

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Diseño y manufactura de un sensor de fuerza/momento de 6 grados de libertad para aplicaciones de Biomecánica

John Kléber Ochoa Abad

Anthony Javier Pulla Correa

Byron Ismael Suarez Villacrés

Yegor Leonardo Mejía Vera

Ingeniería Mecánica

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingenieros Mecánicos

Quito, 15 de mayo del 2022

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

Diseño y manufactura de un sensor de fuerza/momento de 6 grados de libertad para aplicaciones de Biomecánica

John Kléber Ochoa Abad

Anthony Javier Pulla Correa

Byron Ismael Suarez Villacrés

Yegor Leonardo Mejía Vera

Nombre del profesor, Título académico

**Patricio Chiriboga, PhD. Vibraciones,
Delft University of Technology**

Quito, 15 de mayo del 2022

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ (Universidad San Francisco de Quito), incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: John Kléber Ochoa Abad

Código: 00200244

Cédula de identidad: 1719948216

Lugar y fecha: Quito, 15 de mayo de 2022

Nombres y apellidos: Anthony Javier Pulla Correa

Código: 00141640

Cédula de identidad: 0704619857

Lugar y fecha: Quito, 15 de mayo de 2022

Nombres y apellidos: Byron Ismael Suarez Villacrés

Código: 00200661

Cédula de identidad: 1723753743

Lugar y fecha: Quito, 15 de mayo de 2022

Nombres y apellidos: Yegor Leonardo Mejía Vera
Código: 00141455
Cédula de identidad: 0604004721
Lugar y fecha: Quito, 15 de mayo de 2022

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

En el presente proyecto se diseñó y manufacturó un sensor de fuerza/momento de seis grados de libertad. La necesidad del presente sensor se basa en su utilidad para futuras investigaciones de Biomecánica en la USFQ. La metodología para el desarrollo se fundamentó en tres etapas: análisis de diseño y selección de procesos de manufactura, análisis ingenieril y construcción más evaluación de la calidad del sensor. En la primera etapa, se definió un bloque principal elaborado de Aluminio 7075-T6 con un centro de aplicación de cargas (fuerzas y momentos) unido a cuatro vigas apoyadas en paredes finas de un anillo exterior cilíndrico. Para el circuito del sensor se ha basado el mismo en el uso de 16 galgas extensiométricas ensambladas en las vigas y cableadas en seis puentes de Wheatstone necesarios para medir voltajes a ser asociados con las deformaciones generadas por fuerzas y momentos aplicados en el sensor. En la segunda etapa, se realizó un análisis de falla mediante cálculos y simulaciones a manera de que el bloque principal soporte los siguientes valores máximos de cargas: $F_x=F_y=2500\text{N}$, $F_z=4500\text{N}$, $M_x=M_y=M_z=100\text{Nm}$. Posteriormente, mediante simulaciones en ABAQUS se obtuvo una matriz de calibración y un error de acoplamiento en mediciones del 5.17%, por lo que a partir de dichos resultados que validaban la calidad del sensor se procedió con la etapa final. Para culminar, se construyó el sensor con su respectivo circuito y se evaluó su operatividad a través de la aplicación de cargas conocidas y posterior lectura de voltajes de salida de cada puente de Wheatstone para la realización de gráficos que relacionen las cargas aplicadas con la variación de voltajes de salida generados. Con aquella prueba de funcionamiento se validó el desacoplamiento en mediciones del sensor y se determinó que el mismo se encuentra operativo.

ABSTRACT

In this project, a force/torque sensor with six degrees of freedom has been designed and manufactured. The need for this sensor is based on its usefulness for future Biomechanics research at the University. The methodology for the development has been based on three stages: analysis of design and selection of manufacturing processes, engineering analysis and construction plus evaluation of the quality of the sensor. In the first stage, a main block has been defined to be made of Aluminum 7075-T6 with a load application center (forces and torques) joined to four beams supported by thin walls of a cylindrical outer ring. The circuit has been based on the use of 16 strain gauges assembled on the beams and wired in six Wheatstone bridges necessary to measure voltages to be associated with the deformations generated by forces and torques applied to the sensor. In the second stage, a failure analysis was carried out through calculations and simulations so that the main block could support the following maximum load values: $F_x=F_y=2500\text{N}$, $F_z=4500\text{N}$, $M_x=M_y=M_z=100\text{Nm}$. Subsequently, through simulations in ABAQUS a calibration matrix and a coupling error in measurements of 5.17% were obtained, so based on these results that validated the quality of the sensor, the final stage was carried out. To conclude, the sensor was built with its respective circuit, and it was evaluated through the application of known loads and subsequent reading of the output voltages of each Wheatstone bridge for the realization of graphs that relate the applied loads with the variation of generated output voltages. With that testing, the decoupling in sensor measurements was validated and it was determined that the sensor is operational.

Palabras clave

Sensor: Es un instrumento que cumple con la función de captar estímulos externos del ambiente y tener la capacidad de responder en consecuencia.

Fuerza: Es una magnitud vectorial que posee la capacidad de modificar el movimiento de un cuerpo o deformar su estructura.

Momento: Es una magnitud vectorial que tiene un punto de aplicación sobre un objeto y provoca el giro del mismo.

Galga extensiométrica: Sensor elaborado de un material piezoresistivo que se emplea para medir la deformación es una estructura producto de un momento o fuerza aplicada. La galga se adhiere a una estructura sometida a cargas (fuerza o momento) y modifica su resistencia eléctrica al deformarse.

Puente de Wheatstone: Es un circuito electrónico compuesto por una fuente de voltaje de entrada, cuatro resistencias fijas o variables y como resultado se generó un voltaje de salida. Se emplea para encontrar resistencias desconocidas y el mismo puede tener una, dos o hasta cuatro galgas extensiométricas en el lugar de las resistencias eléctricas.

Deformación: Es la modificación en la forma de un cuerpo en uno o varios ejes de un marco de referencia debido a tensiones internas generadas por la aplicación de cargas (fuerza o momento) sobre el cuerpo en cuestión.

Biomecánica: Es la rama de la ciencia que se dedica a estudiar el movimiento y las estructuras de los sistemas biológicos de distintos ecosistemas y clasificaciones a través del uso de la teoría de la rama de la física conocida como mecánica.

Viga: Elemento rígido, generalmente horizontal y con área transversal constante a lo largo de su geometría. El mismo tiene un uso de servir como soporte estructural que funciona a flexión soportando esfuerzos tanto de tensión como de compresión.

Simbología

Fx: Fuerza en el eje X

Fy: Fuerza en el eje Y

Fz: Fuerza en el eje Z

Mx: Momento en el eje X

My: Momento en el eje Y

Mz: Momento en el eje Z

mm: milímetro

cm: centímetro

N: Newton

Nm: Newton*metro

V: Voltaje

M: Momento

I: Momento de inercia

n: Factor de seguridad

Sy: Esfuerzo de fluencia

Se: límite de endurecimiento

F: Fuerza

d: Distancia

b : Base

h : Altura

σ : Esfuerzo de flexión

$\sigma_{A,B}$: Esfuerzos principales

Sut: Esfuerzo ultimo de tensión

k_a : Factor de superficie

d_e : diámetro equivalente

k_b : Factor de tamaño

k_c : Factor de carga

k_d : Factor de temperatura

k_e : Factor de confiabilidad

σ_m : Esfuerzo medio

σ_a : Esfuerzo amplitud

ϵ : Deformación

y_{max} : Deflexion de la viga

L : Longitud total del perno

p : Paso

V_{in} : Voltaje de entrada

V_{out} : Voltaje de salida

Tabla de contenido

1.Introducción	18
1.1.Alternativas y selección de diseño	20
1.2.Gestión del proyecto	31
1.3.Lista de requerimientos y especificaciones técnicas.....	31
2.Materiales y métodos	33
2.1.Selección del material	33
2.2.Diseño del circuito electrónico	35
2.3.Cálculos.....	37
2.4.Simulaciones	50
2.5.Plan de manufactura.....	72
2.6.Hojas de procesos	77
2.7.Planos de los componentes principales.....	77
3.Resultados y discusiones.....	78
3.1.Reporte del diseño.....	78
3.2.Construcción del prototipo del sensor de fuerza/momento.....	85
3.3.Construcción del sistema de carga de fuerzas y momentos	88
3.4.Análisis de ingeniería.....	90
3.5.Experimento ingenieril de verificación.....	90
3.6.Test de prototipo	95
3.7.Seguridad a través del diseño.....	100

3.8.Manual de operación y mantenimiento.....	102
3.9.Resultados.....	102
3.10.Discusiones.....	107
3.11.Conclusiones.....	109
3.12.Trabajo futuro.....	110
4.Referencias bibliográficas.....	112
Anexo A: Diagrama de gantt para el desarrollo del proyecto.....	115
Anexo B: Informe de gastos.....	116
Anexo C: Hoja de proceso del bloque principal del sensor.....	117
Anexo D: Hoja de proceso de la plataforma del sensor.....	118
Anexo E: Hoja de proceso de la carcasa base del sensor.....	119
Anexo F: Hoja de proceso de platinas I.....	120
Anexo G: Código de matlab para el cálculo de la matriz de deformaciones.....	121
Anexo H: Detalle de los cálculos efectuados.....	122
Anexo I: Plano del bloque principal del sensor de fuerza/momento.....	140
Anexo J: Plano de la plataforma superior.....	141
Anexo K: Plano de la carcasa inferior.....	142
Anexo L: Plano de las platinas de unión.....	143
Anexo M: Plano de conjunto del sensor fuerza/momento.....	144
Anexo N: Bitácora de reuniones con el cliente para definición del proyecto.....	145
Anexo O: Especificaciones de las galgas extensiométricas incluidos detalles de la galga sgd-7/350-ly41.....	147
Anexo P: Manual de operación y mantenimiento del sensor de fuerza/torque.....	148

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de selección para el bloque principal	23
Tabla 2. Matriz de selección para la plataforma	26
Tabla 3. Matriz de selección para la carcasa base	29
Tabla 4. Requerimientos y especificaciones técnicas para el sensor de fuerza-torque.....	31
Tabla 5. Ponderación para selección de materiales para el bloque principal.....	34
Tabla 6. Resumen de esfuerzos y factores de seguridad del análisis estático.....	43
Tabla 7. Características del perno seleccionado	44
Tabla 8. Factores de seguridad y esfuerzos máximos para simulaciones de vigas.....	54
Tabla 9. Deformaciones en 16 galgas por cargas individuales máximas	61
Tabla 10. Fuerzas y momentos de simulaciones para creación de líneas de carga.....	68
Tabla 11. Reporte de componentes empleados en la construcción.....	78
Tabla 12. Dimensiones de principales componentes del sensor de fuerza/torque	84
Tabla 13. Riesgos en orden de prioridad con su respectivo plan de mitigación	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Prototipo diseño #1 bloque principal.....	21
Figura 2. Prototipo diseño #2 bloque principal.....	22
Figura 3. Prototipo diseño #3 bloque principal.....	22
Figura 4. Prototipo diseño #1 plataforma superior	25
Figura 5. Prototipo diseño #2 plataforma superior	25
Figura 6. Prototipo diseño #3 plataforma inferior	26
Figura 7. Prototipo diseño #1 carcasa inferior	28
Figura 8. Prototipo diseño #2 carcasa inferior	28
Figura 9. Prototipo diseño #3 carcasa inferior	29
Figura 10. Esquema simplificado del circuito electrónico para el sensor de fuerza/torque	36
Figura 11. Diagrama de la viga del bloque principal con carga en eje Z	38
Figura 12. Línea de carga para las vigas del bloque principal del sensor cargado con 4500 N en el eje Z.....	40
Figura 13. Representación gráfica de sistema de fuerzas aplicadas en la viga sometida a fuerza en “X” máxima	41
Figura 14. Representación gráfica de sistema de fuerzas aplicadas en la viga sometida a fuerza en “Y” máxima	42
Figura 15. Diagrama de fuerza de la unión del perno con sus miembros.....	44
Figura 16. Plataforma con carga máxima en un extremo	47
Figura 17. Representación del extremo libre de la plataforma como una viga en voladizo	47
Figura 18. Esfuerzos de Von Mises en simulación de dos vigas acopladas	52
Figura 19. Esfuerzos de Von Mises en simulación de las cuatro vigas acopladas	52
Figura 20. Esfuerzos de Von Mises en simulación del bloque principal del sensor.....	53
Figura 21. Bloque principal del sensor con el mallado para las simulaciones	56

Figura 22. Condición de empotramiento en la base del bloque del sensor.....	56
Figura 23. Ejemplo de definición de una carga ($F_z=-4500N$)	57
Figura 24. Ubicación de galgas extensiométricas en el bloque principal. Vista frontal.....	59
Figura 25. Ubicación de galgas extensiométricas en el bloque principal. Vista lateral 1.....	59
Figura 26. Ubicación de galgas extensiométricas en el bloque principal. Vista lateral 2.....	60
Figura 27. Matriz de deformaciones [S] para el sensor	63
Figura 28. Matriz de calibración [C] del sensor de fuerza.....	66
Figura 29. Líneas de carga para la fuerza X sobre el bloque principal del sensor.....	69
Figura 30. Líneas de carga para la única aplicación de Fuerza Y sobre el bloque principal del sensor	69
Figura 31. Líneas de carga para la única aplicación de Fuerza Z sobre el bloque principal del sensor	70
Figura 32. Líneas de carga para la única aplicación de momento X sobre el bloque principal del sensor	70
Figura 33. Líneas de carga para la aplicación única de momento Y sobre el bloque principal del sensor	71
Figura 34. Líneas de carga para la única aplicación de momento Z sobre el bloque principal del sensor	71
Figura 35. Diagrama de procesos del bloque principal del sensor	73
Figura 36. Diagrama de procesos de la carcasa base del sensor.....	74
Figura 37. Diagrama de procesos de la plataforma del sensor	75
Figura 38. Diagrama de procesos para el ensamblaje del sensor de fuerza-torque	76
Figura 39. Galga extensiométrica con cables soldados en cada terminal	85
Figura 40. Galgas extensiométricas ensamblada en bloque principal	86
Figura 41. Puente de Wheatstone completamente cableado.....	87

Figura 42. Prototipo del sensor de fuerza/momento construido	88
Figura 43. Perforación de agujeros en platina para carga de momentos sobre el sensor.....	89
Figura 44. Sistema de plato de disco y cuerda de tensión	90
Figura 45. Marco de referencia para la carga de fuerzas y momentos en el sensor.....	91
Figura 46. Sensor posicionado para carga de fuerza “Z”.....	91
Figura 47. Sensor posicionado para carga de fuerza “X”	92
Figura 48. Sensor posicionado para carga de fuerza “Y”	92
Figura 49. Sensor ubicado para generar momento “X”	93
Figura 50. Sensor ubicado para generar momento “Y”	93
Figura 51. Sensor ubicado para generar momento “Z”.....	94
Figura 52. Líneas de carga con relación a la variación de voltaje para la aplicación de fuerza “Z” pura	96
Figura 53. Líneas de carga con relación a la variación de voltaje para la aplicación de fuerza “X” pura.....	96
Figura 54. Líneas de carga con relación a la variación de voltaje para la aplicación de fuerza “Y” pura.....	97
Figura 55. Líneas de carga con relación a la variación de voltaje para la aplicación de momento “X” puro.....	97
Figura 56. Líneas de carga con relación a la variación de voltaje para la aplicación de momento “Y” puro.....	98
Figura 57. Líneas de carga con relación a la variación de voltaje para la aplicación de momento “Z” puro	98
Figura 58. Vistas para detallar posicionamiento de galgas en puntos de deformación máxima	104
Figura 59. Matriz de deformaciones [S] y matriz de calibración que asocia el vector de	

deformaciones y las cargas	105
Figura 60. Presentación de los seis gráficos de carga generados mediante resultados de simulaciones en ABAQUS	106
Figura 61. Presentación de los seis gráficos de carga generados mediante pruebas de funcionamiento del prototipo.....	106

1. Introducción

En el área de investigación de la biomecánica la medición de fuerzas y momentos es de gran importancia a manera de tener una visión de los mecanismos de movimiento de las diferentes estructuras mecánicas de un organismo (Robertson, 2013). Por tanto, es necesario emplear un sensor para medir de la manera más exacta posible valores de fuerzas y momentos en los seis grados de libertad.

Actualmente, en el departamento de Ingeniería Mecánica de la USFQ se está investigando el desarrollo de prótesis para animales y la biomecánica de personas saludables durante la ejecución de actividades físicas. Estas investigaciones requieren de un sensor de fuerza/momento en beneficio de su progreso, ya que las mediciones en tiempo real de dichas magnitudes permitirían tener una visión más clara de la mecánica involucrada en el movimiento de un ser vivo. No obstante, no existe disponibilidad local de dichos sensores, los cuales poseen un elevado costo y deberían ser importados. Ante la problemática mencionada, se busca proponer un modelo de un sensor que se pueda replicar en Ecuador a un costo relativamente económico, tomando en consideración la disponibilidad de materiales y tecnología de manufactura.

El sensor de fuerza/momento se lo realiza en base a las normas ISO-376 e ASTM E251-20a y también a partir de una lista de requerimientos y especificaciones técnicas que permitan al sensor ser preciso y adecuado. Además, se destaca que la metodología para el diseño contempla simulaciones iterativas a través del método de elementos finitos, realización de matrices de calibración y selección de diseño para componentes fundamentado en matrices de selección. Una vez finiquitado el diseño se procederá con la manufactura y realización de

pruebas para validar el correcto funcionamiento del sensor.

Como referencia para el diseño se consideran sensores de fuerza/momento diseñados en la actualidad. Los mismos, se componen en su mayoría de tres estructuras: bloque principal de dos estructuras unidas por vigas, carcasa base y plataforma superior (Ahmad, Terrence & Chyi-Yeu, 2021). Además, dichos sensores emplean principalmente galgas extensiométricas organizadas en puentes de Wheatstone para registrar deformaciones en las vigas del bloque principal una vez que sobre el mismo se haya aplicado una fuerza o un momento. Posteriormente, dichas deformaciones son registradas por las galgas y se las relaciona con un determinado valor de fuerza o momento en uno o en varios ejes de libertad (Templeman, Sheil, & Sun, 2019). No obstante, existen alternativas al uso de galgas como la propuesta por Castano, Grossard y Hubert, en la que el sensor funciona a través de sensores de resonancia que obtienen su información mediante frecuencias resonantes (Castano, Grossard, & Hubert, 2021). Sin embargo, debido a su tamaño reducido y facilidad para efectuar mediciones tanto con cargas estáticas como dinámicas se opta por el uso de galgas extensiométricas en el presente proyecto.

Para la selección de alternativas de diseño para bloque principal del sensor, se van a considerar geometrías como la propuesta por Sun, Liu, Zou, Jin y Liu de un bloque principal del sensor de fuerza/momento con estructura interna cilíndrica y cuatro vigas de sección transversal cuadrada (Sun, Liu, Zou, Jin, & Liu, 2015). Otra alternativa moderna de diseño en la cual basarse es la propuesta por Min-Kyung, Soobum y Jung, en la que se plantea un diseño del bloque principal del sensor fuerza/torque con una estructura externa cilíndrica interconectada mediante cuatro vigas con un centro de forma cúbica (Min-Kyung, Soobum, & Jung, 2014). Estas alternativas ofrecen errores en la matriz de calibración inferiores al 5%, lo cual indica una correcta medición de una fuerza/momento en un eje en específico, ignorando

posibles perturbaciones de deformaciones en otros ejes. Cabe mencionar que un error alrededor de dicho porcentaje es algo que se busca en los sensores desarrollados actualmente, por lo que tomando como base dichos modelos se define un diseño propio para el bloque principal del sensor.

