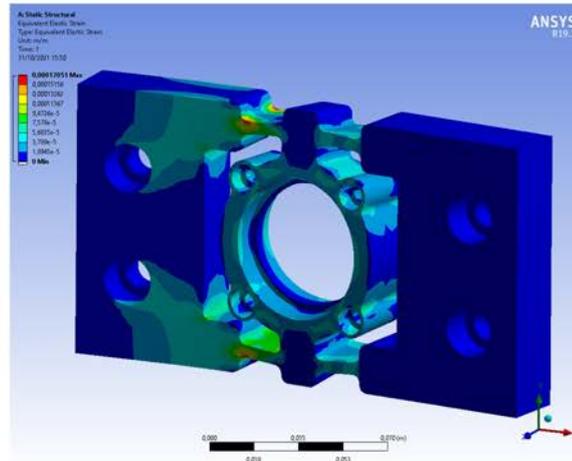


Figura 4.6: Prototipo externo, deformación producto de fuerza en eje z. Fuente: Elaboración propia

Se puede observar mediante la figura 1, deformación por contracción en las caras frontales de las columnas superior e inferior izquierdas. El punto de máximo esfuerzo se da en en el imite izquierdo de las columnas, sin embargo por la diferencia de proporción comentada anteriormente se prefiere concluir la zona ubicada en el limite derecho como punto para medición de esfuerzo, véase figura 5.1

Simulación para la fuerza en eje x

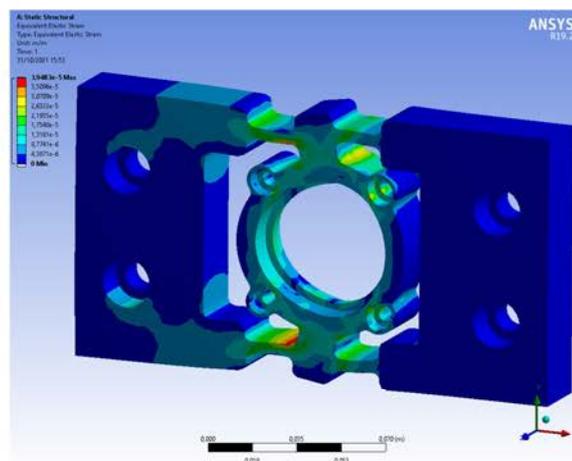


Figura 4.7: Prototipo externo, deformación producto de fuerza en eje x. Fuente: Elaboración propia

Se puede observar una deformación de una magnitud uniforme a lo largo de las columnas superior e inferior. Esto concuerda con lo planteado, dado que al ser un modelo simétrico la fuerza debe provocar una deformación constante en las columnas.

### Simulación para el torque en eje z

Un torque aplicado en el eje z en sentido antihorario, debería tender a someter la columna superior a compresión y la inferior a tensión. Este comportamiento se observa en la simulación.

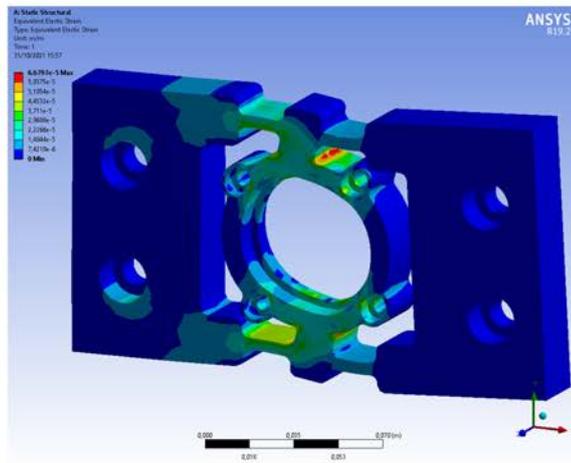


Figura 4.8: Prototipo externo, deformación producto de momento en eje z. Fuente: Elaboración propia

### 4.1.3. Valoración de la geometría en ambos robots

Se procede a comparar los casos críticos entre el robot humanoide y asistente analizados en las secciones 3.1.1 y 3.1.2. Debido a que como se comenta en las secciones mencionadas, las reacciones tomadas en cuenta consisten en la fuerza del peso, la fuerza de empuje y el momento producido por la misma, la diferencia entre ambos casos consiste en la fuerza vertical considerada para cada caso.

A nivel de simulación, en los resultados mostrados en las secciones 4.1.2 y 4.1.1 toman en cuenta las reacciones resultantes de la fuerza y el torque producido por la fuerza de empuje y con el peso total de la estructura se procede a evaluar la resistencia de la pieza con respecto al esfuerzo de fluencia del material utilizado en la evaluación del comportamiento del prototipo en la simulación.

### **Robot humanoide**

A partir del estudio realizado en ambas geometrías, se llega a la conclusión de que el prototipo externo posee mejores atributos para cuantificar la deformación en las zonas seleccionadas. La principal ventaja es que permite distinguir el tipo de escenario basado en el tipo de deformación, ya sea de compresión o elongación.