El objetivo del proyecto es construir un sensor de seis grados de libertad basado en el uso de galgas extensiométricas, que permita una carga máxima de 4500 N en el eje vertical del marco de referencia, 2500 N en los dos ejes perpendiculares restantes y 100 Nm como momentos ejercidos en cualquier eje. A su vez, se busca que el sensor sea útil para estudios biomecánicos y que tenga una alta precisión representada por un bajo error arrojado por la matriz de calibración. Finalmente, se destaca como finalidad del proyecto el presentar un diseño confiable que pueda ser elaborado en el país y que funcione como solución a la actual necesidad de importar sensores de elevado costo.

1.1. Alternativas y selección de diseño

Para el diseño del sensor de fuerza/momento se han definido tres componentes que son: bloque principal, plataforma superior y carcasa inferior. Cada componente posee una función y los mismos acoplados en conjunción con un sistema electrónico conformado por: un PCB, conexiones mediante cables, galgas extensiométricas y una fuente de poder; dan lugar al sensor como un sistema general. Respecto a los tres componentes principales se presenta a continuación el proceso de selección del modelo de diseño óptimo para cada componente mediante el uso de matrices de selección.

- **Selección de diseño para el bloque principal de medición de fuerzas y momentos**

El bloque principal es la estructura donde se aplica una fuerza o momento y se generan deformaciones en las vigas del componente las cuales se captan con galgas acopladas en puentes de Wheatstone (Kang, Lee & Kim, 2014). Comúnmente la estructura sólida se compone de un bloque central, vigas y un anillo exterior (Akbari & Kazerooni, 2018). A continuación, se presenta tres alternativas de diseño.

- **Opción 1 de diseño para el bloque principal**

Modelo de bloque principal basado en el diseño propuesto por Zhang et. al. en la investigación “A six-dimensional traction force sensor used for human-robot collaboration” (Zhang et al, 2019).

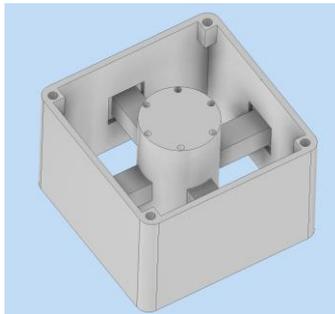


Figura 1. Prototipo diseño #1 bloque principal

Descripción: Bloque con centro cilíndrico y anillo exterior en forma de hexaedro; cuatro vigas de sección transversal cuadrada

- **Opción 2 de diseño para el bloque principal**

Modelo de bloque principal basado en el diseño propuesto por Kang, Lee y Kim en la investigación “Shape optimization of a mechanically decoupled six-axis force/torque sensor” (Kang, Lee & Kim, 2014).

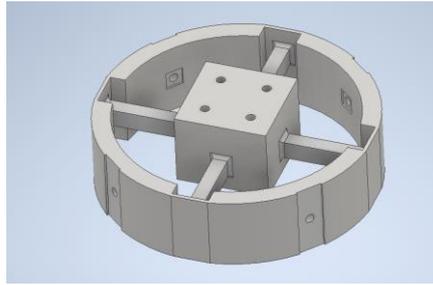


Figura 2. Prototipo diseño #2 bloque principal

Descripción: Bloque con centro cúbico de 40x40 mm y anillo exterior de forma cilíndrica con paredes rectangulares; cuatro vigas de sección transversal 10x08 mm

- **Opción 3 de diseño para el bloque principal**

Modelo de bloque principal basado en el diseño propuesto por Zhang, Ryoo y Byun en la investigación “Development of Torque Sensor with High Sensitivity for Joint of Robot Manipulator Using 4-Bar Linkage Shape” (Zhang, Ryoo & Byun, 2016).

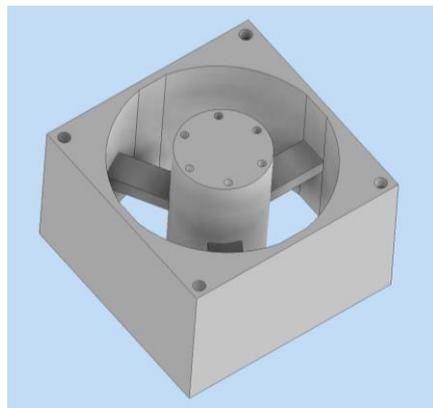


Figura 3. Prototipo diseño #3 bloque principal

Descripción: Bloque con centro cilíndrico y anillo exterior en forma de hexaedro; tres vigas de sección trasversal rectangular

Una vez se ha indicado las tres opciones de diseño se presenta la matriz de selección para cada uno de los criterios de interés en el diseño del bloque principal del sensor. Posteriormente se discutirán las razones de la ponderación para cada diseño en cada criterio.

Tabla 1. Matriz de selección para el bloque principal

Propuesta	20%		25%		40%		15%		Total
	Baja inversión (costos)		Facilidad de manufactura		Procesamiento de información		Facilidad de ensamble		
	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada	
1	40	8	40	10	80	32	75	11.25	61.25
2	80	16	70	17.5	90	36	90	13.5	83
3	60	12	60	15	40	16	75	11.25	54.25

Discusión para selección de bloque principal

Se ha seleccionado la opción 2 para la fabricación del bloque principal del sensor con base en la ponderación de los siguientes criterios:

- **Criterio de baja inversión (costos)**

La opción 1 tiene baja calificación al ser requerida una mayor cantidad de maquinado en ángulos de arranque de viruta más complicados. La opción 2 ofrece la optativa más

económica ya que emplea una menor cantidad de maquinado y ofrece facilidades para un arranque de viruta sin complejidades al usar un proceso de fresado CNC.

- **Criterio de facilidad de manufactura**

Para las opciones se define como método de manufactura el proceso CNC. La opción 2 es la más fácil de manufacturar ya que requiere la menor cantidad de material a remover.

- **Procesamiento de información**

Para el presente criterio se consideran los siguientes factores. En primer lugar, el tener cuatro vigas facilita el registrar deformaciones en un eje específico mientras que en un diseño con 3 vigas existirían vigas inclinadas donde una galga registraría deformación en más de un eje dificultando el procesamiento de información (Ahmad, Terrence & Chyi-Yeu, 2021). En segundo lugar, el tener paredes finas en el anillo exterior para el apoyo de las vigas beneficia la deformación elástica de las vigas facilitando el procesamiento de información (Akbari & Kazerooni, 2018). Con base en aquella información, se toma como mejores opciones en este criterio a las optativas 1 y 2.

- **Facilidad de ensamble**

Se toma en cuenta para el ensamble que las opciones con bloques centrales cúbicos son mejores ya que sobre las mismas se han diseñado menos agujeros roscados para las uniones. Bajo este criterio, se tiene que las opciones 1 y 3 dan menor facilidad de ensamblaje mientras que la opción 2 requeriría de una menor cantidad de uniones para permitir un ensamblaje seguro.

- **Selección de diseño para la plataforma superior**

La plataforma es el componente que se encarga de transmitir la fuerza ejercida por una acción externa hacia la parte céntrica del sensor. Esto permite que la fuerza aplicada afecte al bloque principal del sensor y así deformar los puntos críticos donde las galgas tomarán su medición (Ahmad, Terrence & Chyi-Yeu, 2021). Para el presente caso, se proponen alternativas de diseño que puedan acoplarse a la opción seleccionada de bloque principal.

- **Opción 1 de diseño de plataforma**

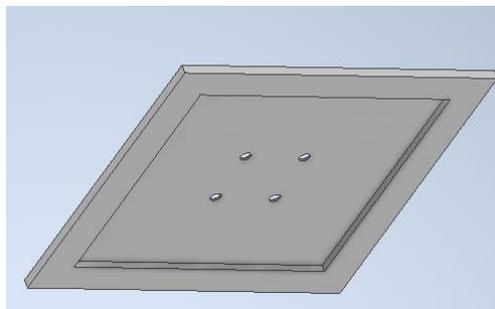


Figura 4. Prototipo diseño #1 plataforma superior

Descripción: Superficie cuadrada de 27x27 cm de espesor de 4mm con fresado de 1mm de profundidad.

- **Opción 2 de diseño de plataforma**

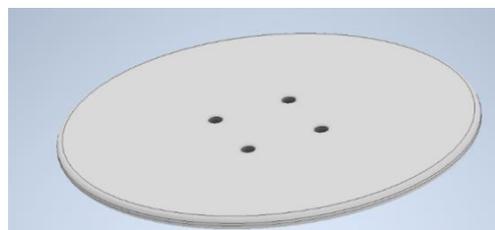


Figura 5. Prototipo diseño #2 plataforma superior

Descripción: Superficie circular con diámetro de 27x27 cm y espesor de 4mm

- **Opción 3 de diseño de plataforma**

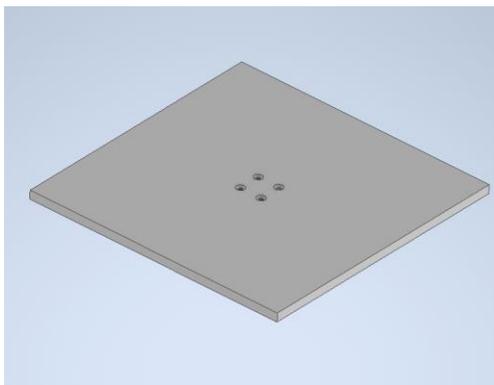


Figura 6. Prototipo diseño #3 plataforma inferior

Descripción: Superficie rectangular 27x27 cm con espesor de 1 cm.

Posteriormente se discutirán las razones de la ponderación para cada diseño en cada criterio.

Tabla 2. Matriz de selección para la plataforma

Propuesta	35%		30%		10%		25%		Total
	Facilidad de manufactura		Baja inversión (costos)		Protección contra agentes externos		Facilidades para el usuario		
	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada	
1	55	19.25	60	18	60	6	80	20	63.25
2	60	21	50	15	40	4	80	20	60
3	80	28	80	24	50	5	80	20	77

Discusión para selección de la plataforma

Se ha seleccionado a la opción 3 como la indicada para la plataforma a través del análisis y ponderación de los siguientes criterios:

- **Criterio de facilidad de manufactura**

Se consideró este criterio ya que se busca la factibilidad y realismo del diseño. La opción 3 es un proceso fácil de maquinar ya que el diseño pertenece a una plataforma rectangular.

- **Criterio de baja inversión (costos)**

Los parámetros por calificar son relacionados a la dificultad en el maquinado. La opción 3 es la que requiere menor cantidad de procesos de manufactura y por ende posee la mejor calificación.

- **Protección contra agentes externos**

Otro parámetro considerado es que se debe cuidar los componentes internos que tendrán dentro del bloque de agentes externos como el polvo o el agua. La opción 1 permite un diseño enfocado en reducir la capacidad de ingreso de agentes externos al sensor.

- **Facilidades para el usuario**

Se considera que el tamaño de la plataforma debe ser adecuado para que los usuarios tengan una mayor área para poder aplicar fuerzas al usar el sensor. Todos los diseños poseen un área suficiente para ser empleados por los usuarios por ende su calificación es similar.

- **Selección de diseño para la carcasa base**

La carcasa almacena toda la placa electrónica, que es el circuito encargado de procesar la información que se obtenga de las galgas extensiométricas. La carcasa se conforma de una

estructura metálica que se ubica en la parte inferior del bloque principal, soportando todo el peso al que se someta el dispositivo.

- **Opción 1 de diseño para carcasa base**

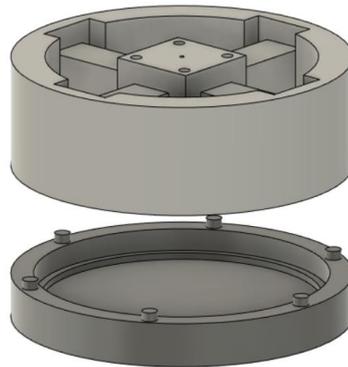


Figura 7. Prototipo diseño #1 carcasa inferior

Descripción: Base de almacenamiento con arreglo radial de 6 pines de 7 mm de diámetro

- **Opción 2 de diseño para carcasa base**

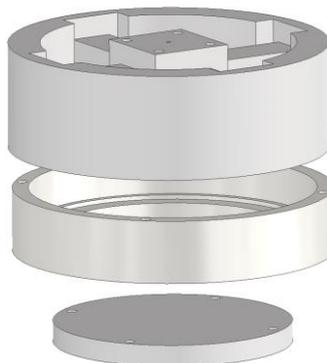


Figura 8. Prototipo diseño #2 carcasa inferior

Descripción: Base de almacenamiento con arreglo radial de 4 agujeros roscados de 5 mm de diámetro para una unión mediante pernos y placa circular removible unida por 4 tornillos de 5 mm de diámetro.

- **Opción 3 de diseño para carcasa base**

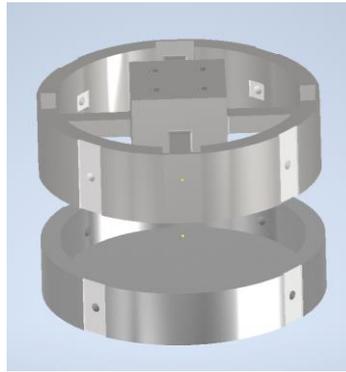


Figura 9. Prototipo diseño #3 carcasa inferior

Descripción: Base con arreglo radial de 4 agujeros roscados de 5 mm laterales para unión con platinas.

Posteriormente se discutirán las razones de la ponderación para cada diseño en cada criterio.

Tabla 3. Matriz de selección para la carcasa base

N° de Propuesta	15%		30%		35%		20%		Total
	Baja inversión (costos)		Facilidad de manufactura		Protección al sistema		Facilidad de mantenimiento		
	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada	
1	50	7.5	60	18	90	31.5	50	10	67
2	70	10.5	80	24	70	24.5	80	16	75
3	80	12	90	27	90	31.5	90	18	88.5

Se ha seleccionado a la opción 3 como la indicada para la carcasa base acorde a la discusión de los siguientes criterios:

Discusión para selección de la carcasa base

- **Criterio de baja inversión (costos)**

La opción 3 nos ofrecerá la optativa más económica ya que debido a su geometría simple no requiere de procesos excesivos de maquinado lo cual va directamente relacionado con los costos.

- **Criterio de facilidad de manufactura**

Las opciones 2 y 3 tienen las más altas calificaciones al ser requerido únicamente un proceso de torneado. No obstante, la opción 2 requiere de un proceso de corte adicional para la placa circular removible por lo que posee una calificación un poco menor.

- **Protección del sistema**

Se define para la protección del sistema que cumpla con la sujeción segura a la base. Las opciones 1 y 3 permiten una sujeción totalmente fija al tener una unión a presión en la optativa 1 y una unión total mediante pernos en la optativa 3.

- **Facilidad de mantenimiento**

Para este criterio se considera como la carcasa facilita el desensamble para el mantenimiento a la parte electrónica. La opción 2 es la mejor ya que el desensamble es permitido al estar toda la carcasa unida por pernos y a su vez se tiene una placa circular removible unida por tornillos. Por otro lado, la opción 3 tiene una alta ponderación al poder removerse la carcasa unida por pernos y platinas de acero.

1.2.Gestión del proyecto

Para la gestión del proyecto se tomó en cuenta un diagrama de Gantt para organizar las tareas a ser completadas y dar seguimiento al progreso del proyecto todo con miras a cumplir los objetivos planteados. El diagrama de Gantt se puede visualizar en el anexo A. Por otro lado, para el manejo de gastos relacionados con el desarrollo del sensor de fuerza de seis ejes de libertad se muestra el informe de gastos para la construcción del prototipo final en el anexo B.

1.3.Lista de requerimientos y especificaciones técnicas

La lista de requisitos proporcionados por el cliente es fundamental para la ejecución del proyecto con el fin de cumplir con las expectativas de este. Los mismos se presenta a continuación:

Tabla 4. Requerimientos y especificaciones técnicas para el sensor de fuerza-torque

Lista de requerimientos	Especificaciones técnicas
El cliente solicita un prototipo que debe ser ergonómico y fácil de transportar.	El sensor tendrá dimensiones máximas de: <ul style="list-style-type: none"> • Largo: 150mm • Ancho: 150mm • Alto: 100mm
El sensor debe medir la fuerza de una actividad física como correr o saltar.	Los valores máximos de las fuerzas y momentos que debe medir el sensor son: <ul style="list-style-type: none"> • $F_x=F_y=2500N$ • $F_z=4500N$ • $M_x=M_y=M_z=100Nm$

La fabricación del sensor debe ser factible y cumplir con el presupuesto establecido.	El material usado por el prototipo debe ser fácil de encontrar en el medio.
El sensor debe ser preciso.	<p>Las resoluciones de las fuerzas y momentos deben ser:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $F_x=F_y=F_z=0.1\text{N}$ • $M_x=M_y=M_z=0.005\text{Nm}$
Desarrollar un sensor que funcione en los 3 ejes x-y-z y use la cantidad mínima de galgas.	Minimizar el número total de galgas colocándolas en las secciones donde la deformación es máxima usando puentes de Wheatstone
Los dispositivos electrónicos del sensor deben funcionar con el mismo voltaje.	Alimentación de 9-30V DC
La visualización de datos de salida del sensor debe ser rápida.	La información será mostrada cada 4 kHz

(Arauz, 2022)

2. Materiales y métodos

2.1. Selección del material

Por otro lado, para la selección del material empleado en la manufactura del bloque principal se definen como opciones de materiales a los siguientes: acero AISI 1045, acero AISI 1038, aluminio 7075-T6 y aluminio 6061. Los aceros se consideraron debido a que tienen una alta disponibilidad en el mercado nacional y tienen elevados esfuerzos de fluencia para soportar el esfuerzo máximo generado por las cargas máximas. Por otro lado, se ha considerado a las aleaciones de aluminio debido a que es un material comúnmente usado para la elaboración de bloques principales de sensores de fuerza/torque (Zhang et al, 2019). Como primer criterio para la selección del material, se considera la facilidad de deformación en la estructura ya que con base en el módulo de Young las vigas del bloque principal se deformarían más fácilmente lo cual beneficiaría la calidad en la medición de voltajes de salida de los puentes de Wheatstone. Como segundo criterio, se considera la disponibilidad del material. Como tercer criterio, se considera la facilidad de maquinado del material y finalmente se evalúa el esfuerzo máximo generado sobre el bloque principal. Acorde a las simulaciones se genera un esfuerzo de Von Mises máximo de 403 MPa para la geometría final del bloque principal del sensor en el punto crítico anteriormente indicado (Ver sección de simulaciones). Por ende, el esfuerzo de fluencia del material seleccionado debe ser mayor para el bloque principal del sensor. El resumen de la ponderación de los criterios anteriormente detallados para la selección del material para el bloque principal del sensor se presenta a continuación:

Tabla 5. Ponderación para selección de materiales para el bloque principal

N° de Propuesta	35%		15%		15%		35%		Total
	Facilidad de deformación en la estructura		Disponibilidad del material		Facilidad del maquinado		Resistencia al esfuerzo máximo		
	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada	Nota	Nota ponderada	
AISI 1045	50	17.5	100	15	100	15	100	35	82.5
AISI 1038	50	17.5	100	15	100	15	100	35	82.5
Aluminio 7075-T6	100	35	50	7.5	80	12	100	35	89.5
Aluminio 6061	100	35	100	15	80	12	0	0	62

En resumen, tras la comparación de las propiedades de los materiales se ha definido que la mejor opción para la manufactura del bloque principal del sensor es el Aluminio 7075-T6 con base en las ponderaciones dadas por el análisis de los siguientes criterios:

- **Facilidad de deformación en la estructura**

Se considera como factor fundamental al módulo de Young de cada material para definir su facilidad de deformarse ante la aplicación de cargas. Las aleaciones de aluminio 7075-T6 y 6061 poseen un módulo de Young de 70 GPa (Matmatch, 2022). Dicho módulo es menor al de las aleaciones de acero que tienen un módulo de Young de 200 GPa (Matweb,2022). Por lo tanto, las aleaciones de aluminio son más fáciles de deformar y poseen una ponderación más alta.

- **Disponibilidad del material**

Las aleaciones de acero son materiales con alta disponibilidad inmediata en el mercado nacional. Por otra parte, la aleación de aluminio 6061 tiene una disponibilidad bajo pedido nacionalmente. Finalmente, la aleación de aluminio 7075-T6 corresponde a un material que debe ser importado. Con base en dichos factores se ha ponderado a los materiales.

- **Facilidad del maquinado**

Se considera que los aceros son materiales sobre los cuales es más común llevar a cabo procesos de maquinado por arranque de viruta y por ende aquello beneficia la calidad final del bloque principal del sensor y por dicha razón poseen una mayor ponderación.

- **Resistencia al esfuerzo máximo**

El límite de fluencia del acero 1045 es de 450MPa (Matweb, 2022). Por otra parte, el límite de fluencia para el acero 1038 es de 485MPa (AZOM, 2012). Finalmente, el límite de fluencia para el aluminio 7075-T6 es de 450MPa (Matmatch, 2022). Dichos materiales son los únicos que poseen un esfuerzo de fluencia mayor al requerido y por ende tiene una ponderación perfecta.

2.2.Diseño del circuito electrónico

Para el presente sensor, es necesario definir un circuito electrónico con los siguientes elementos para cumplir con los requerimientos del sensor: fuente de voltaje adecuada, puentes de Wheatstone conectados en paralelo, circuito de amplificación y procesamiento de señal, tarjeta de adquisición de datos y vinculación de las señales de salida del circuito con el software MATLAB para realizar observaciones en tiempo real de los valores medidos por el sensor. Con

respecto a la fuente de voltaje se ha seleccionado una fuente de 9V la cual permite alimentar un circuito de un puente de Wheatstone (Idrovo & Quintanilla, 2010). Posteriormente, para los puentes de Wheatstone en el presente caso se ha optado por un arreglo de 16 galgas extensiométricas arregladas en 2 puentes completos para medir las magnitudes de fuerza Z y momento Z complementado por 4 semi-puentes de Wheatstone para medir las magnitudes de: fuerza X, fuerza Y, momento X y momento Y. Aquel arreglo de galgas permitirá una correcta medición de cargas con un bajo acoplamiento en mediciones de diferentes puentes de Wheatstone (Yuan et. al, 2015). Para los medios puentes se complementan los brazos del circuito con resistencias eléctricas equivalentes a las resistencias nominales de las galgas extensiométricas empleadas que en este caso serían resistencias de 350 Ohmios otorgadas por potenciómetros configurados.

Finalmente, se adquieren los datos del circuito con una DAQ (tarjeta de adquisición de datos), la misma que es vinculada con el computador personal para poder visualizar las señales medidas por el sensor en tiempo real. Un diagrama completo del circuito detallado para el sensor de fuerza/torque se muestra a continuación:

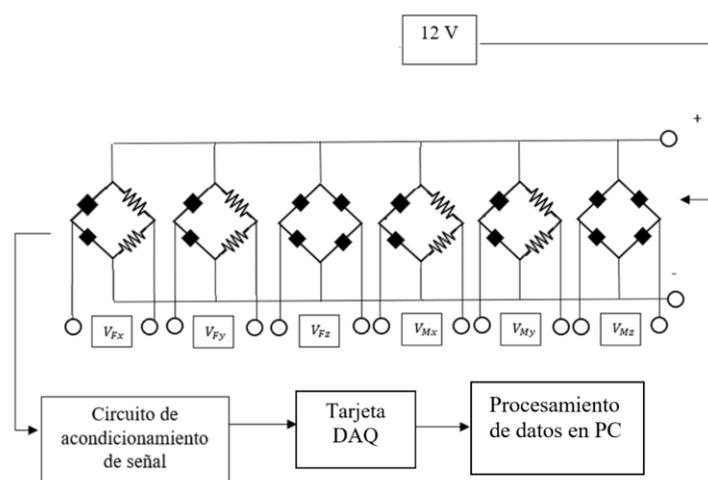


Figura 10. Esquema simplificado del circuito electrónico para el sensor de fuerza/torque
Simbología:

 : Galga extensiométrica SGD-7/350-LY41 de resistencia nominal igual a 350 Ω

 : Resistencia eléctrica de 350 Ω (Otorgada por un potenciómetro)

El presente circuito se puede efectuar de forma robusta con cables tipo "jumper" y conexiones de prueba en un "proto-board". Para testeo del sensor se puede construir el sensor para medir voltajes de salida con los cuales evaluar el funcionamiento del sensor al ser el mismo sometido a cargas uniaxiales debido a que un voltaje de salida refleja una deformación en las zonas de la estructura donde se encuentran las galgas extensiométricas. No obstante, para una versión comercial y final del sensor lo más recomendable es la elaboración de un circuito impreso (PCB) para la reducción de conexiones mediante cables y así otorgar una presentación pulcra al sensor.

Como trabajo a realizar en iteraciones futuras, se considera posterior a los puentes de Wheatstone la inclusión de un circuito de amplificación y filtración debido a que los voltajes de salida de los puentes son normalmente bajos y requieren ser amplificados y filtrados para su correcta lectura. A todo este apartado se le conoce como circuito de acondicionamiento de señal.

2.3.Cálculos

Para los cálculos efectuados se consideran estudios de análisis de falla por esfuerzos uniaxiales en las vigas del bloque principal del sensor, estudio de pernos para unión entre la plataforma y el bloque principal, análisis de deflexión máxima de la plataforma y cálculos relacionado al circuito electrónico del sensor. Para mayor detalle de los cálculos revisar el anexo H.

- **Cálculos de viga con aplicación de fuerza máxima en eje Z**

Suposiciones:

- Las vigas se encuentran empotradas al cubo central del bloque principal
- Se asume que las vigas son elaboradas de Aluminio 7075-T6 y tienen propiedades constantes a lo largo de su geometría
- El punto crítico es en la fijación entre la viga y el cubo central.
- La pared fina de apoyo para la viga tiene un grosor de 2mm y permite un movimiento libre en todos los ejes al no ser considerable la rigidez de una pared extremadamente fina.

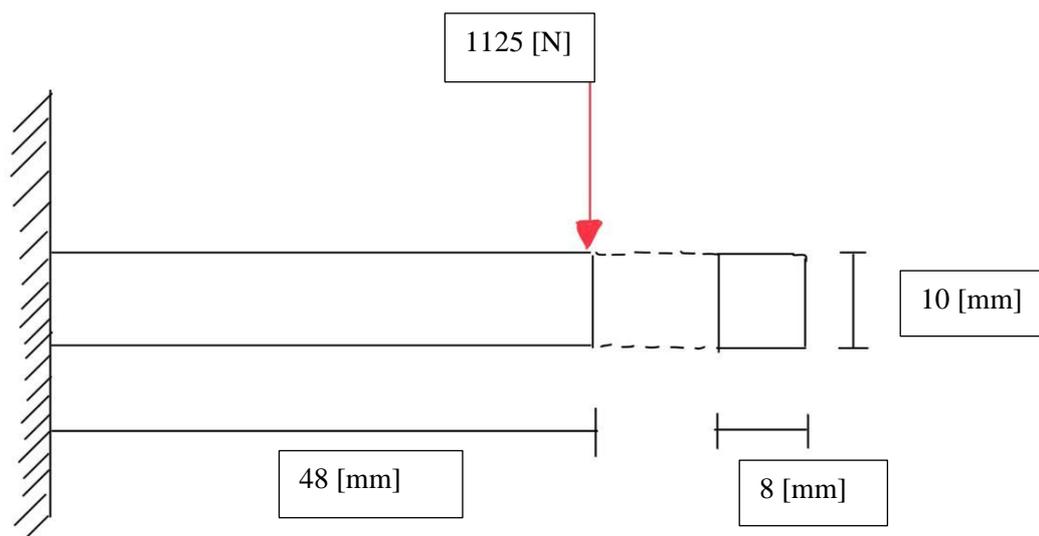


Figura 11. Diagrama de la viga del bloque principal con carga en eje Z

Descripción: En el diagrama se indican las dimensiones de la viga y la carga en eje Z para el análisis estático.

Datos:

$$F = 4500 \text{ [N]}$$

$d = 48$ [mm] (distancia desde el punto de unión entre la viga y el cubo hasta la unión de la viga con la pared fina de apoyo)

$c = 5$ [mm]

$b = 8$ [mm]

$h = 10$ [mm]

$E = 70$ [GPa] (Beer, 2009)

Se divide la fuerza para 4 ya que son 4 vigas las que van a soportar la fuerza.

$$\sigma = \frac{M * c}{I} = \frac{F * d * c}{I} = \frac{(54000)(5)}{(666.67)} \text{ (Beer, 2009)}$$

$$\sigma = 404.99 \text{ [MPa]}$$

Se sabe que el esfuerzo de fluencia del aluminio 7075-T6 es de 450 [MPa]. Con esto calculamos el factor de seguridad (Matmatch,2022).

$$n = \frac{S_y}{\sigma_A} = \frac{450}{404.99} = 1.11$$

Para calcular el límite de endurecimiento S_e .

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S'_e \text{ (Budynas, Nisbett, \& Shigley, 2011)}$$

$$S'_e = 0.5 * S_{ut} = 0.5 * 560$$

$$S'_e = 280 \text{ [MPa]}$$

$$S_e = 0.84 * 1 * 1 * 1 * 1 * 1 * 280$$

$$S_e = 235.2 \text{ [MPa]}$$

Calculamos el esfuerzo medio.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{404.99 + 0}{2} = 202.49 \text{ [MPa]}$$

Calculamos el esfuerzo amplitud.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{404.99 - 0}{2} = 202.49 \text{ [MPa]}$$

Utilizamos a su vez la teoría de Gerber.

$$n = \frac{1}{2} \left(\frac{S_{ut}}{\sigma_m} \right)^2 \frac{\sigma_a}{S_e} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 * \sigma_m * S_e}{S_{ut} * \sigma_a} \right)^2} \right] \text{ (Budynas, Nisbett, \& Shigley, 2011)}$$

$$n = \frac{1}{2} \left(\frac{560}{202.49} \right)^2 \frac{202.49}{204.15} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 * 202.49 * 235.2}{560 * 202.49} \right)^2} \right] = 1.16$$

Se dibuja la línea de carga, en este caso tenemos esfuerzos repetidos por lo tanto el esfuerzo amplitud y medio son iguales.

$$\sigma_a = \sigma_m$$

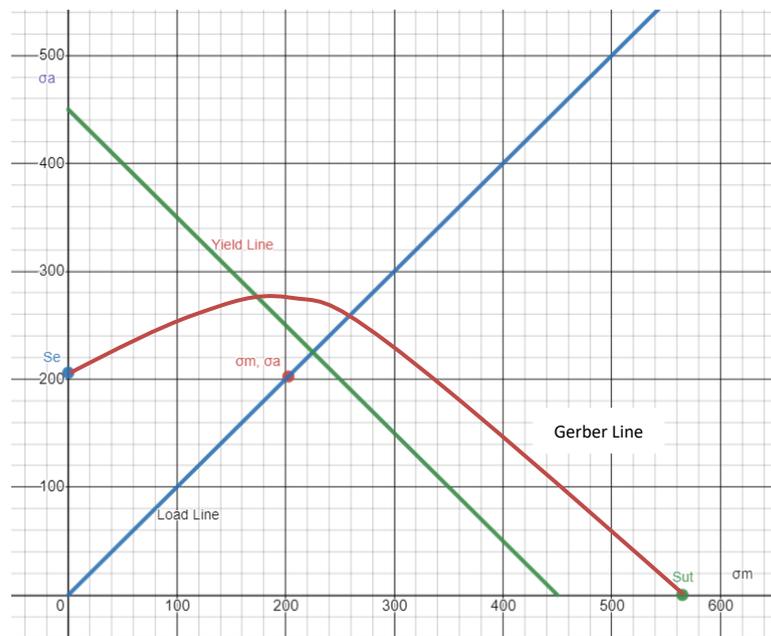


Figura 12. Línea de carga para las vigas del bloque principal cargado con 4500 N en el eje Z

Descripción: Se observa un esquema de la carga de la viga y se consideran las líneas de fluencia y Gerber a manera de visualizar un esquema del proceso de carga del material y de cómo el mismo posee un factor de seguridad superior a 1.

- **Cálculos viga aplicación fuerza en “X” y “Y”**

Para complementar los estudios anteriormente definidos se procede a estudiar el comportamiento de las vigas ante la máxima fuerza en ejes “X” y “Y” para validar los factores de seguridad.

Suposiciones:

- Se consideran las mismas suposiciones anteriormente detalladas para estudios de viga con aplicación de fuerza máxima en eje Z.
- Se complementan los estudios de las vigas en torno a fuerza realizando procesos de cálculos para cuando las vigas soportan cargas de 2500N en los ejes “X” y “Y”.

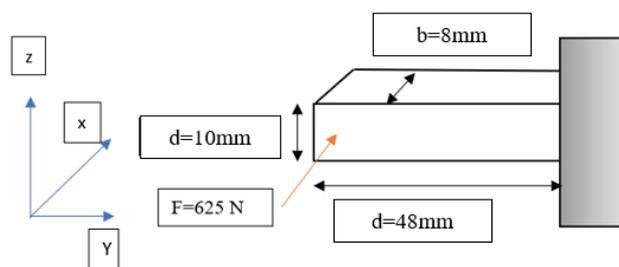


Figura 13. Representación gráfica de sistema de fuerzas aplicadas en la viga sometida a fuerza en “X” máxima

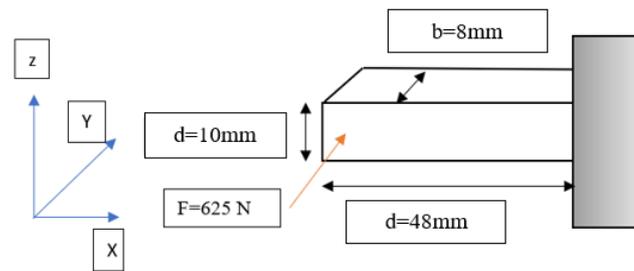


Figura 14. Representación gráfica de sistema de fuerzas aplicadas en la viga sometida a fuerza en “Y” máxima

Descripción: Se observa en los diagramas las cargas laterales dadas por fuerza en los ejes “X” y “Y” para realizar el correspondiente análisis estático.

Del diagrama se extrae los siguientes datos elementales para el cálculo de esfuerzos, deformación máxima.

Datos:

$$F = 625 \text{ N}$$

$$d = 48 \text{ mm}$$

$$c = 5 \text{ mm}$$

$$b = 8 \text{ mm}$$

$$h = 10 \text{ mm}$$

$$E = 70 \text{ GPa (Beer, 2009)}$$

Se aclara que el sistema de coordenada difiere en cada dirección de fuerza, sin embargo, el valor es el mismo.

$$M = F \times d = 625\text{N} \times 48\text{ mm} = 30000\text{ Nmm}$$

Se calcula el momento a aplicar a la viga

$$\sigma_f = \frac{M \times c}{I} \text{ (Beer, 2009)}$$

$$\sigma_f = \frac{M \times c}{I} = \frac{625 \times d \times \frac{h}{2}}{\frac{1}{12} \times b \times h^3} = 351.56\text{ MPa}$$

$$n = \frac{450\text{ MPa}}{351.56\text{ MPa}} = 1.28$$

Tabla 6. Resumen de esfuerzos y factores de seguridad del análisis estático

Fuerza	Base (mm)	Inercia (mm ⁴)	Esfuerzo (MPa)	Factor de seguridad
X	10	426.67	351.56	1.28
Y	10	426.67	351.56	1.28
Z	8	666.67	404.99	1.11

Descripción: Se presenta un resumen de los cálculos efectuados para análisis estático en vigas por carga máxima en ejes “X” y “Y”

- **Cálculos de pernos de unión entre la plataforma y el bloque principal en cortante**

El método usado para unir la plataforma con el bloque principal son pernos. Se decidió usar un mínimo de 4 pernos de 5 mm con paso grueso y encontrar los factores de seguridad correspondiente. En la siguiente imagen, se puede mostrar un diagrama de fuerza de los componentes a unir con los pernos y el punto de aplicación de la fuerza.

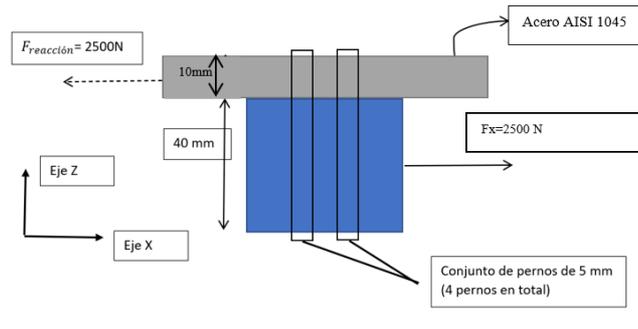


Figura 15. Diagrama de fuerza de la unión del perno con sus miembros

Descripción: En el diagrama se observa la junta entre el bloque principal y la plataforma con los pernos y la fuerza aplicada con su respectiva fuerza de reacción

Tabla 7. Características del perno seleccionado

Diámetro nominal mayor d (mm)	Paso grueso		
	Paso p (mm)	Área según esfuerzo de tensión A_t (mm)	Área de diámetro menor A_r (mm)
5	0.8	14.2	12.7

(Budynas, Nisbett, & Shigley, 2011)

Descripción: Características definitorias del perno a emplear para uniones entre componentes del sensor de fuerza.