### **Robot asistente**

Debido a que el peso del robot asistente (236,83 N) es menor al peso considerado en el caso del robot humanoide (865,59 N), el diseño mostrado en la sección 4.1.2 resistiría a la carga total del robot y debido a la similitud de las condiciones críticas de diseño existentes en ambos contextos, el prototipo sería capaz de captar un rango de fuerzas análogo al del robot humanoide.

# Capítulo 5

## Configuración del experimento

### 5.1. Condiciones y configuración de las galgas extensiométricas

En la figura 5.1 se muestra la ubicación de las galgas en el prototipo, establecidas como resultado de la determinación de las zonas adecuadas para la medición de deformaciones al realizar las simulaciones respectivas. Las galgas 1, 3, 5 y 7 se encuentran alejadas de los puntos de deformación, ya que tienen como objetivo compensar los efectos de la deformación debido a la variación de la temperatura.

Por otra parte, las galgas 2, 4, 6 y 8 se localizan en las zonas de deformación de las columnas horizontales superior e inferior, cercanas al eje central de la pieza. El acercamiento de estas galgas extensiométricas al centro del sensor se da con el fin de disminuir la diferencia de proporción entre los esfuerzos causados por las fuerzas en los esfuerzos entre la dirección axial y radial.

5.1. CONDICIONES Y CONFIGURACIÓN DE LAS GALGAS  
EXTENSIOMÉTRICAS CAPÍTULO 5. CONFIGURACIÓN DEL EXPERIMENTO

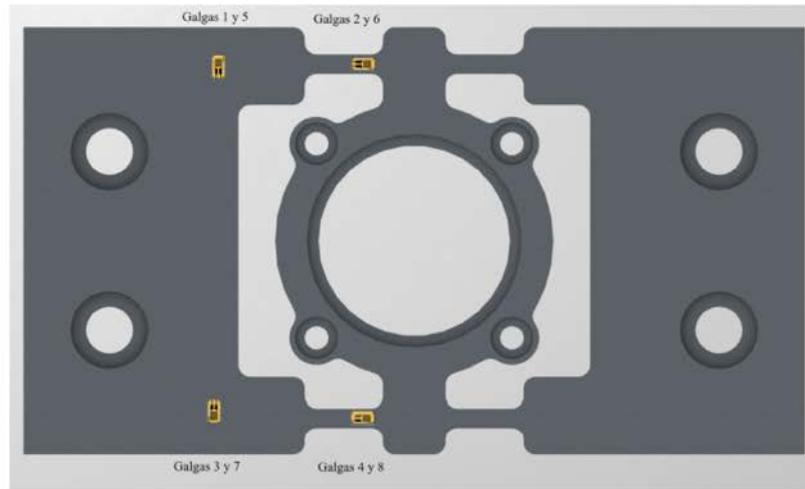


Figura 5.1: Ubicación de galgas extensiométricas en el sensor fuerza/torque. Fuente: Elaboración propia

Como parte de la configuración electrónica, cada galga encargada de medir deformación se encuentra conectada en conjunto con una galga de compensación de temperatura a un medio puente Wheatstone, tal como se muestra en la figura 2.8b. De esta manera, la configuración de las galgas extensiométricas con respecto a los puentes se muestra en la tabla 5.1:

Cuadro 5.1: Configuración de galgas extensiométricas en Puentes Wheatstone

Puente Wheatstone	Galga Extensiométrica
Puente #1	Galga #1 - Galga #2
Puente #2	Galga #5 - Galga #6
Puente #3	Galga #3 - Galga #4
Puente #4	Galga #7 - Galga #8

## 5.2. Elaboración del procedimiento experimental

El diseño del procedimiento experimental se planteó con el objetivo de medir el comportamiento de las deformaciones en cuanto a la capacidad de captación de señales y a la dirección de estiramiento con respecto a las fuerzas y torque aplicados.

Dado que el procedimiento experimental se realiza con el fin de comprobar la dirección del esfuerzo, esta misma al tener una relación directa respecto a la geometría y propiedades del material utilizado, puede ser determinada al realizar una única medición, sin embargo se prefiere realizar 5 mediciones por fuerza aplicada para sondear el comportamiento del plástico impreso en 3d. La caracterización del material del prototipo queda fuera de los alcances de este proyecto, no obstante se busca asegurar que mantuviera las propiedades del material durante la realización del experimento.

Como parte del proceso, primeramente se coloca la pieza en el banco de pruebas según la posición correspondiente a la medición, ya sea en dirección axial o radial, como se muestra en la figura 5.2. En el caso de la medición en sentido radial y axial, se aplican cargas en dirección paralela al eje en el que se requiere cuantificar la deformación respectiva y para la medición de torque se aplica la magnitud dada colocando el torquímetro en el eje central de la pieza, tal como se muestra en la figura 5.2c.

Debido a su accesibilidad y uso, las deformaciones fueron captadas por medio de las galgas extensiométricas de tipo FAE2-12-35-S4E-4 y FAE-12-35-S6 proporcionadas por la Escuela de Ingeniería Mecánica. Estas poseen una resistencia de  $350 \Omega$ , con un factor de deformación de 2 y se instalaron según la configuración mostrada en la figura 5.1.

Las señales emitidas por las galgas como resultado de las deformaciones son transmitidas por medio de una configuración de circuito de Puente Wheatstone al indicador de deformación (Vishay, 2003). Como resultado se obtienen mediciones de deformación en las cuales se analiza la dirección del esfuerzo ocasionado por las fuerzas aplicadas a como se muestra en la figura 5.2. Las pruebas se realizaron mediante el procedimiento mostrado en el apéndice B, utilizando el equipo especificado el cual se muestra en la figura 5.3.

5.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL  
CAPÍTULO 5. CONFIGURACIÓN DEL EXPERIMENTO

---



(a) Fuerza axial

(b) Fuerza radial



(c) Torque

Figura 5.2: Configuración de fuerzas aplicadas en pruebas de deformación. Fuente: Elaboración propia.

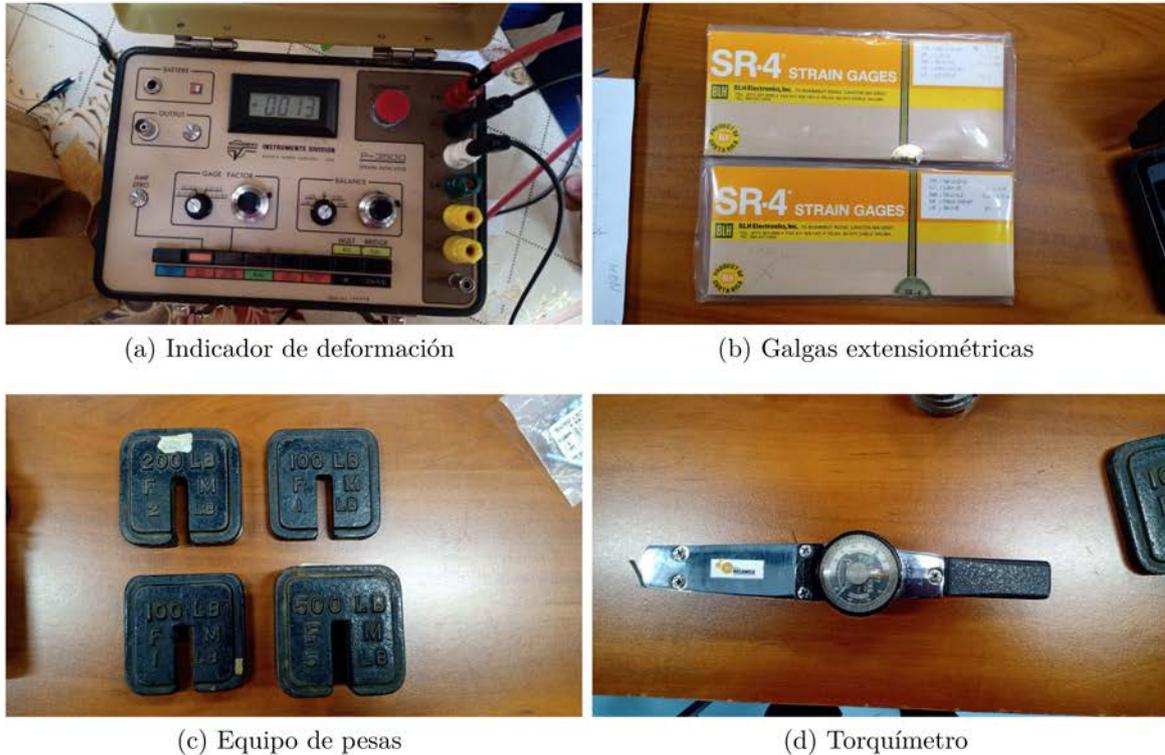


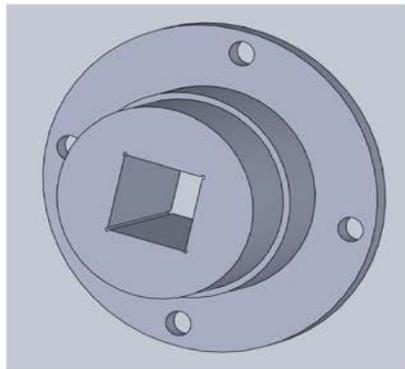
Figura 5.3: Equipo de medición utilizado en pruebas de deformación. Fuente: Elaboración propia.