Se define la longitud del perno que vamos a utilizar mediante la siguiente formula. Un perno bien diseñado lleva arandelas en sus dos extremos, una tuerca que permite ajustarlo (regular hexagonal) y dejar un mínimo de dos veces el paso después de la tuerca. En este caso, los materiales que van a ajustar son el grosor de la plataforma de Acero AISI 1045 (10 mm) y la altura del bloque del cubo (40 mm).

$$L = Gm + 2 * (Ga) + Ht + 2 * (p)$$

- Nomenclatura para cálculo de longitud del perno:

L = Longitud total del perno

G_m = Grosor de los materiales = 10 mm + 40 mm = 50 mm

G_a = Grosor de la arandela = 1.75 mm (seleccionando una arandela 5R en la tabla A-33)

(Budynas, Nisbett, & Shigley, 2011)

H_t = altura de la tuerca = 4.7 mm (para un tamaño nominal M5 en la tabla A – 31)

(Budynas, Nisbett, & Shigley, 2011)

p = paso = 0.8 mm

$L = 50 \text{ mm} + 2 * (1.75 \text{ mm}) + 4.7 \text{ mm} + 2 * (0.8 \text{ mm}) = 59.8 \text{ mm}$

En la tabla A-17, se escoge una longitud nominal estandarizada de 60 mm para la longitud L del perno.

$$L = 60 \text{ mm}$$

En la tabla 8-11 del libro, se escoge la clase ISO 4.6 por su diámetro M5 con una fuerza de prueba mínima $S_p = 225 \text{ MPa}$, esfuerzo último a la tensión de $S_{ut} = 400 \text{ MPa}$, esfuerzo de fluencia $S_{y_{bolt}} = 240 \text{ MPa}$ y esfuerzo de fluencia cortante $S_{s_{y_{bolt}}} = 0.577 * (240 \text{ MPa}) = 138.48 \text{ MPa}$ (Budynas, Nisbett, & Shigley, 2011). El estudio se lo realiza con la sección de grosor menor de la unión. En este caso es el acero AISI 1045 con esfuerzo de fluencia $S_{y_{member}} = 450 \text{ MPa}$ y esfuerzo último en tensión $S_{ut_{member}} = 565 \text{ MPa}$ (Budynas, Nisbett, & Shigley, 2011).

- Estudio de esfuerzo cortante en los pernos

El primer caso pertenece si la parte roscada se encuentra en el plano cortante y el segundo caso es cuando el plano cortante no tiene parte roscada.

- Plano cortante sin parte roscada

$$\tau = \frac{F}{A_s} = \frac{2500N}{4 * \left(\frac{\pi d^2}{4}\right)} = \frac{2500N}{\pi * (5mm)^2} = 31.83MPa$$

τ = Esfuerzo cortante (MPa)

A_s = Area del plano cortante (mm²)

$$n = \frac{S_{sybolt}}{\tau} = \frac{138.48 MPa}{31.83 MPa} = 4.35$$

S_{sybolt} = Esfuerzo cortante de fluencia – perno (MPa)

- Plano cortante con parte roscada

$$\tau = \frac{F}{A_r} = \frac{2500N}{196.85mm^2} = 12.7 MPa$$

A_r = Area de diametro menor (mm²) – tabla 8 – 1 (Budynas, Nisbett, & Shigley, 2011)

$$n = \frac{S_{sybolt}}{\tau} = \frac{138.48 MPa}{12.7 MPa} = 10.9$$

Los cálculos demuestran que el perno pasa todos los tipos de falla mencionados al tener factores de seguridad superiores a 1.

- **Deflexión en la plataforma del sensor**

En el caso de la plataforma es necesario encontrar la máxima deflexión de esta cuando una fuerza vertical máxima se aplica al borde. La plataforma se encuentra empernada al cubo

del bloque principal a manera de transmitir totalmente la fuerza. En el siguiente diagrama por simplificación se omiten las vigas y el anillo exterior del bloque principal del sensor.

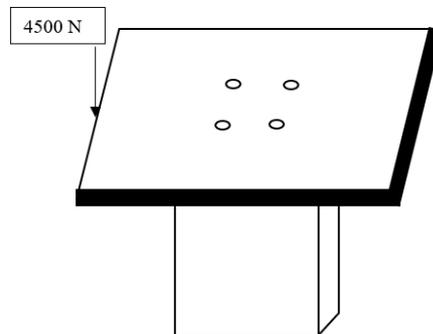


Figura 16. Plataforma con carga máxima en un extremo

Descripción: Se considera una carga en el extremo de la placa como caso crítico para evaluar deflexión máxima. La plataforma por recomendación del cliente debe tener unas dimensiones de 27 cm X 27 cm de sección frontal

Suposiciones:

- Se secciona la placa hasta la zona de apoyo al bloque que se encuentra emperrado a la plataforma y se simplifica la estructura como una viga en voladizo.
- Se considera que la placa está elaborada de acero AISI 1045 y tiene propiedades constantes a lo largo de su geometría

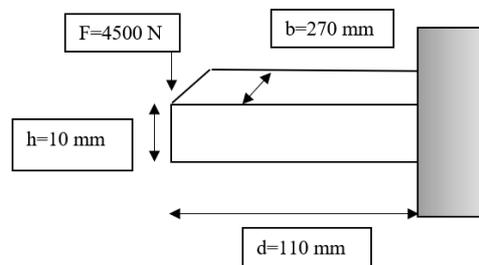


Figura 17. Representación del extremo libre de la plataforma como una viga en voladizo

- Datos:

$$F = 4500 \text{ N}$$

$$d = 110 \text{ mm}$$

$$c = 5 \text{ mm}$$

$$b = 270 \text{ mm}$$

$$h = 10 \text{ mm}$$

$E = 200 \text{ GPa}$ (propiedad de la aleación de acero AISI 1045) (Budynas, Nisbett, & Shigley, 2011)

$S_y = 450 \text{ MPa}$ (Matweb, 2022)

$$\sigma = \frac{M \times c}{I} = \frac{4500 \times d \times \frac{h}{2}}{\frac{1}{12} \times b \times h^3} = 110 \text{ MPa (Beer, 2009)}$$

- Factor de seguridad con teoría del esfuerzo máximo

$$n = \frac{S_y}{\sigma_f} = \frac{450 \text{ MPa}}{110 \text{ MPa}} = 4.09$$

Para encontrar la máxima deflexión para el extremo de la plataforma se considera la tabla de deflexión de vigas del apéndice C del libro de Mecánica de Materiales de Hibbeler:

$$y_{\max} = -\frac{F \times d^3}{3 \times E \times I} = -\frac{4500 \times d^3}{3 \times E \times \frac{1}{12} \times b \times h^3} \text{ (Hibbeler, 2018)}$$

$$y_{\max} = -0.44 \text{ mm}$$

- **Cálculos de circuitos electrónicos y puentes de Wheatstone**

Datos:

- $V_{in} = 9 \text{ V}$
- $GF=2$ (Para una galga SGD-7/350-LY41)
- $R_n=350 \Omega$ (Para una galga SGD-7/350-LY41)
- Cálculos de voltajes de salida en los puentes de Wheatstone

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = 2 = \frac{\Delta R/350}{\varepsilon} \text{ (Idrovo \& Quintanilla, 2010)}$$

$$700 = \frac{\Delta R}{\varepsilon}$$

Se aplica fuerzas y momentos independientes en los seis grados de libertad. Luego mediante cálculos mecánicos se busca la deformación longitudinal en las 16 galgas que componen los 6 puentes de Wheatstone, buscando los grupos de 4 deformaciones en las galgas de un puente asociadas a la aplicación individual de cargas en cada eje. Con dichas deformaciones se determina teóricamente con la ecuación antes definida las variaciones en la resistencia para cada galga y se calculan los voltajes teóricos de salida de un solo puente cuando se aplica una carga máxima en un eje de interés y los voltajes de salida se calculan considerando un total desacoplamiento entre las deformaciones registradas por cada puente.

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{R_n(\Delta R_2 - \Delta R_1 + \Delta R_3 - \Delta R_4) + (\Delta R_2 \times \Delta R_3 - \Delta R_1 \times \Delta R_4)}{4R_n^2 + 2R_n(\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3 + \Delta R_4) + (\Delta R_1 + \Delta R_2)(\Delta R_3 + \Delta R_4)} \right)$$

(Idrovo & Quintanilla, 2010)

$$V_{out} = 9V \left(\frac{350 \times (\Delta R_2 - \Delta R_1 + \Delta R_3 - \Delta R_4) + (\Delta R_2 \times \Delta R_3 - \Delta R_1 \times \Delta R_4)}{122500 + 700(\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3 + \Delta R_4) + (\Delta R_1 + \Delta R_2)(\Delta R_3 + \Delta R_4)} \right)$$

A manera de encontrar las variaciones en la resistencia para cada puente se consideran las deformaciones a obtener a través de las simulaciones, lo cual es la siguiente parte que será desarrollada para el proyecto.

2.4.Simulaciones

- **Metodología para simulaciones de vigas en Autodesk Fusion 360**

Para estudiar posibles fallas del sensor en torno a las vigas es necesario estudiar los conjuntos de dos y cuatro vigas acopladas ante la acción de 3 cargas máximas simultaneas ($F_x=2500$ N, $F_y=2500$ N, $F_z=4500$ N) ya que aquello nos permitirá establecer si van a fallar o no las vigas y complementar el estudio anteriormente efectuado de cálculos en una viga por la acción única de la máxima fuerza vertical ($F_z=4500$ N). Se busca definir factores de seguridad mediante el criterio de falla de Von Mises por lo que en las simulaciones en Autodesk Fusion 360 se busca resultados de esfuerzo de Von Mises máximo y el proceso para realizar la simulación es el siguiente:

1. Definición del modelo en Autodesk Fusion 360 de una sola viga, dos vigas acopladas y cuatro vigas acopladas en cruz. Se procede a importar el modelo a analizar y se inicia ambiente para simulaciones en Fusion 360.
2. Se define la condición de contorno de empotramiento en el extremo fijo de cada viga y se definen las cargas de fuerzas en los tres ejes a ser aplicadas tomando en cuenta que

se debe dividir la carga total de cada fuerza para el número de vigas que formen el conjunto de vigas a ser estudiadas en la simulación

3. Se define un mallado fino y automático de elementos infinitesimales tetraédricos en Autodesk Fusion 360 para realizar la simulación
4. Se define el material de la parte como aluminio 7075-T6 con sus propiedades
5. Se procede a generar la simulación y se muestran los resultados de los esfuerzos de Von Mises a lo largo de cada simulación de vigas para identificar cual es el esfuerzo de Von Mises máximo que se ha generado.

- **Simulaciones para análisis de falla en el bloque principal del sensor**

En primer lugar, se procede a realizar simulaciones estáticas de carga sobre conjuntos de vigas acopladas y posteriormente sobre el bloque principal del sensor con el objetivo de analizar posibles fallas en estructuras simplificadas y posteriormente en la estructura completa del bloque principal (Ver figura 2). Para las dimensiones de las vigas se considera un diseño inicial de área transversal conformada por una base de 1cm y una altura de 8mm ya que alrededor de dichas dimensiones se diseñan las vigas de los sensores de fuerza para facilitar su deformación en beneficio del registro de información por parte de las galgas (Kang, Lee & Kim, 2014). Para la longitud de una viga, se considera la distancia desde el punto de aplicación de la fuerza hasta el punto de empotramiento de la viga en el sensor tomando en referencia la opción de diseño seleccionada para el bloque principal del sensor (Ver Figura 2). Para el presente caso, dicha longitud de la viga sería igual a 73 mm. A continuación, se muestran los resultados de la simulación en Autodesk Fusion 360 de modelos iniciales de viga y del bloque principal del sensor manufacturado con aluminio 7075-T6 como material asignado.

- **Simulación de carga en Fuerza “X”, Fuerza “Y” y Fuerza “Z” máximas para un conjunto de dos vigas acopladas del bloque principal del sensor**

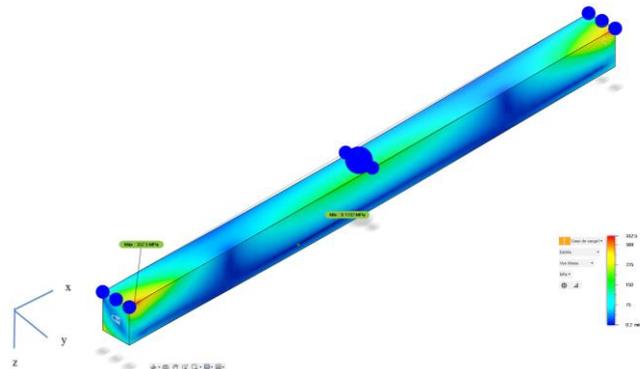


Figura 18. Esfuerzos de Von Mises en simulación de dos vigas acopladas

Para la simulación de dos vigas, se coloca las cargas puntuales en el centro de viga con una longitud total de 146 mm. En este caso, no se requiere trasladar las fuerzas. Como se observa en la Figura 18, el esfuerzo máximo es de 332.5 MPa ubicados en los empotramientos. Cabe resaltar que las fuerzas en “X” y “Z” pueden aplicarse en su sentido opuesto, la deformación cambia de sentido sin embargo el esfuerzo será el mismo debido a la simetría de la viga y se observa que la misma no se deforma plásticamente al tener el aluminio 7075 un $S_y=450\text{MPa}$.

- **Simulación de carga en Fuerza “X”, Fuerza “Y” y Fuerza “Z” máximas para vigas en cruz del bloque principal del sensor**

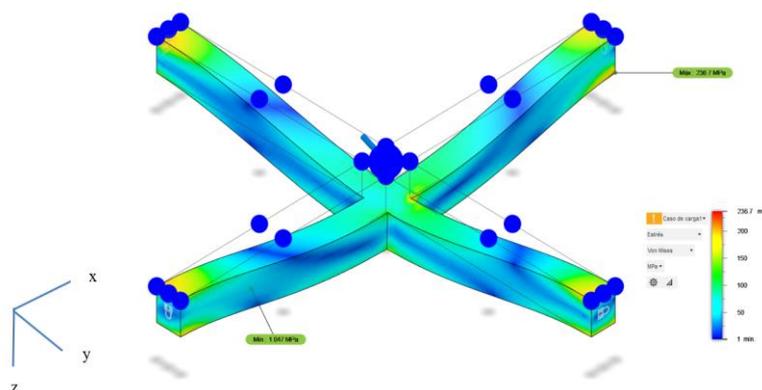


Figura 19. Esfuerzos de Von Mises en simulación de las cuatro vigas acopladas

Para la simulación de las vigas en cruz, se diseña el conjunto en su totalidad (dejando sin efecto el bloque central de las vigas donde se emperna la plataforma) y se colocan las cargas puntuales en el centro de la estructura simulando con cargas máximas ($F_x=2500\text{N}$, $F_y=2500\text{N}$, $F_z=4500\text{N}$). Se coloca empotramientos en cada extremo de las vigas y la dirección de las fuerzas correspondientes a sus ejes positivos, como se mencionó antes, la dirección de las fuerzas no afecta al esfuerzo máximo debido a la simetría de la geometría. Finalmente, en la presente simulación se obtiene un esfuerzo de Von Mises máximo de 236.7 MPa por lo cual tomando en cuenta el $S_y=450\text{MPa}$ en este caso tampoco falla la estructura (Matmatch, 2022).

- **Simulación de carga en Fuerza “X”, Fuerza “Y” y Fuerza “Z” en el bloque principal del sensor.**

Posteriormente, una vez analizadas las estructuras de las vigas mediante simulación se procede a estudiar la totalidad del bloque principal del sensor (Ver figura 2) con las dimensiones principales detalladas en el plano del anexo I. Se procede a mallar dicho modelo del bloque principal se colocan las cargas y se obtienen los resultados de esfuerzos para determinar si el presente bloque principal con el diseño actual no va a fallar. Para lo cual se obtuvo la siguiente simulación en Autodesk Fusion 360:

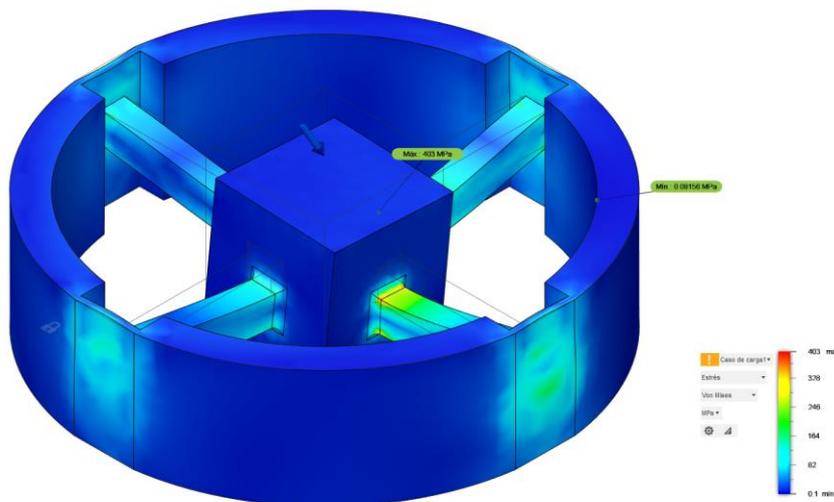


Figura 20. Esfuerzos de Von Mises en simulación del bloque principal del sensor

Se ha obtenido finalmente el esfuerzo de Von Mises máximo 403 MPa a través de las simulaciones el cual es inferior al establecido como S_y del material es de 450 MPa por ende el bloque principal del sensor no fallaría al ser sometido a cargas máximas de fuerzas.

- **Factores de seguridad para simulaciones de vigas**

Mediante los esfuerzos obtenidos, se aplica la teoría de falla de esfuerzo máximo. Para ello, se utiliza la siguiente ecuación:

$$n = \frac{S_y}{\sigma}$$

Donde el S_y corresponde a 450 MPa para el aluminio 7075-T6.

A continuación, se resume los factores de seguridad se cada caso de vigas.

Tabla 8. Factores de seguridad y esfuerzos máximos para simulaciones de vigas

Caso	Esfuerzo de Von Mises máximo (MPa)	Factor de seguridad
Dos vigas acopladas	332.5	1.35
Cuatro vigas en cruz	236.7	1.90
Bloque principal del sensor	403	1.12

Como se observa los factores de seguridad son mayores a 1 en todos los casos de las simulaciones con las cargas máximas aplicadas en el mismo instante de tiempo, por lo cual el diseño no sufriría de deformación plástica

- **Metodología para simulaciones de esfuerzo-deformación en el bloque principal del sensor mediante el uso de ABAQUS CAE y post-procesamiento en MATLAB**

Se busca realizar un análisis estático sobre el bloque principal del sensor para lo cual se emplea el método de elementos finitos con el uso de ABAQUS CAE. El proceso para simular el bloque principal con las cargas y condiciones de contorno adecuadas es el siguiente:

1. Se importa como una parte al archivo CAD del bloque principal del sensor desde el software en el que se haya modelado. En este caso, se empleó Autodesk Inventor para modelar el prototipo del bloque principal
2. Definimos el material y sus propiedades dentro del ABAQUS. Para lo cual, en la sección de “material” se da clic en crear material y se ingresan las propiedades correspondientes al aluminio 7075-T6. Dichas propiedades serán ingresadas en unidades estándar del sistema internacional para ser consistentes en las unidades en ABAQUS CAE y obtener resultados de esfuerzo en Pascales y de deformación (ϵ) en m/m. Las propiedades ingresadas para el material son las siguientes:
 - Densidad= $3000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ (Matmatch, 2022)
 - Módulo de Young= 70×10^9 Pa (Matmatch, 2022)
 - Coeficiente de Poisson= 0.32 (Matmatch, 2022)
3. Definir todo el bloque principal como la sección de análisis para el estudio a través de la opción de “Section Assignments”.
4. En este caso al ser un análisis estacionario no se define un “time step” al buscarse los resultados en el estado en el que se mantienen constantes todas las condiciones posteriores a la aplicación de cargas (fuerzas o momentos)
5. Se procede a crear un mallado fino en la pieza con elementos hexaédricos debido a la geometría conformada por vigas y un cubo central (figuras hexaédricas). De igual

manera una galga extensiométrica posee una forma rectangular por lo que para apreciar deformaciones en donde se van a ensamblar las galgas lo más recomendable es usar aquel tipo de elementos infinitesimales. Cabe destacar que para el mallado se hacen particiones del bloque principal para que la geometría se pueda mallar totalmente con los elementos hexaédricos.