### 5.3. Construcción del prototipo y banco de pruebas

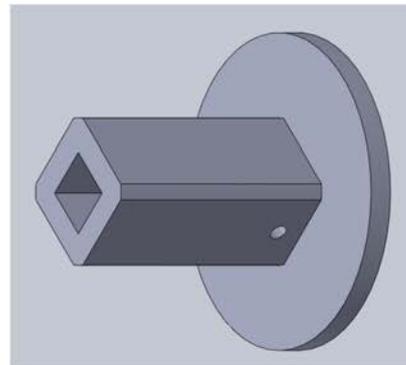
La pieza se imprimió en 3D utilizando la impresora Ultimaker 2+ del Laboratorio de Mecatrónica de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Como material constituyente se empleó ABS con un mallado de tipo cuadrícula con una densidad de 100% y una velocidad de impresión de 55 mm/s.

Para el planteamiento del banco de pruebas se tomó el diseño utilizado por Ortuño (Ortuño, 2018), en el cual se emula el funcionamiento del prototipo en las condiciones operación, donde la pieza se sujeta en dos de sus extremos en los cuales se toman las mediciones de deformación, tal como se muestra en la figura 5.2. La base del banco de pruebas consiste en una estructura formada por 4 paredes, de manera que permite que los pesos puedan ser apoyados en la pieza de forma radial o axial así como la aplicación del torque en la misma posición en la que se coloca la fuerza axial (ver figura 5.2).

En conjunto con la base del banco de pruebas, al sujetar el prototipo se colocan dos piezas auxiliares en el mismo con el fin de aplicar las fuerzas en los ejes axial y radial así como el torque definido. Para el primero de los casos se utiliza una pieza de base circular con un eje hueco cúbico, planteado por el Ingeniero Ortuño (Ortuño, 2018), en el cual se cuelgan las fuerzas correspondientes. En la aplicación del torque se utiliza una modificación de una de las piezas diseñadas por Ortuño, donde a la pieza original constituyente de un eje cúbico sólido se le agrega un eje hueco con el fin de poder colocar el torquímetro en las mediciones. En la figura 5.4 se muestran ambas piezas auxiliares utilizadas con el banco de pruebas.



(a) Pieza de aplicación de carga radial y axial



(b) Pieza de aplicación de torque

Figura 5.4: Piezas auxiliares para la aplicación de cargas en prototipo. Fuente: Elaboración propia.

# Capítulo 6

## Corroboración del comportamiento del prototipo

### 6.1. Resultados y análisis de procedimiento experimental

A partir de los recursos disponibles y en mutuo acuerdo con la dirección del proyecto, se elaboran las pruebas con un enfoque cualitativo, es decir, comprobar si el funcionamiento en cuanto a dirección de deformación es concordante con lo que se plantea en las secciones previas del proyecto.

Los resultados de las pruebas de deformación realizadas en el puente #1 del prototipo de sensor fuerza/torque se muestran en las tablas 6.1, 6.2 y 6.3.

Tabla 6.1: Mediciones de deformación eje axial ( $F_x$ ) puente #1 dadas en  $\mu\epsilon$

Número de medición	Pesas aplicadas		
	911 g	1824 g	4101 g
1	-194	-370	-600
2	-197	-380	-605
3	-186	-376	-560
4	-186	-380	-560
5	-188	-370	-586

Tabla 6.2: Mediciones de deformación eje radial ( $-F_z$ ) puente #1 dadas en  $\mu\epsilon$

Número de medición	Pesas aplicadas		
	911 g	1824 g	4101 g
1	-197	-396	-590
2	-220	-384	-599
3	-195	-377	-666
4	-182	-365	-635
5	-223	-442	-676

Tabla 6.3: Mediciones de deformación de torque en eje axial ( $M_z$ ) en puente #1 dadas en  $\mu\epsilon$

Número de medición	Dirección del torque aplicado	
	Sentido horario	Sentido antihorario
1	-10	+272
2	-166	+84
3	-41	+52
4	-86	+142
5	-160	+60

Los resultados obtenidos en las pruebas desarrolladas en el puente 3 se dan en las tablas 6.5, 6.6, 6.6.

Tabla 6.4: Mediciones de deformación eje radial ( $F_x$ ) puente #3 dadas en  $\mu\epsilon$

Número de medición	Pesas aplicadas		
	911 g	1824 g	4101 g
1	-110	-290	-430
2	-95	-288	-414
3	-102	-250	-367
4	-101	-280	-452
5	-120	-276	-430

Tabla 6.5: Mediciones de deformación eje radial ( $-F_z$ ) puente #3 dadas en  $\mu\epsilon$

Número de medición	Pesas aplicadas		
	911 g	1824 g	4101 g
1	-227	-400	-616
2	-203	-360	-663
3	-194	-373	-698
4	-211	-347	-610
5	-219	-384	-546

Tabla 6.6: Mediciones de deformación de torque en eje axial ( $M_z$ ) en puente #3 dadas en  $\mu\epsilon$