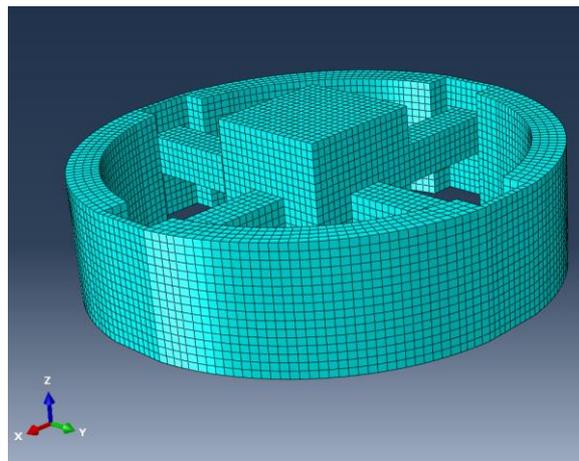


Figura 21. Bloque principal del sensor con el mallado para las simulaciones

6. Se definen las condiciones de contorno para la simulación indicando una condición de empotramiento (ENCASTRE) en la superficie inferior del sensor la cual va a ir fija al suelo sin libertad de movimiento en los ejes.

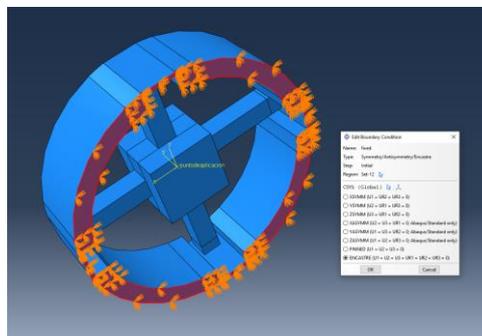


Figura 22. Condición de empotramiento en la base del bloque del sensor

7. Se define la carga dependiendo de lo que se requiera simular sobre para lo cual se puede definir una carga de fuerza o momento para luego seleccionar el punto central del cubo a lo largo de donde pasan los ejes como punto de aplicación. Una vez definido el punto de aplicación se procede a estipular el valor de la fuerza o del momento a cargar en unidades de Newtons o Newtons x metro.

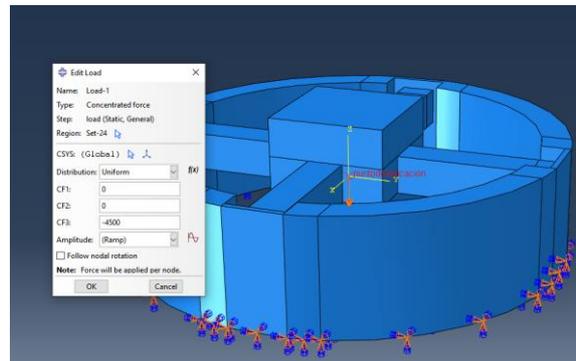


Figura 23. Ejemplo de definición de una carga ($F_z = -4500\text{N}$)

8. Con lo anteriormente definido, se crea un “job” de simulación en el ABAQUS y se da “submit” para iniciar la simulación. Una vez finalizada se procede a observar los resultados de valores máximos de esfuerzo y deformación. A su vez se puede imprimir resultados específicos como por ejemplo deformaciones en elementos infinitesimales específicos a través de la creación de un set de los elementos de interés y la posterior generación de un reporte de texto desde ABAQUS.

- **Análisis del funcionamiento del bloque principal del sensor mediante método de elementos finitos (FEM)**

Para conocer si es posible calibrar el sensor una vez sea fabricado es necesario emplear una metodología que nos permita conocer la capacidad de calibración tal como lo recomienda

el estándar ISO 376 (ISO, 2011). El análisis de elementos finitos es esencial para determinar la exactitud del sensor en sus mediciones a través del uso de simulaciones debido a que mediante el análisis en ABAQUS se puede definir esfuerzos necesarios para evaluar mediante simulaciones el factor de seguridad del sensor a través de la teoría de falla de Von Mises. Pero más importante, es la capacidad del ABAQUS para definir por método de elementos finitos las deformaciones generadas en las vigas tras la aplicación de una carga ya que con dicha información se puede obtener una determinación del funcionamiento simulado del sensor al medir fuerzas para definir exactitudes en la medición y la calidad de desacoplamiento del sensor al medir únicamente una fuerza aplicada y no medir magnitudes en otros ejes cuando se aplica una carga única (Ahmad, Wynn & Lin, 2021).

- **Definición del número y posicionamiento de las galgas en las vigas**

Para el presente caso, se ha decidido emplear 16 galgas para disminuir el acoplamiento en la medición de fuerzas y momentos debido a que se plantea colocar 4 galgas por cara de cada viga en los puntos de máxima deformación por cada carga individual que sea aplicada ($F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$) para que las galgas puedan captar la máxima información posible en toda dirección y sentido (Yuan et. al, 2015). Se considera que un arreglo de 24 galgas extensiométricas requeriría de ubicar 8 galgas más en vigas en las que ya se tienen posicionadas galgas para medir determinada magnitud por lo que el incremento de galgas aumentaría la posibilidad de acoplamiento en las mediciones y por aquello se descarta ese arreglo ya que requeriría de una mayor optimización en la geometría del sensor para mejorar el desacoplamiento en las mediciones de fuerzas y momentos (Kang, Lee & Kim, 2014). Posteriormente, se aplican las cargas individuales sobre el sensor y se localizan los puntos de máxima deformación para en aquellas posiciones ubicar las galgas extensiométricas (SG-

7/350-LY41) de longitud activa igual a 6.5mm por lo que mediante las simulaciones se localizan zonas donde se deban ubicar las galgas. Se considera que para medir F_x, F_y, M_x, M_y es necesario dos galgas (medio puente de Wheatstone) para registrar toda la información a lo largo de los ejes “x” y “y” (Idrovo & Quintanilla, 2010).

Para aquellas fuerzas se posiciona una galga en compresión y una en tensión, mientras que para fuerza y momento a lo largo del eje Z se busca definir cuatro posiciones (puentes completos de Wheatstone) para registrar toda la información. Las galgas se ubican en las zonas donde se registra una mayor deformación acorde a lo sugerido por la norma ASTM E251-20a cuando el bloque principal es sometido a simulaciones de carga uniaxial para maximizar la lectura de cada puente de Wheatstone. A través de las simulaciones se definieron las siguientes posiciones para las galgas.

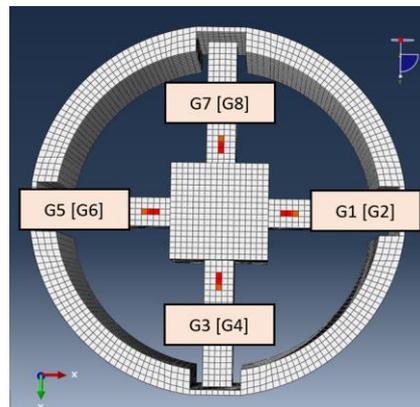


Figura 24. Ubicación de galgas extensiométricas en el bloque principal. Vista frontal

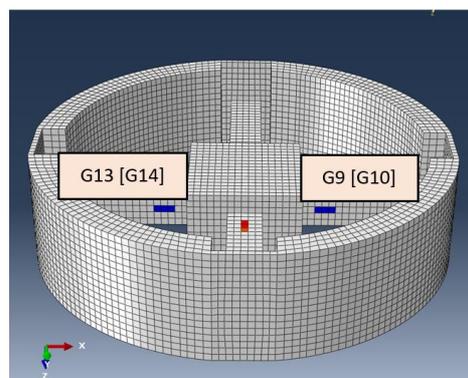


Figura 25. Ubicación de galgas extensiométricas en el bloque principal. Vista lateral 1

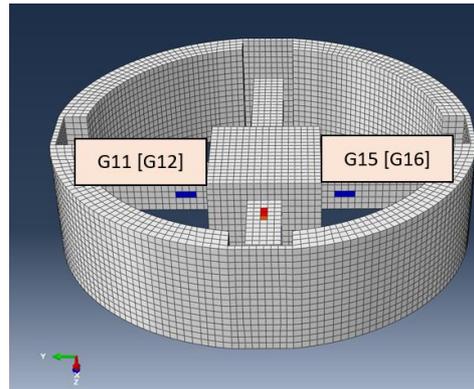


Figura 26. Ubicación de galgas extensiométricas en el bloque principal. Vista lateral 2

En las anteriores figuras se muestran las posiciones que ocuparán las galgas extensiométricas que formarán un arreglo de 16 galgas con las posiciones en donde se registre mayor deformación al simular cargas máximas individuales en cada eje dichas posiciones corresponden cada una a 5mm de la unión entre la viga y el centro cúbico. Con respecto a la nomenclatura, cada galga encerrada entre corchetes “[]” corresponde a una galga ubicada en la cara posterior a la mostrada en la imagen.

- **Deformaciones en galgas por simulaciones de cargas máximas individuales**

Para evaluar la calidad en las mediciones del sensor, se usan simulaciones que indican las deformaciones que debería medir cada una de las 16 galgas cuando una carga individual es aplicada para reconocer si las galgas asociadas con cada puente de Wheatstone para medir una carga en un eje en específico, registran las mayores deformaciones en comparación a las deformaciones registradas en otras galgas cuando se aplica la carga individual máxima que se desea que sea medida por uno de los 6 puentes de Wheatstone. Esta metodología se encuentra fundamentada en la norma ISO 376 en donde se indica que para calibrar equipos similares al presente sensor de fuerza se debe estudiar el comportamiento de los mismos en sus mediciones cuando son sometidas a una carga uniaxial (ISO, 2011). En este caso, para tener un correcto

aproximado de lo que registraría una galga se toma el promedio de las deformaciones en el conjunto de los elementos nodales contiguos que corresponden a la longitud activa de las galgas para lo cual, se realizan promedios de 2 deformaciones de elementos nodales contiguos para estimar la deformación que sufriría la galga en la vida real. Se realizan los experimentos de simulación con cargas individuales máximas ($F_x=2500\text{N}$, $F_y=2500\text{N}$, $F_z= -4500\text{N}$, $M_x=100\text{Nm}$, $M_y= 100\text{Nm}$ y $M_z= -100\text{Nm}$) y para cada experimento se registran las 16 deformaciones en cada una de las galgas efectuando reportes de ABAQUS en donde solo se indique las deformaciones (ϵ) en las posiciones de interés. A continuación, se muestra el resumen de las deformaciones registradas en cada galga para cada simulación con carga individual máxima.

Tabla 9. Deformaciones en 16 galgas por cargas individuales máximas

	ϵ para $F_x=2500\text{N}$	ϵ para $F_y=2500\text{N}$	ϵ para $F_z=-4500\text{N}$	ϵ para $M_x=100\text{Nm}$	ϵ para $M_y=100\text{Nm}$	ϵ para $M_z=100\text{Nm}$
G1	1.82069E-10	6.04044E-21	-4.47E-09	3.03233E-21	2.53068E-09	2.99344E-22
G2	1.84283E-10	1.06137E-20	4.47046E-09	3.14641E-21	-2.54E-09	3.73226E-22
G3	5.28184E-21	1.82069E-10	-4.47E-09	-2.53E-09	3.80212E-21	2.13127E-21
G4	8.75261E-21	1.84283E-10	4.47046E-09	2.53777E-09	3.65124E-21	3.15593E-21
G5	1.82069E-10	6.66019E-21	-4.47E-09	2.91764E-21	-2.53E-09	1.13921E-21
G6	1.84283E-10	4.58289E-21	4.47046E-09	3.03519E-21	2.53777E-09	4.08469E-22
G7	3.35037E-21	1.82069E-10	-4.47E-09	2.53068E-09	4.21095E-21	1.18746E-21
G8	7.86701E-21	1.84283E-10	4.47046E-09	-2.54E-09	3.77876E-21	1.26711E-21
G9	1.79136E-10	1.55617E-09	5.18056E-12	4.56059E-12	6.6444E-12	1.73127E-09
G10	1.79136E-10	-1.56E-09	5.18056E-12	4.56059E-12	6.6444E-12	-1.73E-09
G11	1.55617E-09	1.79136E-10	5.18056E-12	6.6444E-12	4.56059E-12	-1.73E-09
G12	-1.56E-09	1.79136E-10	5.18056E-12	6.6444E-12	4.56059E-12	1.73127E-09
G13	1.79136E-10	1.55617E-09	5.18056E-12	4.56059E-12	6.6444E-12	-1.73E-09
G14	1.79136E-10	-1.56E-09	5.18056E-12	4.56059E-12	6.6444E-12	1.73127E-09
G15	1.55617E-09	1.79136E-10	5.18056E-12	6.6444E-12	4.56059E-12	1.73127E-09
G16	-1.56E-09	1.79136E-10	5.18056E-12	6.6444E-12	4.56059E-12	-1.73E-09

En la Tabla 9 se registra cada una de las deformaciones que deben registrar las 16 galgas extensiométricas del bloque principal ante la acción de cada una de las cargas máximas ($F_x=2500\text{N}$, $F_y=2500\text{N}$, $F_z=-4500\text{N}$, $M_x=100\text{Nm}$, $M_y=100\text{Nm}$, $M_z=-100\text{Nm}$). Para registrar cada deformación se simuló la carga en ABAQUS y se hizo el promedio de la deformación de dos elementos nodales contiguos para abarcar toda la longitud activa de una galga igual a 6.5mm.

- **Cálculo de la matriz de calibración**

Para definir la matriz de calibración y la calidad de desacoplamiento del sensor, es necesario detallar cuales son los conjuntos de galgas que conformarían cada uno de los puentes de Wheatstone. Con base en las figuras donde se indican las posiciones de las galgas y en donde se asocia cada galga a un número, se procede a determinar los siguientes arreglos de puentes de Wheatstone:

- Galgas del puente de Wheatstone para medición de Fuerza X: G15, G12.
- Galgas del puente de Wheatstone para medición de Fuerza Y: G13, G10.
- Galgas del puente de Wheatstone para medición de Fuerza Z: G2, G3, G6, G7.
- Galgas del puente de Wheatstone para medición de Momento X: G4, G8
- Galgas del puente de Wheatstone para medición de Momento Y: G1, G5
- Galgas del puente de Wheatstone para medición de Momento Z: G9, G11, G14, G16.

Se entiende que cada galga va a medir una deformación en un eje de interés. Por lo que, para registrar toda la deformación medidas por la acción de una fuerza es necesario realizar una sumatoria de las deformaciones de cada puente de Wheatstone a lo largo del eje considerando la convención de que las galgas que sufren de tensión por acción de una fuerza o momento dan una contribución positiva a la deformación. Por otra parte, las galgas en compresión dan una contribución que debe ser restada de la deformación total a lo largo del eje. En resumen, el vector de deformaciones totales por cada fuerza es el que se presenta a continuación:

$$\vec{D} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{15} - \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} - \varepsilon_{10} \\ \varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \varepsilon_6 - \varepsilon_7 \\ \varepsilon_4 - \varepsilon_8 \\ \varepsilon_1 - \varepsilon_5 \\ \varepsilon_9 - \varepsilon_{11} + \varepsilon_{14} - \varepsilon_{16} \end{bmatrix}$$

Con el vector total de deformaciones, es posible obtener las deformaciones totales en cada uno de los ejes para cada uno de los 6 casos de carga pura ($F_x=2500\text{N}$, $F_y=2500\text{N}$, $F_z=4500\text{N}$, $M_x=100\text{ Nm}$, $M_y=100\text{ Nm}$ y $M_z=100\text{ Nm}$). Con dichos vectores de deformaciones para cada uno de los casos se construye la matriz de deformaciones [S], la cual es una matriz 6x6 de los 6 vectores de deformaciones de cada caso de carga pura concatenados como columnas (Aguirre, Crespo y Molina, 2020). Para calcular la matriz final de deformaciones para el bloque principal del sensor que se obtiene calculando los seis vectores \vec{D} con las deformaciones de cada columna de la tabla de deformaciones (Ver Tabla 9) se ha empleado código de MATLAB cargando como input las deformaciones de la Tabla 9 en un archivo de Microsoft Excel. Empleando el código de MATLAB encontrado en el anexo G se obtuvo la siguiente matriz equivalente de deformaciones [S]:

```
S =
1.0e-07 *
0.031123434186505      0      0      0      0      0
0      0.031123434186505      0      0      0      0
0.003685652029118 -0.003641382800976 0.178808872554891 0.000000000000062 -0.000000000000080 -0.000000000000025
0.000000000000009      0      0      0.050755360328153 -0.000000000000001 0.000000000000019
0      0 -0.000000000000006      0      0.000000000000001 0.050613660119408 -0.000000000000008
0.003582715988592 -0.003582715988592      0 -0.000041676361999 0.000041676361999 0.069250747145478
```

Figura 27. Matriz de deformaciones [S] para el sensor

Con estos cálculos, se muestra en cada columna las deformaciones equivalentes en cada galga para cada caso de fuerza máxima aplicada en cada uno de los seis ejes. Como se observa de la matriz de deformaciones, el presente diseño del sensor cumple con los requerimientos de desacoplamiento debido a que el mayor peso en valores se encuentra en la diagonal de la matriz de deformaciones (Yuan, 2015). Lo cual es un signo directo de desacoplamiento en mediciones

de cargas para el sensor. A su vez, se puede determinar el error en el desacoplamiento de mediciones a través de la siguiente fórmula:

$$CC_{ij} \% = \frac{e_{ij}}{e_{ii}} \times 100\% \text{ (Kang, Lee \& Kim, 2014)}$$

De donde,

$CC_{ij} \%$ es el error porcentual en el acoplamiento al medir cargas (fuerzas o momentos) con el sensor.

e_{ij} es el valor de deformación más alto en una fila sin considerar el valor que se localiza en la diagonal de la matriz

e_{ii} es el valor de deformación que se encuentra en la misma fila que e_{ij} y se localiza en la diagonal de la matriz

Dicha fórmula se aplica para cada fila de la matriz [S] y el resultado más alto que se registre es el que se reconoce como el error de acoplamiento de mediciones de cargas del sensor. Para el presente caso a través de cálculos con dicha fórmula sobre la matriz [S] anteriormente mostrada se encontró que el error de acoplamiento para el sensor es de: 5.17%. El cual es un error considerablemente bajo que valida la efectividad del sensor diseñado en su exactitud al medir fuerzas (Kang, Lee & Kim, 2014).

Posteriormente, una vez definida la matriz total de deformaciones, es necesario encontrar la matriz de calibración para lo cual se debe entender que se debe buscar una matriz la cual relacione a un vector de deformaciones generado a partir de una carga que puede ser aplicada en uno o en varios ejes. Dicha matriz se la conoce como matriz de calibración y la misma relaciona a una carga aplicada \vec{L} (load) con el vector equivalente de deformaciones medidas por las galgas \vec{D} .

$$\vec{L} = [C] \vec{D} \text{ (Yuan et. al, 2015)}$$

De donde,

\vec{L} es el vector de cargas y tiene la forma $\vec{L} = [F_x \ F_y \ F_z \ M_x \ M_y \ M_z]^T$

$[C]$ es la matriz de calibración y es una matriz 6x6 que nos permite relacionar las cargas aplicadas sobre el sensor con las deformaciones totales registradas por las galgas

\vec{D} es el vector de deformaciones cuyo cálculo ya fue anteriormente explicado.

Una vez que se define cual es la función de la matriz de calibración, es necesario definir una manera para encontrarla ya que aquello nos indicará el acoplamiento del sensor y la matriz necesaria para calibrar el funcionamiento de este. Para encontrar dicha matriz se emplea la matriz equivalente de deformaciones $[S]$ y se entiende que dichas deformaciones fueron encontradas para 6 casos individuales en los que se aplicaron cada una de las cargas individuales por lo que se busca relacionar dichas cargas conocidas ubicadas en una matriz $[KL]$ “known loads” con la matriz de deformaciones totales $[S]$ para cada caso a través de la matriz de calibración con la siguiente fórmula:

$$[KL] = [C] [S] \text{ (Aguirre, Crespo y Molina, 2020)}$$

De donde,

$[KL]$ es la matriz de cargas conocidas, la cual es una concatenación de los vectores columna con las cargas máximas empleadas en las 6 simulaciones de ABAQUS con cargas individuales (Yuan et. al, 2015). En este caso, dicha matriz es la siguiente:

$$[KL] = \begin{bmatrix} 2500 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2500 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4500 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}$$

[C] es la matriz de calibración que se busca encontrar (matriz objetivo)

[S] es la matriz equivalente de deformaciones para los 6 casos de carga máxima individual

Realizando algebra de matrices se puede encontrar una fórmula para despejar la matriz de calibración:

$$[KL][S]^{-1} = [C][S][S]^{-1}$$

$$[KL][S]^{-1} = [C] \text{ (Aguirre, Crespo y Molina, 2020)}$$

Para el bloque principal diseñado del sensor con base en las simulaciones efectuadas (método de elementos finitos) se obtiene la siguiente matriz de calibración:

```
>> MatrizCalibracion
MatrizCalibracion =
1.0e+11 *
8.032532608769786      0      0      0      0      0
0      8.032532608769786      0      0      0      0
-0.298023333148122    0.294443705222731    2.516653640114300    -0.0000000000003065    0.0000000000003982    0.0000000000000922
-0.0000000000000050    -0.0000000000000006      0      0.197023524911382    0.0000000000000005    -0.0000000000000054
-0.0000000000000003    0.0000000000000042      0      -0.0000000000000004    0.197575120558519    0.0000000000000024
-0.016622655605936    0.016622655605936      0      0.000118572348818    -0.000118904309133    0.144402774153360
```

Figura 28. Matriz de calibración [C] del sensor de fuerza

Obtenida la matriz de calibración, se puede evaluar la exactitud de esta al relacionar deformaciones registradas cuando otras fuerzas dentro del rango de medición del sensor son aplicadas a manera de estimar el valor que mediría el sensor cuando se aplica cualquier fuerza o momento dentro del rango permisible.

- **Construcción de las líneas de carga en referencia a los resultados de la simulación**

Una vez se haya definido la matriz de calibración para el presente bloque principal del sensor es posible estimar las fuerzas que llegaría a medir nuestro sensor con la presente matriz de calibración, a través del uso de la siguiente ecuación:

$$\vec{L} = [C] \vec{D} \text{ (Yuan et. al, 2015)}$$

De donde,

Se conoce la matriz de calibración $[C]$ que fue anteriormente calculada

\vec{D} es el vector de deformaciones que se construye aplicando una carga cualquiera en el rango de medición de momentos y fuerzas del sensor para cada eje el cual es el siguiente:

- $-2500 \text{ N} \leq F_x \leq 2500 \text{ N}$
- $-2500 \text{ N} \leq F_y \leq 2500 \text{ N}$
- $-4500 \text{ N} \leq F_z \leq 4500 \text{ N}$
- $-100 \text{ Nm} \leq M_x \leq 100 \text{ Nm}$
- $-100 \text{ Nm} \leq M_y \leq 100 \text{ Nm}$
- $-100 \text{ Nm} \leq M_z \leq 100 \text{ Nm}$

Por lo que se puede colocar cualquier carga en la simulación de ABAQUS, obtener las deformaciones en las zonas de las 16 galgas y proceder a construir el vector de deformaciones \vec{D} con la fórmula explicada al inicio de la presente subsección de donde \vec{L} es el resultado estimado de las fuerzas y momentos que mediría el sensor.

Por esta razón se construyen líneas de carga que asocien el valor conocido de fuerza aplicada sobre el bloque principal en cada uno de los seis ejes vs. valor medido por el sensor con base en los resultados de deformaciones producto del método de elementos finitos. En el presente caso se realizan gráficas en las que se divide el rango de medición de cada carga del sensor en 5 subdivisiones (“steps”) y se aplica individualmente cada carga al bloque principal en ABAQUS. Posteriormente se obtienen las deformaciones para cada una de las posiciones de las galgas y se construye el vector de deformaciones el cual al ser multiplicado por la matriz de calibración nos otorgaría las fuerzas y momentos estimados que mediría el sensor en cada

eje, con lo cual se construirían 6 líneas de carga para cada caso de aplicación de fuerza individual para mostrar la línea de carga de la fuerza de interés y a su vez mostrar las líneas de carga en el resto de los ejes. El objetivo es que, si se aplica una carga en, por ejemplo, eje X, el sensor debería medir únicamente fuerza en ese eje y un valor mínimo y despreciable debería ser medido en el resto de los ejes (desacoplamiento) (Kang, Lee & Kim, 2014). A continuación, se muestran las cargas individuales aplicadas para la construcción de líneas de carga para los seis ejes.

Tabla 10. Fuerzas y momentos de simulaciones para creación de líneas de carga

Fuerzas en eje X para líneas de carga (N)	Fuerzas en eje Y para líneas de carga (N)	Fuerzas en eje Z para líneas de carga (N)	Momentos en eje X para líneas de carga (Nm)	Momentos en eje Y para líneas de carga (Nm)	Momentos en eje Z para líneas de carga (Nm)
500	500	900	20	20	20
1000	1000	1800	40	40	40
1500	1500	2700	60	60	60
2000	2000	3600	80	80	80
2500	2500	4500	100	100	100

Cada una de las cinco cargas mostradas en cada eje fue aplicada en simulaciones individuales (total de 30 simulaciones) de las cuales como resultado se obtuvo las deformaciones en cada posición de las galgas para construir el vector de deformaciones y con aquellos vectores multiplicados por la matriz de calibración [C] obtener la fuerza estimada que mediría el sensor el cual sería el valor para registrar en el eje “y” en las líneas carga. En resumen, a continuación, con la metodología mencionada se construyeron las siguientes líneas

de carga para cada uno de los 6 ejes de medición (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z) (Yuan et. al, 2015).

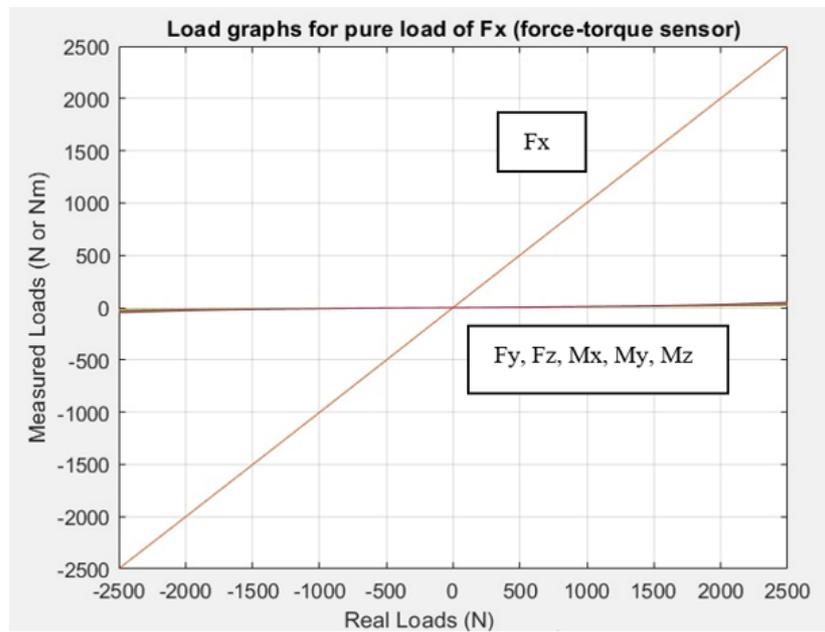


Figura 29. Líneas de carga para la fuerza X sobre el bloque principal del sensor

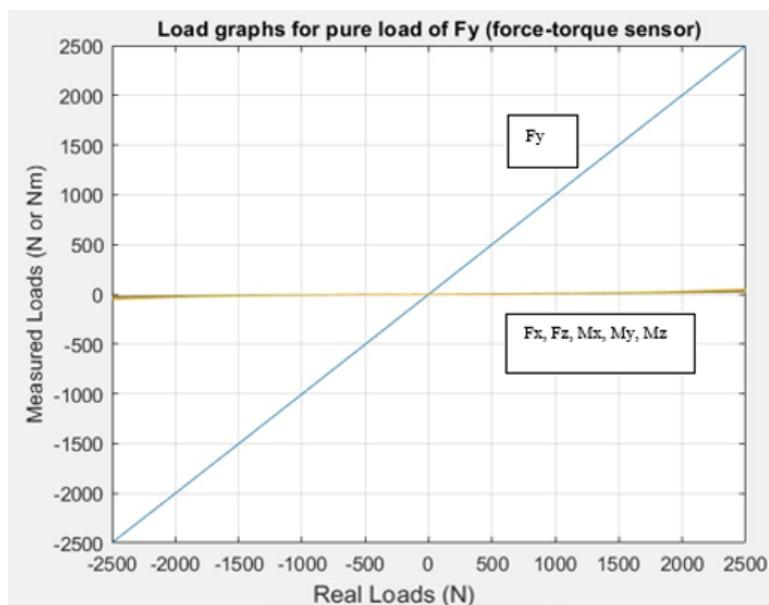


Figura 30. Líneas de carga para la única aplicación de Fuerza Y sobre el bloque principal del sensor

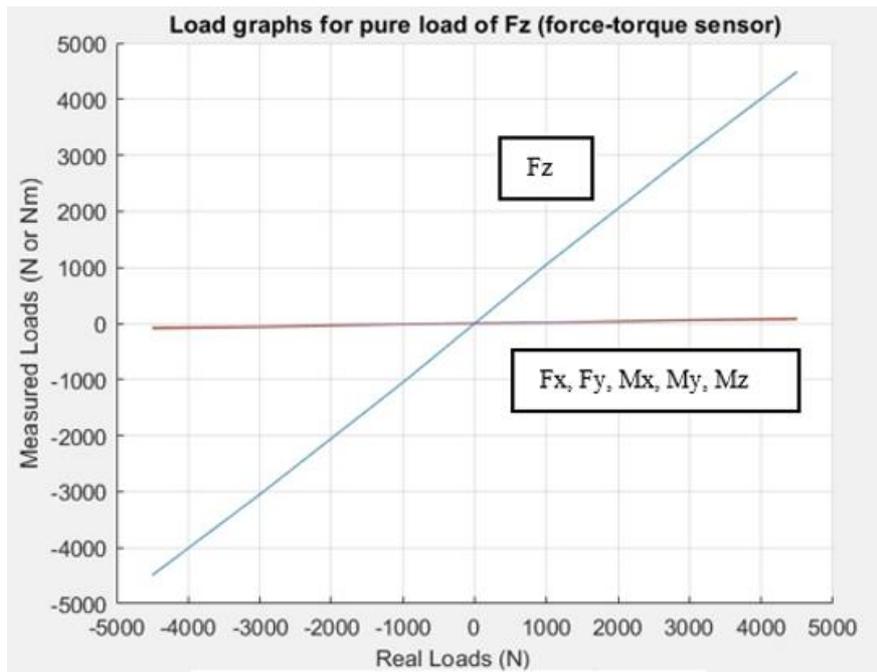


Figura 31. Líneas de carga para la única aplicación de Fuerza Z sobre el bloque principal del sensor

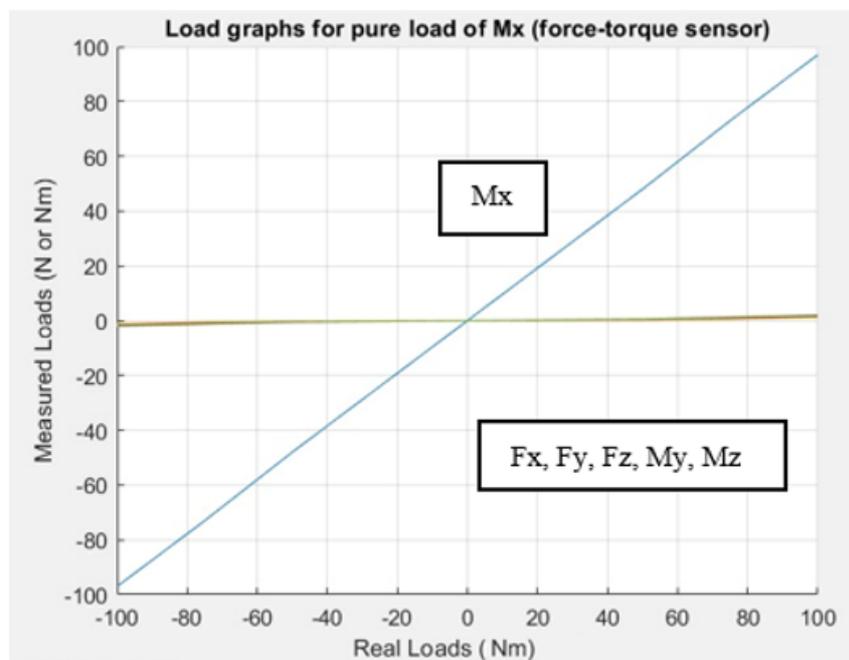


Figura 32. Líneas de carga para la única aplicación de momento X sobre el bloque principal del sensor

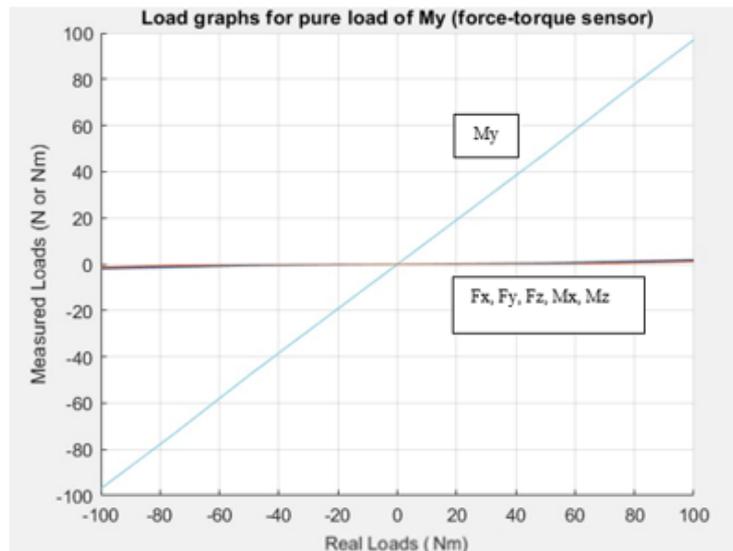


Figura 33. Líneas de carga para la aplicación única de momento Y sobre el bloque principal del sensor

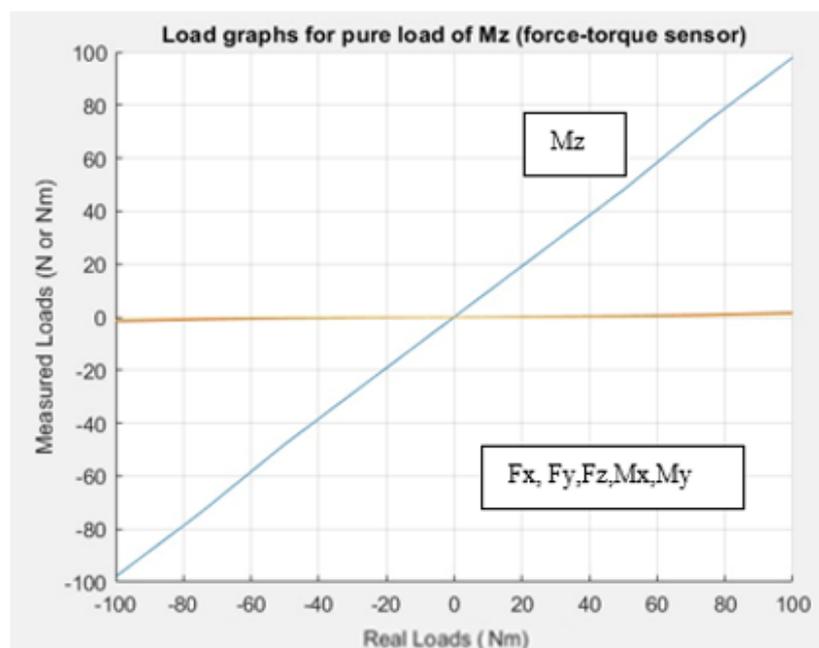


Figura 34. Líneas de carga para la única aplicación de momento Z sobre el bloque principal del sensor

A partir de todas las gráficas observadas para líneas de carga creadas para cada caso de carga individual se observa claramente que con la matriz de calibración multiplicada por el

vector de deformaciones definido a través de los resultados de cada simulación con los valores de las cargas de la Tabla 10. se logra obtener una calibración total para el sensor el cual registra únicamente la fuerza de interés y se registran fuerzas nulas en el resto de los ejes lo cual es observado para los seis ejes (F_x , F_y , F_z , M_x , M_y , M_z). En los gráficos se aprecian líneas de carga para cada eje en cada caso de carga individual y se estandariza el comportamiento de que la fuerza o momento aplicado es lo único registrado por el sensor al tener el resto de las fuerzas y momentos unas líneas de carga planas con valor muy cercano al nulo como medición registrada.

Por ende, se ha podido desacoplar la medición de cargas en el presente sensor tal como sugieren las líneas de carga construidas con base en los resultados de las simulaciones de elementos finitos. El saber que el sensor si puede ser calibrado permite proseguir con su manufactura.