Número de medición	Dirección del torque aplicado	
	Sentido horario	Sentido antihorario
1	591	-317
2	503	-260
3	527	-311
4	182	-381
5	376	-350

A partir de las pruebas realizadas es posible obtener una validación del comportamiento esperado de la pieza. En los resultados se puede observar que existe una concordancia entre los signos de los valores medidos y la deformación ejecutada en la pieza. A modo de ejemplo, nótese la fuerza positiva en el eje  $x$  para ambos puentes, esta fuerza ocasiona una elongación en las zonas donde se colocan las galgas, y como resultado en ambas galgas las mediciones son de magnitud negativa. Caso similar al obtenido mediante las fuerzas en el eje  $z$  negativo. Estas producen una elongación en las zonas de medición y por tanto ambos puentes generaron mediciones con signos negativos.

La dirección de deformación es concordante con la dirección de la carga aplicada por lo que se determina como las señales resultantes muestran una distinción en la dirección de las fuerzas aplicadas según cada caso específico. Adicionalmente, como consecuencia de que todos los puentes se encuentran activos al mismo tiempo; no hay ningún puente que permanezca sin mediciones al estar expuesto a las cargas, lo que elimina la posibilidad de que alguna galga se active en un caso que no corresponda.

Finalmente, los resultados del torque muestran como las mediciones son concordantes al sentido de giro del torque, es por esto que un torque antihorario en el eje  $z$  genera mediciones positivas en el puente #1; este comportamiento se da debido a que se está generando una compresión en la galga. Por otra parte, este mismo torque genera una extensión en el segundo puente, por lo tanto las mediciones son negativas. Si se cambia el sentido de giro, los resultados muestran que de forma equivalente los sentidos de las mediciones se invierten.

A pesar de que las condiciones experimentales dificultan contar con mediciones de una alta precisión, la mayoría de las variables pueden afinarse mediante el uso de un material apropiado para el sensor, así como un proceso de calibración en laboratorio.

# Capítulo 7

## Conclusiones y recomendaciones

A partir de los análisis realizados, para los escenarios de aplicación, se cuantifican las fuerzas y momentos críticos tanto para el robot humanoide como para el robot asistente. Se determinan las cargas correspondientes al peso, fricción en movimiento inminente y por fuerza de empuje, así como los momentos producidos por las respectivas fuerzas de fricción, empuje y la aplicada por el motor, como se muestra en la sección 3.1.1.

Tanto para el caso del robot humanoide como del robot asistente, la fuerza del peso es la más alta, por lo que consiste en la magnitud base para la definición de las dimensiones del prototipo y para la evaluación de la resistencia con el material considerado; sin embargo no se toma en cuenta en el análisis de simulación debido a que corresponde a una carga estática. Con base en las reacciones restantes, se estudian las cargas producidas por la fuerza de empuje, debido a que se considera la condición de mayor factibilidad en los entornos de trabajo de desempeño de los robots. Las cargas utilizadas corresponden a un torque de empuje equivalente a  $24,48 Nm$  y una fuerza de empuje de  $321,25 N$ , tal y como se detalla en la sección 3.2.

De las diferentes geometrías estudiadas a partir de la bibliografía expuesta fue posible plantear dos prototipos preliminares, expuestos en la sección 3.2. El primero de estos, mostrado en la figura 3.2, se planteó con el objetivo de ubicar las deformaciones en las zonas alrededor del eje central; sin embargo, en las simulaciones no se muestra una diferencia clara en las deformaciones resultantes en los puntos de medición propuestos, a pesar de que la aplicación de fuerzas se da en los ejes radial y axial. El segundo diseño, mostrado en la figura 3.3, se enfoca en la medición de deformación en

las zonas ubicadas en la parte superior e inferior central de la pieza, con el propósito de distinguir entre las direcciones de las fuerzas y torque de acuerdo a la deformación dada, por lo que es el elegido para la construcción del prototipo.

Por medio de las simulaciones realizadas de elementos finitos, detalladas en la sección 4, se establecieron los puntos de optimización de la geometría escogida. De esta manera, se pudieron obtener las mediciones más aptas con las que se pudiera medir deformación y reducir lo más posible la interferencia entre las señales provenientes de las mediciones en cada grado de libertad. Como resultado, se obtiene un comportamiento mayormente definido correspondiente para cada reacción aplicada, Esto se puede observar en las figuras 4.6, 4.7 y 4.8. Asimismo, se logran identificar los puntos aptos para la instalación de galgas extensiométricas, tal como se muestra en la figura 5.1.

A partir de la asistencia del taller y el Laboratorio de Mecatrónica de la Universidad de Costa Rica fue posible elaborar el prototipo de sensor fuerza/torque propuesto por medio de impresión en 3D, utilizando ABS como material constituyente, como se muestra en la figura 5.2. De esta misma forma, se confeccionaron los acoples específicos para la aplicación de las cargas y momentos en el eje central del prototipo, estas se adaptan a las dimensiones de los instrumentos y accesorios específicos utilizados en la aplicación de las cargas. El dimensionamiento de cada una de estas piezas se plasmó por medio de los planos correspondientes para cada caso, dados en el apéndice C.

El prototipo propuesto muestra un comportamiento conforme a los resultados obtenidos en la fase de simulación del modelo, de manera que la dirección de deformación es concordante con la dirección de la carga aplicada. Al corroborar el funcionamiento por medio de la medición de deformación en los puntos establecidos, se determina como las señales resultantes muestran una distinción en la dirección de las fuerzas aplicadas, según cada caso específico, tal y como se detalla en la sección 6.1.

En concordancia con lo analizado en la sección 3.1.1 y 3.1.2 de casos críticos, se recomienda el análisis del comportamiento del robot al someterse a fuerzas de impacto. Mediante este proceso, se haría posible la aproximación del tiempo del impacto, con lo que por medio de la ecuación 3.1 se determinaría la fuerza a la que estaría sometido el robot ante este tipo de colisiones.

Para futuras investigaciones en este tema se recomienda manufacturar el dispositivo en el metal a utilizar en el diseño final, considerando un material homogéneo, con el fin de poder replicar el comportamiento más cercano a las condiciones de funcionamiento real y obtener un análisis con resultados más cercanos a las condiciones de trabajo en los entornos establecidos. Adicionalmente, se recomienda realizar una caracterización del material, imprimiendo probetas con las mismas características del prototipo del sensor. Una vez manufacturado, se sugiere la realización de una calibración del prototipo, de forma que se obtengan mediciones más precisas y apegadas al que sería el desempeño real del sensor.

# Bibliografía

- Areny, R. P. (2005). *Sensores y Acondicionadores de Señal 4a*. Marcombo.
- ASTM E74-18e1 (2019). Standard practices for calibration and verification for force-measuring instruments. *ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org*.
- Bartlett, J. (2020). *Introduction to Microcontrollers*, pp. 201–211.
- Bathe, K.-J. (2006). *Finite element procedures*. Prentice hall.
- Ben-Ari, M. y Mondada, F. (2018). *Robots and Their Applications*, pp. 1–20.
- Budynas, R. G. y Nisbett, J. K. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, volumen 6. McGraw-Hill Interamericana.
- Carro, A. y Tioli, H. (2012). Diseño y construcción de celdas de carga para comprobaciones intermedias de máquinas de fuerza. *Revista Ingeniería*, 22.
- Chacón, M. N. (2019). Arcos-lab: con la mirada puesta en el futuro. *Semanario Universidad*.
- Chinchilla, S. (2014). *Articulación con control por impedancia*. Tesis doctoral, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica.
- Couroussé, D. (2007). Mechanical impedance.
- Creus Solé, A. (2009). *Instrumentos industriales, su ajuste y calibración*. Alfaomega Grupo Editor, S.A, 3a. edición.
- El Zaatari, S., Marei, M., Li, W., y Usman, Z. (2019). Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview. *Robotics and Autonomous Systems*, 116:162–180.

- Ferretti, G., Magnani, G., Rocco, P., Ceconello, F., y Rossetti, G. (2000). Impedance control for industrial robots. En *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*, volumen 4, pp. 4027–4032 vol.4.
- Franka Emika GmbH (2018). User Handbook Panda.
- Grioli, G. y Bicchi, A. (2010). A non-invasive, real-time method for measuring variable stiffness. *Robotics Science and Systems VI*, pp. 90–96.
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de Manufactura Moderna*. Pearson Educación, 3 edición.
- Gómez, S. L. (2015). Diseño, construcción y puesta en marcha de una base móvil omnidireccional para el laboratorio arcos-lab. *Universidad de Costa Rica*.
- HBM (s.f). Glosario sobre la medición de deformación. <https://www.hbm.com/es/7113/glosario-sobre-la-medicion-de-deformacion/>. [En línea; accedido noviembre 23, 2020].
- Health, Staff, S. E., Gorst, N., Health, G. B., Executive, S., y of Birmingham. School of Engineering, U. (2003). *Friction in Temporary Works*. Research Report Series. HSE Books.
- Herrera, J. (2008). *Microcontrolador STM32 Programación y desarrollo*.
- Hoffman, K. (s.f.a). Applying the wheatstone bridge circuit. *HBM*.
- Hoffman, K. (s.fb). *An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges*. HBM.
- Hogan, N. y Buerger, S. P. (2018). Impedance and interaction control. En *Robotics and automation handbook*, pp. 375–398. CRC press.
- Jiménez Vásquez, W. A. (2014). Propuesta de disminución de tiempos muertos en máquinas CNC por medio de un modelo de mejores prácticas y la integración con una herramienta digital PLM. *Tecnológico de Costa Rica*.
- Kazuo, T. (1999). Human friendly robotics, a challenge to new robot applications. En *IEEE-VRSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.