2.5. Plan de manufactura

Para el plan de manufactura del sensor es necesario considerar los procesos y materiales involucrados en cada uno de los componentes del sensor de fuerza los cuales son: bloque principal, carcasa base y plataforma. A continuación, se muestran los diagramas de procesos para cada componente con su respectiva explicación. Cabe destacar que la selección de los procesos de manufactura se basó en la lectura de “Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems” (Groover,2018)

- Diagrama de procesos del bloque principal del sensor

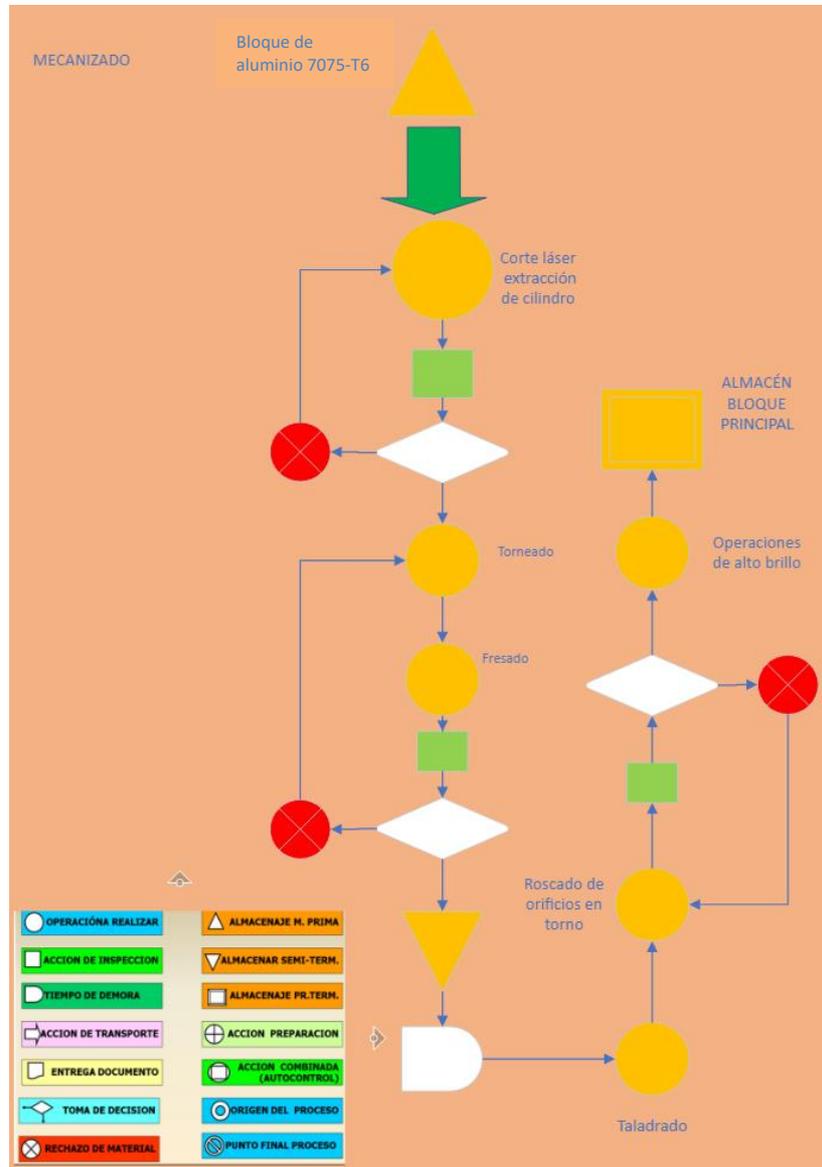


Figura 35. Diagrama de procesos del bloque principal del sensor

Se identifican procesos de mecanizado para transformar un bloque de aluminio 7075-T6 hasta el bloque cilíndrico principal del sensor con diámetro de 15 cm y altura de 5 cm. Se emplean procesos de corte láser, torneado, fresado, taladrado, roscado y mejora visual del componente a manera de obtener el componente deseado con las dimensiones exactas definidas

bajo simulaciones para funcionar acorde a lo calculado en la matriz de calibración (Akbari & Kazerooni,2018).

- **Diagrama de procesos de la carcasa base**

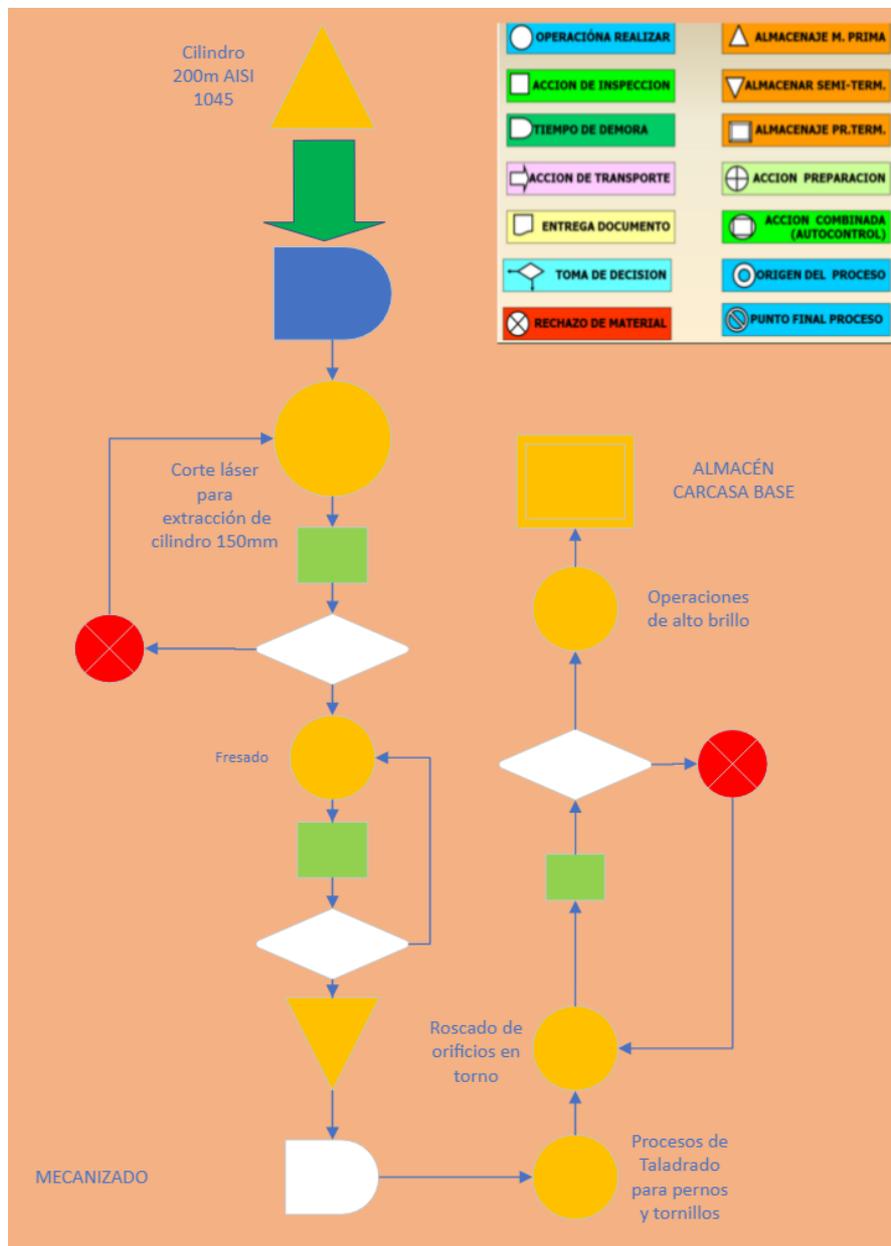


Figura 36. Diagrama de procesos de la carcasa base del sensor

Para la carcasa base se inicia con un cilindro de acero AISI 1045 de 3 cm de grosor. Dicho cilindro se maquina mediante procesos de: corte láser, fresado, taladrado, roscado y mejora visual del componente. Se busca obtener una carcasa que se pueda unir con el bloque

principal y en donde se pueda colocar los componentes electrónicos del circuito del sensor.

- **Diagrama de procesos de la plataforma**

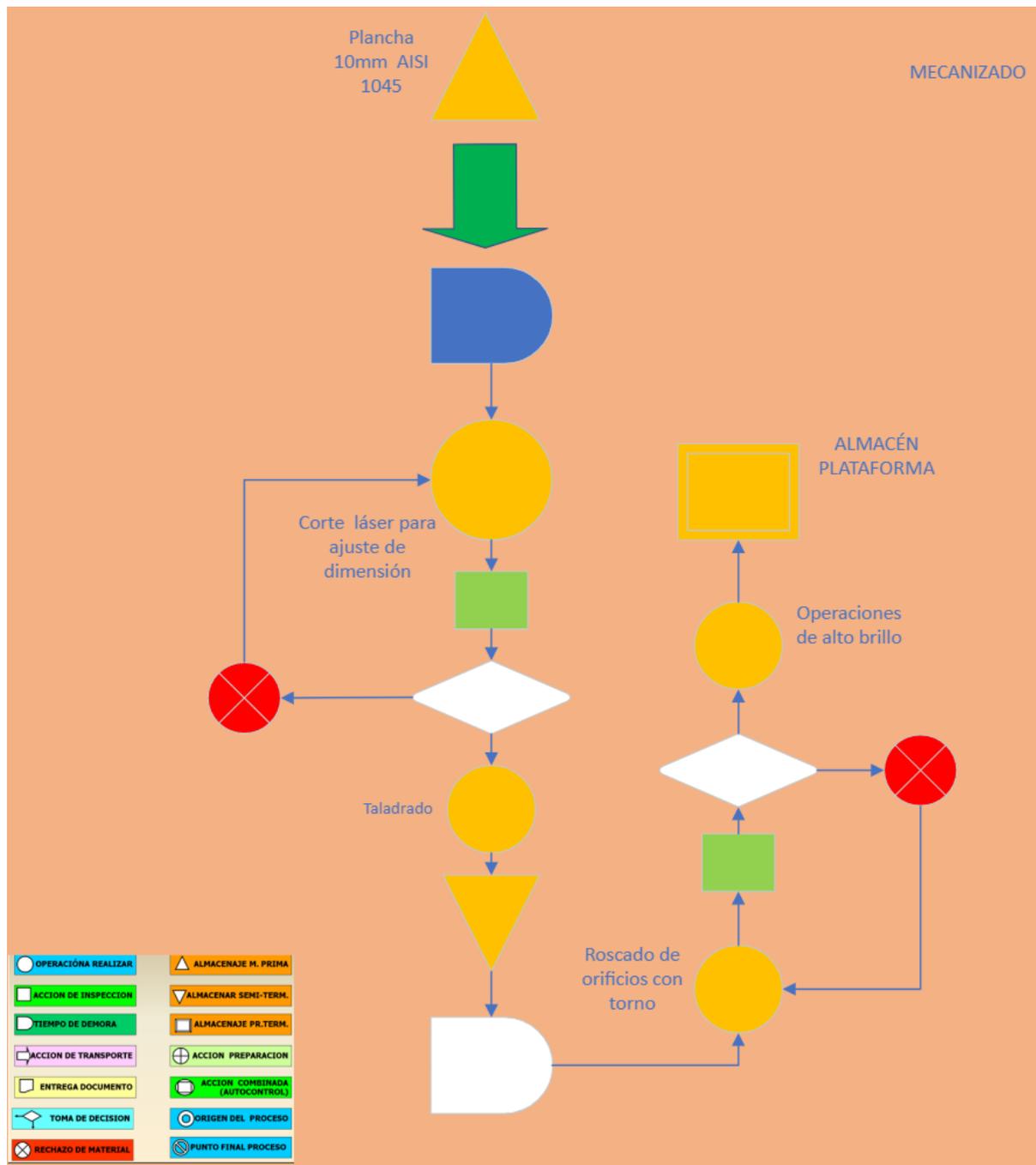


Figura 37. Diagrama de procesos de la plataforma del sensor

Para el caso de la plataforma del sensor para su manufactura se empieza con una plancha de acero de grosor de 1cm como materia prima. Sobre dicha plancha se emplea un proceso de corte por láser para ajustar dimensiones de 27cm x 27cm como área frontal para la plataforma. Luego se efectúan procesos de taladrado y roscado. Con aquellas operaciones se tiene lista la plataforma deseada sobre la cual se procede con operaciones de alto brillo para mejorar la apariencia visual de la plataforma la cual finalmente es almacenada.

- **Diagrama de procesos del ensamble del sensor de fuerza-torque**

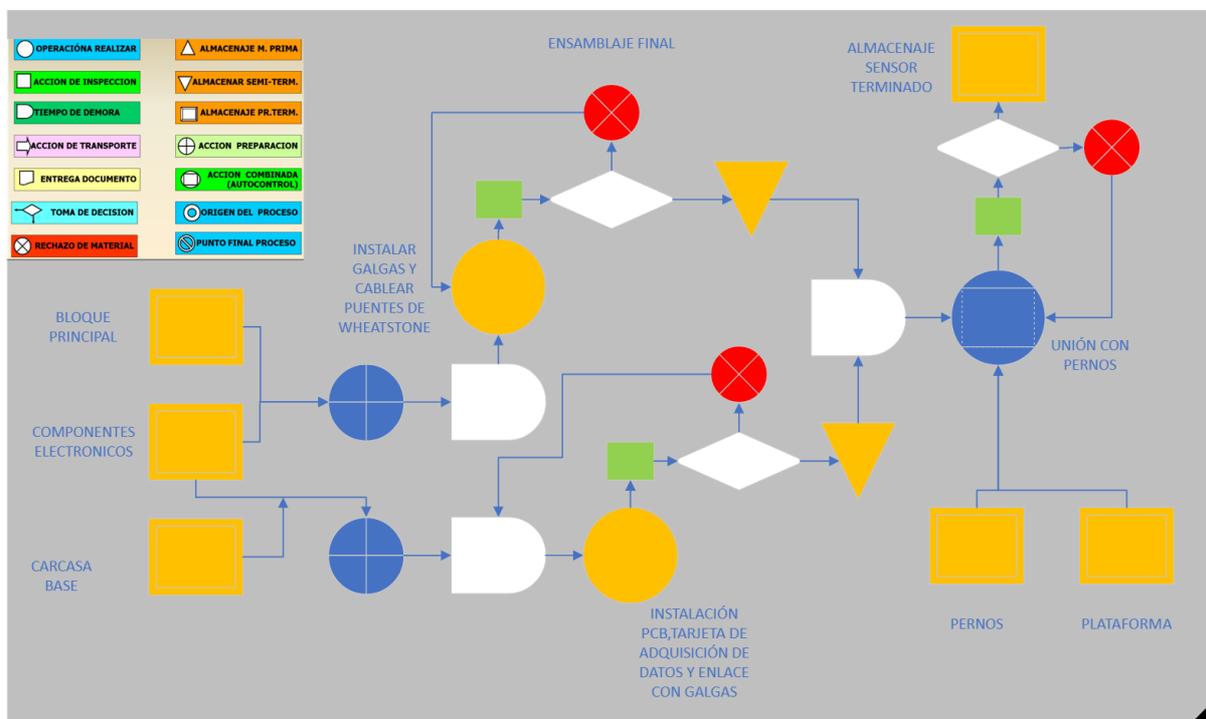


Figura 38. Diagrama de procesos para el ensamble del sensor de fuerza-torque

Para el ensamble del sensor de fuerza-torque se tiene determinados componentes almacenados, los cuales son: bloque principal, plataforma, carcasa base, componentes electrónicos y pernos. Inicialmente, se toma un bloque principal y 16 galgas extensiométricas y se instala las galgas en las posiciones definidas en el sensor de fuerza con el uso de adhesivo y se arman los puentes de Wheatstone con el uso de cables y resistencias eléctricas dadas por potenciómetros configurados (únicamente para semi-puentes) (Idrovo & Quintanilla, 2010). Simultáneamente, se toma la carcasa base y sobre el espacio vacío de la misma se procede a

instalar la placa electrónica con el uso de tornillos (PCB), enlace con tarjeta de adquisición de datos, fijación de la fuente de voltaje (batería) de 9V y enlace del circuito con los puentes de Wheatstone, tras lo cual se tiene un total ensamblaje del circuito electrónico para el funcionamiento del sensor de fuerza. Luego, se realiza el ensamblaje entre la carcasa base, el bloque principal y la plataforma con el uso de los pernos y platinas para obtener el sensor finalmente ensamblado, el cual es inspeccionado manualmente para verificar que se hayan efectuado uniones fijas con los pernos. El sensor posteriormente para su uso debe ser fijado al suelo con el uso de pernos M5x0.8 para tener una estructura fija y cumplir con la condición de contorno de que el anillo exterior del sensor debe encontrarse empotrado al piso (Yuan et. al, 2015).

2.6.Hojas de procesos

Para definir cómo se va a realizar la manufactura del sensor es vital desarrollar hojas de procesos para cada componente las cuales cumplen con la función de definir de manera simplificada como llevar a cabo las tareas de maquinado para cada uno de los componentes dando un mayor detalle de los procesos involucrados de tal forma que se puedan replicar la manufactura. En los Anexos C, D, E, F se puede visualizar las hojas de proceso generadas para el bloque principal, plataforma, carcasa base y platinas de unión en forma de “L”.

2.7.Planos de los componentes principales

A su vez, dentro del plan de manufactura es necesario tener planos de los componentes principales para detallar su geometría en vías a que los mismos puedan ser fabricados con las medidas, tolerancias y calidades respectivas. Para el presente caso, los planos se pueden observar en los siguientes anexos: plano del bloque principal del sensor (Anexo I), plano de la plataforma superior (Anexo J), plano de la carcasa inferior (Anexo K), plano de las platinas de

unión (Anexo L) y plano de conjunto del sensor fuerza-momento (Anexo M).

3. Resultados y discusiones

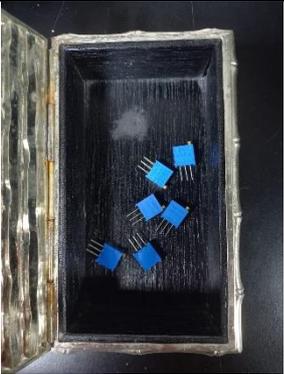
3.1. Reporte del diseño

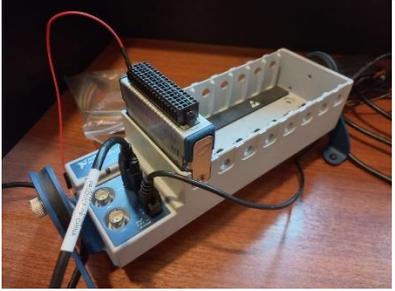
En el presente caso, para la construcción del prototipo del sensor de fuerza-torque se elaboró únicamente la plataforma y el bloque principal del sensor por cuestiones de presupuesto y se ha instalado el circuito correspondiente. Para el reporte es necesario mostrar en resumen cuales son los componentes del primer prototipo del sensor de fuerza/torque y sus respectivas dimensiones, lo cual se muestra directamente en las siguientes tablas.