- Khan, H., D'Imperio, M., Cannella, F., Caldwell, D. G., Cuschieri, A., y Semini, C. (2017). Towards scalable strain gauge-based joint torque sensors. *Sensors*, 17(8):1905.
- Khatib, O. (2009). Human-friendly robotics. En *2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. iv–iv.
- Kim Bong-seok, Hwang Jeong-hoon, P. C.-w. K. T.-g. C. S.-y. (1990). *Korea del Sur: Patente N°. KR20130126082A*.
- Lahr, G., Soares, J., Garcia, H., Adriano, Siqueira, A., y Caurin, G. (2016). Understanding the implementation of impedance control in industrial robots.
- Logan, D. L. (2011). *A first course in the finite element method*. Cengage Learning.
- Mathis, F. (2012). *A Hybrid System Approach to Impedance and Admittance Control*. Michigan State University. Mechanical Engineering.
- Measurement Group (1988). Strain gage based transducers, their design and construction.
- National Aeronautics and Space Administration (1995). *Man System Integration Standards*, volumen 1.
- Ortuño, L. D. (2018). Diseño de un sensor de fuerza/torque para la base móvil de un robot humanoide. *Universidad de Costa Rica*.
- Ott, C., Mukherjee, R., y Nakamura, Y. (2010). Unified impedance and admittance control. En *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 554–561. IEEE.
- Ovalle Yusti, C. D. (2017). Fresadora controlada por Control Numérico Computarizado (CNC). *Universidad José de Caldas*.
- P.Beer, Ferdinand; Johnston, E. M.-D. E. E. R. (2010). *Mecánica Vectorial para Ingenieros Estática*. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A.
- Ruiz, L. (s.f). El control numérico computarizado en el desarrollo industrial. *Universidad Tecnológica de Panamá*.
- Sadraey, M. (2020). *Microcontroller*, pp. 355–398.

- Sandakalum, T., Suraji, S., Weerasekara, I., Lalitharatne, T., y Chathuranga, D. (2018). Design and characterization of a 1-axis compact torque sensor for a collaborative robot arm. pp. 1–6.
- Siciliano, B. y Khatib, O. (2016). *Springer Handbook of Robotics*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2da edición.
- Soon-myung Kwom, Hyun Jin JUNG, H. L. (2019). *Alemania: Patente N°. DDE102012202425A1*. Alemania: Hyundai Motor Co.
- Suarez, R. y Rosell, J. (2019). Aspectos técnicos de los robots co-trabajadores con operadores humanos. *Dirección y Organización*, pp. 85–104.
- Sun, Y., Liu, Y., Jin, M., y Liu, H. (2013). Design and optimization of a novel six-axis force/torque sensor with good isotropy and high sensitivity. En *2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 631–638.
- Teixeira, J., Reis, A., Mendes, F., y Vergara, L. (2019). *Collaborative Robots and Ergonomics*, pp. 791–796.
- Torgny Brogardh, Krippner Peter, P. S. M. W. (2012). *Alemania: Patente N°. DE112009004288T5*.
- Vishay (2003). Digital strain indicator instruction manual.
- Yongjun Sun, Yiwei Liu, M. J. H. L. (2014). Design of a novel six-axis force/torque sensor based on strain gauges by finite element method. *Harbin Institute of Technology*.

# Apéndices

## A. Memoria de cálculo

Ejes de referencia:

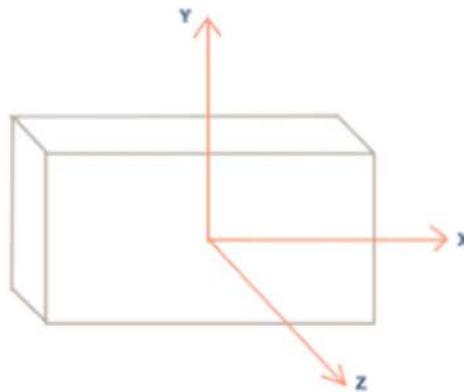


Figura 1: Ejes de referencia del modelo de sensor. Fuente: Elaboración propia

Parámetros de entrada:

$$W = 3462,34N$$

$$T = 8Nm$$

$$Fe = 1285N$$

$$r = 0,0765m$$

**Fuerzas y momentos eje Z**

$$F_z = W/4 = 865,59N$$

$$M_z = 0Nm$$

**Fuerzas y momentos eje X**

$$F_x = F_e/4 = 321,25N$$

$$M_x = F_y r = 24,5Nm$$

**Fuerzas y momentos eje Z**

$$F_z = F_e/4 = 321,25N$$

$$M_z = F_x r = 24,5Nm$$

Nota: Dado que  $M_z$  supera al torque del motor, se tomará este como caso crítico.

## B. Procedimiento experimental

### Materiales y equipo

- Prototipo en ABS
- Banco de pruebas
- Galgas de 350  $\Omega$ , G.F: 2, tipo FAE2-12-35-S4E-4, FAE-12-35-S6
- Torquímetro
- Equipo indicador de deformación P-3500.
- Juego de pesas (\*) indicadas de 100 lb (456 g o 457 g) , 200 lb (911 g) y 500 lb (2277 g).

### Procedimiento

1. Armar el banco de pruebas.
2. Colocar el sensor en el banco pruebas con la pieza correspondiente a la aplicación de fuerzas.
3. Conectar las galgas con el equipo indicador de deformación en la configuración de medio puente de Wheatstone con las 2 galgas ubicadas en la parte superior del prototipo.
4. Colocar el soporte correspondiente para la aplicación de las fuerzas en el eje radial.
5. Colocar una fuerza correspondiente a 200 lb (911 g)\* en el soporte, esperar 20 segundos (tiempo de estabilización) y tomar la indicación dada por el indicador de deformación. Repetir este mismo procedimiento 5 veces.
6. Colocar una fuerza correspondiente a 400 lb (1824 g)\* en el soporte, esperar 20 segundos (tiempo de estabilización) y tomar la indicación dada por el indicador de deformación. Repetir este mismo procedimiento 5 veces.
7. Colocar una fuerza correspondiente a 600 lb (4101 g)\* en el soporte, esperar 20 segundos (tiempo de estabilización) y tomar la indicación dada por el indicador de deformación. Repetir este mismo procedimiento 5 veces.

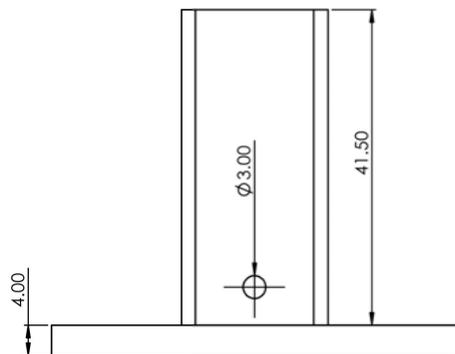
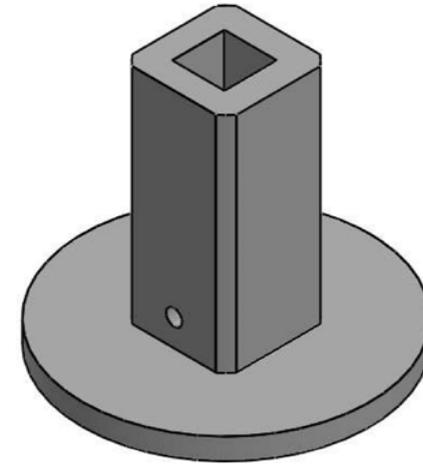
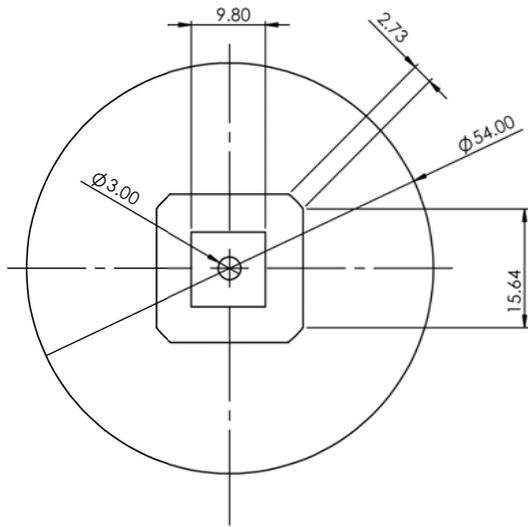
8. Colocar el soporte correspondiente para la aplicación de las fuerzas en el eje axial.
  9. Repetir los pasos 5, 6 y 7 aplicando las fuerzas en el eje axial.
  10. Cambiar la pieza central correspondiente a la aplicación de fuerzas a la de aplicación de torque.
  11. Ensamblar el torquímetro a la parte central de la pieza para aplicación de torque y aplicar un torque equivalente a 24,48 N (216.7 Lb in), esperar 20 segundos (tiempo de estabilización) y tomar la indicación correspondiente. Repetir este mismo procedimiento 5 veces.
  12. Repetir los pasos del 3 al 7 en las dos galgas ubicadas en la parte inferior del dispositivo.
- (\*) Las indicaciones de peso indicado no corresponden con el peso real, en la tabla se indican los pesos reales correspondientes a cada peso indicado.

Tabla 1: Pesos indicados contra pesos reales medidos

Peso indicado	Peso real
100 lb	456 g
100 lb	457 g
200 lb	911 g
500 lb	2277 g

## C. Diagramas de construcción





Universidad de Costa Rica Facultad de Ingeniería	Nombre Joshua Carmona Vargas Jazmín Cruz Sojo	Eje de calibración para inserto de torquímetro  (2/2)	Dimensiones mm
	Carné B51544 B52293		Escala 2:1