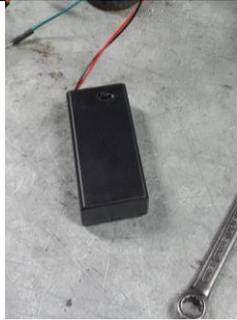
Tabla 11. Reporte de componentes empleados en la construcción del sensor de fuerza-torque

Componente	Descripción	Foto
Galga extensiométrica SGD-7/350-LY41 de OMEGA “Engineering”	Se toman 16 galgas extensiométricas de 350 ohmios de resistencia nominal que son elaboradas de un material piezoresistivo de tal forma que su resistencia se modifica cuando se produce una deformación en el material	
Bloque principal del sensor	Bloque de aluminio 7075-T6 con un centro cúbico, cuatro vigas y un anillo exterior cilíndrico con paredes finas de apoyo para las vigas. Maquinado principalmente con procesos CNC por taller “Manufactura CNC” acorde	

	al diseño simulado e indicado en el plano del anexo I.	
Plataforma	Plataforma de acero AISI 1045 en donde se aplicará la fuerza/momento que se transmitirá directamente hacia el centro cúbico del sensor. Para los procesos de maquinado requeridos revisar el diagrama de procesos asociado.	
Pernos M5	Se emplean pernos M5 elaborados de acero inoxidable y de varias longitudes para realizar el ensamblaje de los componentes del sensor	
Tuercas M5	Se emplean tuercas estandarizadas para las uniones con los pernos entre componentes del sensor	
Arandelas M5	Se emplean arandelas estandarizadas para las uniones con los pernos entre componentes del sensor	
Kit OMEGA de instalación de galgas	Kit de pegamentos y sustancias de limpieza para instalación de galgas extensiométricas en superficies metálicas, compuesto por sustancias empleadas en la instalación de galgas	

	<p>en metal como: resina, “hardener”, “conditioner”, “neutralizer”, acetona, entre otras sustancias.</p>	
<p>Cables de conexión de circuito tipo “jumper”</p>	<p>Cables convencionales de conexión para protoboard para el establecimiento del circuito</p>	
<p>“Protoboard”</p>	<p>Placa de pruebas para el circuito electrónica. Se emplean seis de los mismos para realizar las conexiones de un puente de Wheatstone en cada “protoboard” a manera de mejorar la organización del circuito de prueba</p>	
<p>Potenciómetros de precisión</p>	<p>Se tienen 8 de los presentes potenciómetros para otorgar una resistencia fija de 350 Ohmios para los semi-puentes de Wheatstone</p>	

Cautín y estaño	Material empleado para soldar cables a los terminales de las galgas extensiométricas	
DAQ y Tarjeta de Adquisición de Datos de “National Instruments” para usar con galgas extensiométricas	Sistema de adquisición de datos y tarjeta de adquisición de datos para lectura en tiempo real de voltajes de salida de cada uno de los puentes de Wheatstone en tiempo real con el uso de software.	
Multímetro	Instrumento empleado para verificación de continuidad en los circuitos de los puentes de Wheatstone	
Lija	Lija de grosor de 220 Grits para lijar la superficie de las vigas de aluminio 7075-T6 en la zona donde se procederá a posicionar cada galga	
Algodón	Posee la utilidad de limpieza y aplicación de sustancias del kit OMEGA usadas para la limpieza y mejora de la superficie de las vigas	

	antes de pegar cada galga.	
Batería de 9V	Fuente de voltaje para alimentación del circuito del sensor.	
Cinta Aislante	Cinta empleada para ajustar uniones entre cables	
Calibrador	Instrumento empleado en mediciones para la aplicación de galgas extensiométricas en posición exacta a la simulada en ABAQUS	
Platina con perforaciones	Barra de acero empleada para realizar un brazo de palanca para carga de momentos sobre el bloque principal en prueba de funcionamiento del sensor.	

Discos de Pesas para carga	Discos de pesas de empleados en la carga del bloque principal para pruebas de funcionamiento del sensor	
Plato para asentamiento de peso	Sistema de plato más cuerda para colocar peso y de esa manera realizar la prueba de funcionamiento del sensor cargando el mismo en los diferentes ejes.	
Cuerda de tensar	Cuerda empleada para sujetar el plato de asentamiento y soportar el peso generado por la colocación de discos de pesas.	
Tornillo de banco	Sistema para fijar totalmente el bloque principal del sensor a manera de que el mismo cumpla con la condición de empotramiento y se lo pueda cargar con fuerzas y momentos en la experimentación	

En el reporte de diseño del sensor es necesario definir las dimensiones de determinados componentes empleados. Lo cual se resume a continuación a manera de dar un mayor detalle de cada componente.

Tabla 12. Dimensiones de principales componentes del sensor de fuerza/torque

Componente	Dimensiones
Plataforma	Altura: 27cm Base: 27cm Grosor: 1cm
Bloque principal	Diámetro: 15cm Altura: 5cm Base de la viga: 8mm Grosor de la pared de apoyo para las vigas: 2mm Altura de la viga: 10mm
Galga extensiométrica SGD-7/350-LY41 OMEGA “Engineering” (Ver Anexo O)	Longitud activa: 6.5 mm Ancho activo de la rejilla: 3.1 mm Longitud total de la galga: 11.40 mm Ancho total de la galga: 5.1 mm

Dichos componentes son los principales del sensor de fuerza-torque y su uso corresponde a los requerimientos del presente sensor por lo que para diseño de sensores de fuerza con especificaciones técnicas y requerimientos diferentes es necesario realizar estudios para seleccionar los componentes adecuados

Una vez especificados los componentes y sus dimensiones es necesario detallar la construcción del prototipo que se emplea en el experimento ingenieril de verificación. Los procesos de la construcción son los que indican a continuación.

3.2. Construcción del prototipo del sensor de fuerza/momento

- **Proceso de soldadura con cautín en galgas extensiométricas**

En el presente caso, se ha requerido soldar las terminales de las galgas extensiométricas a cables para de esa manera establecer una conexión entre extremos de la galga que pueda ser acoplada a una rama de un puente de Wheatstone. Para el proceso se empleó soldadura por estaño para establecer cuidadosamente una conexión entre cada terminal con un diferente cable. Una vez se haya establecido dicha conexión se utiliza un multímetro y se mide la resistencia entre los extremos de cada uno de los cables delgados soldados a los terminales de la galga extensiométrica para verificar que se mida una resistencia nominal de 350 Ohmios, si se comprueba dicha resistencia con el multímetro se valida que la soldadura fue correctamente efectuada. A continuación, se muestra una fotografía de una galga extensiométrica ya con sus terminales soldados.

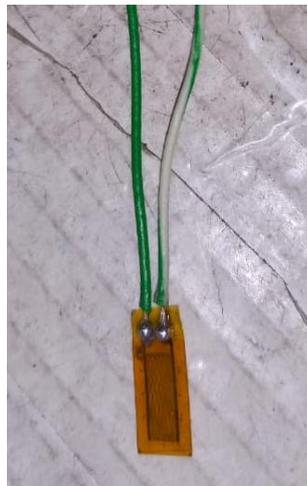


Figura 39. Galga extensiométrica con cables soldados en cada terminal

- **Ensamble de galgas extensiométricas a las vigas del bloque principal**

Para el proceso de pegado de la galga extensiométrica a las vigas del bloque principal del sensor en las posiciones anteriormente definidas con una distancia de 5 mm desde la unión

entre cada viga y el cubo es necesario seguir un proceso meticuloso empleando el Kit OMEGA para instalación de galgas extensiométricas. En primer lugar, se emplea acetona del kit para limpiar la superficie de cada viga. A continuación, se procede a lijar la superficie para luego eliminar residuos de la superficie con el uso de alcohol. Luego, se emplea la solución llamada “conditioner” la cual es una solución ácida para limpieza de la superficie y tras la aplicación de esta se procede a lijar de nuevo la superficie. Posteriormente, se emplea la solución de “neutralizer” del kit para terminar con la limpieza de la superficie y se procede a limpiar el remanente de sustancias de limpieza del kit con el uso de algodón. Una vez se encuentre limpia y lisa la superficie donde se vaya a instalar la galga se procede a emplear el pegamento del kit que se compone de resina más “hardener” con el uso de una brocha pequeña y sobre dicha zona se pega la galga, la cual finalmente se deja secar por 24 horas para asegurar que quede fija en la estructura (OMEGA Engineering, 2018). A continuación, se muestra una galga ensamblada en una viga.

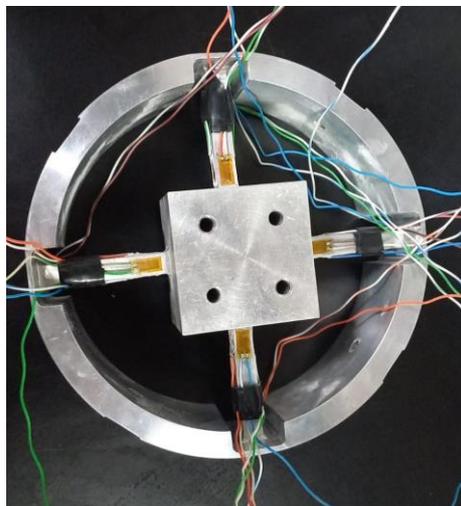


Figura 40. Galgas extensiométricas ensamblada en bloque principal

- **Cableado de Puentes de Wheatstone**

Una vez se hayan pegado las 16 galgas extensiométricas en los lugares definidos con anterioridad a través de las simulaciones se pueden cablear los puentes de Wheatstone para lo cual en el presente caso se ha empleado un “proto-board” para conexiones de prueba, cables

tipo “jumper” y potenciómetros con resistencias eléctricas de 350 Ohmios. Como voltaje de alimentación en el presente caso para la prueba del sensor se emplea un Arduino Uno con una salida de 5V. Una vez se disponen de aquellos componentes se conecta en primer lugar de manera individual cada puente tal como se establece en el circuito electrónico del sensor y una vez conectado cada uno de los dos puentes completos empleados en medición de fuerza “Z” y momento “Z” y cada uno de los dos semi-puentes empleados en la medición de valores en los ejes restantes es necesario colocar todos los puentes de Wheatstone en paralelo teniendo los mismos una alimentación constante de 5V. Luego se verifican que las conexiones se hayan efectuado de manera correcta con el uso de un multímetro midiendo continuidad en el circuito y voltaje. Se emplean seis “protoboards” para realizar las conexiones de cada uno de los seis puentes de Wheatstone de manera individual. A continuación, se muestra un puente de Wheatstone ensamblado en el bloque principal del sensor de fuerza/torque con el uso de un “protoboard” para conexiones adicionales.

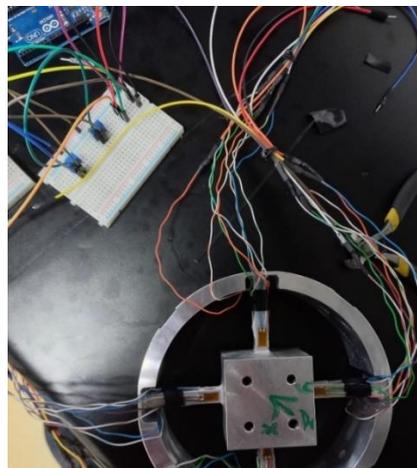


Figura 41. Puente de Wheatstone completamente cableado

Una vez se ha cableado los seis puentes de Wheatstone se tiene finalizado el prototipo del sensor. A continuación, se muestra el bloque principal del sensor ensamblado con la plataforma junto a los seis puentes de Wheatstone para medir cargas en cada uno de los seis grados de libertad.

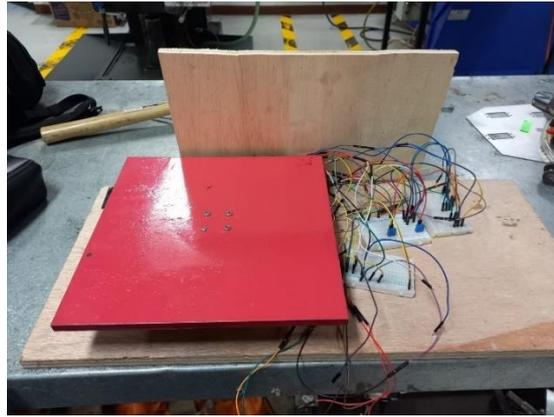


Figura 42. Prototipo del sensor de fuerza/momento construido

Una vez se completaron los pasos anteriormente detallados se posee el prototipo necesario para poder realizar ensayos de evaluación de funcionamiento del sensor de fuerza-torque.

3.3.Construcción del sistema de carga de fuerzas y momentos

Para realizar las pruebas de funcionamiento del prototipo del sensor es necesario cargar el mismo con fuerzas y momentos en los seis grados de libertad para posteriormente usar el sensor y registrar los voltajes de salida de cada uno de los puentes de Wheatstone de tal forma que con dichos voltajes de salida se pueda realizar la calibración del prototipo del sensor. Para cargar fuerza “Z” sobre el sensor únicamente se coloca discos de pesas sobre el sensor. Por otro lado, para la carga de fuerzas y momentos en el resto de los ejes se emplea sistemas de carga creados con los siguientes procesos. A continuación, se muestran las tareas llevadas a cabo en la construcción.

- **Perforación de agujeros en platina para carga de momentos**

Se ha decidido realizar una platina de 30cm de longitud emperrada con el cubo del

bloque principal del sensor para realizar una aplicación de momentos en las pruebas de funcionamiento del sensor a través de la sujeción de discos de pesas de masa conocida en el extremo de la platina para de esa manera generar un momento conocido sobre el bloque principal del dado por la multiplicación de la fuerza (masa de la pesa multiplicada por la gravedad= 9.81 m/s^2) y el brazo de palanca= 37.5 cm (distancia del extremo de la platina hasta el eje central del cubo del bloque principal del sensor). Para construir dicha platina se realizaron perforaciones con taladro de mesa empleando una broca M5 para pasar pernos por dichas perforaciones y unir la platina al cubo del bloque principal del sensor. La realización de las perforaciones se muestra a continuación:



Figura 43. Perforación de agujeros en platina para carga de momentos sobre el sensor

- **Realización del sistema de plato en forma de disco y cuerda de tensar para sujeción de peso**

Por otro lado, se decidió realizar un sistema en el que se usa el plato en forma de disco con la cuerda de tensar para emplear dicho sistema en los procesos de carga en los diferentes ejes. Para cargar fuerzas y momentos es necesario crear el presente sistema en el que se sujeta una cuerda de acero de tensar al plato en forma de disco para formar el sistema que se muestra a continuación:



Figura 44. Sistema de plato de disco y cuerda de tensión

3.4. Análisis de ingeniería

Todos los cálculos y simulaciones realizados durante el proyecto se encuentran detallados en las secciones 2.3 y 2.4.

3.5. Experimento ingenieril de verificación

En el presente caso, el experimento se encuentra diseñado para la verificación de funcionamiento del sensor mediante el proceso de carga con fuerza y momentos en los seis grados de libertad para posteriormente medir voltajes de salida amplificados de cada puente de Wheatstone y registrar los mismos para cada proceso de carga uniaxial a través del uso del software MATLAB en enlace con la tarjeta de adquisición de datos NI9205. Para poder realizar el proceso de aplicación de fuerza y momentos conocidos se usa el siguiente marco de referencia:

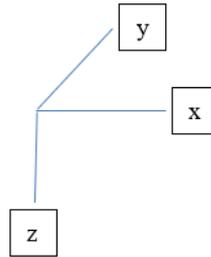


Figura 45. Marco de referencia para la carga de fuerzas y momentos en el sensor

Con base en dicho marco de referencia para las cargas se procede con la descripción de la aplicación de las fuerzas y momentos en cada eje para el experimento. Además, es necesario tener un método de empotramiento (fijación) del anillo exterior del bloque principal del sensor antes de proceder a realizar determinadas cargas sobre el cubo central del sensor de tal forma que únicamente sea móvil el cubo central y las vigas. Para el sensor diseñado se planteó el uso del tornillo de banco para la fijación del bloque principal del sensor.

- Proceso de carga con Fuerza “Z”

Para el proceso de carga con fuerza a lo largo del eje “Z” únicamente se colocan discos de pesas de valores conocidos sobre el cubo central mientras el anillo exterior del bloque principal del sensor se encuentra fijado con ayuda del tornillo de banco. El proceso de carga se puede visualizar en la siguiente figura:



Figura 46. Sensor posicionado para carga de fuerza “Z”

- Proceso de carga con Fuerza “X”

Para el proceso de carga con fuerza a lo largo del eje “X” se emplea la platina de acero con perforaciones y se ajusta dicha platina al bloque principal del sensor a través del uso de pernos, tuercas y arandelas. Posteriormente, se ancla el bloque principal del sensor en el tornillo de banco de tal manera que se pueda ejercer una fuerza a lo largo del eje “X” tal como se muestra a continuación:



Figura 47. Sensor posicionado para carga de fuerza “X”

- Proceso de carga con Fuerza “Y”

Para efectuar la carga de fuerza a lo largo del eje “Y” se emplea el mismo concepto utilizado para la aplicación de fuerza a lo largo del eje “X” tal como se muestra a continuación en la figura:



Figura 48. Sensor posicionado para carga de fuerza “Y”

- Proceso de carga con Momento “X”

El proceso de carga con momento “X” se efectúa con el uso de la platina de acero con perforaciones la cual se une al bloque principal con el uso de pernos, tuercas y arandelas para posteriormente fijar el bloque principal con el uso del tornillo de banco y realizar la carga de fuerza en el extremo de la platina con el uso del sistema de plato de disco y cuerda de tensar de tal manera que se pueda generar un momento en el eje “X”.



Figura 49. Sensor ubicado para generar momento “X”

- Proceso de carga con Momento “Y”

El proceso de carga para ejercer momento a lo largo del eje “Y” es idéntico al sistema empleado para generar momento en el eje “X” solo se reubica la platina de tal forma que se pueda generar el momento deseado tal como se muestra a continuación:



Figura 50. Sensor ubicado para generar momento “Y”

- Proceso de carga con Momento “Z”

El método empleado para generar momento en el eje “Z” consiste en transformar una fuerza vertical a lo largo del eje “Z” en una fuerza horizontal que permita generar el momento deseado. En el presente caso dicho sistema consiste en el uso de la platina unida al bloque principal del sensor el cual se encuentra totalmente fijado con el uso del tornillo de banco. Posteriormente la cuerda de tensar se enrolla en un punto de apoyo de tal manera que se pueda colocar el sistema de plato de disco y cuerda de tensar de forma vertical y al colocar discos de pesas el sistema terminaría generando un momento a lo largo del eje “Z” tal como se muestra en la siguiente figura:



Figura 51. Sensor ubicado para generar momento “Z”

Definido los métodos para realizar los procesos de carga sobre el sensor en los seis grados de libertad es necesario definir que al finalizar cada carga con determinada fuerza o momento se va a emplear el multímetro para registrar los voltajes de salida de cada puente de Wheatstone y realizar con dichos voltajes los gráficos de carga de tal forma que se pueda

visualizar si el sensor se encuentra totalmente funcional en razón de que en cada proceso de carga pura con una fuerza o momento conocido el único puente de Wheatstone que debe registrar una variación de voltaje es el puente de Wheatstone asociado con la medición de carga en el eje deseado. Para conocer la carga aplicada se multiplica la masa de cada disco de pesa por la gravedad para el caso de las fuerzas y se multiplica la masa de cada disco por la gravedad por el brazo de palanca (37.5 cm) para el caso de los momentos. A su vez, se emplea la tarjeta de adquisición de datos y el DAQ para visualizar en tiempo real la señal de salida de cada puente de Wheatstone en el software MATLAB.

3.6. Test de prototipo

Para el testeo del prototipo se proceden a realizar gráficos de carga que relacionen la fuerza o momento conocido que se ha colocado en cada uno de los seis grados de libertad con la variación de voltaje de salida de cada puente de Wheatstone en relación al voltaje de salida de cada puente de Wheatstone cuando no se ha aplicada ninguna carga sobre el sensor. En este caso los voltajes de salida de cada uno de los seis puentes de Wheatstone se registran a través del uso de multímetro en razón de que cuando se decidió medir la señal de salida de voltaje en tiempo real mediante el uso de la tarjeta de adquisición de datos enlazada con el software MATLAB se obtuvo como resultado una señal con ruido la cual debería ser filtrada a través del diseño de un filtro de paso alto y paso bajo. Cabe destacar que la señal de salida de los puentes de Wheatstone actualmente se encuentra en el rango de los milivoltios. A continuación, se muestran los gráficos de cargas realizadas en los distintos ejes que indican la relación entre la carga real aplicada y la variación de voltaje de salida de cada uno de los seis puentes de Wheatstone en relación al voltaje inicial de salida de cada puente cuando no hay ninguna carga aplicada sobre el bloque principal del sensor.

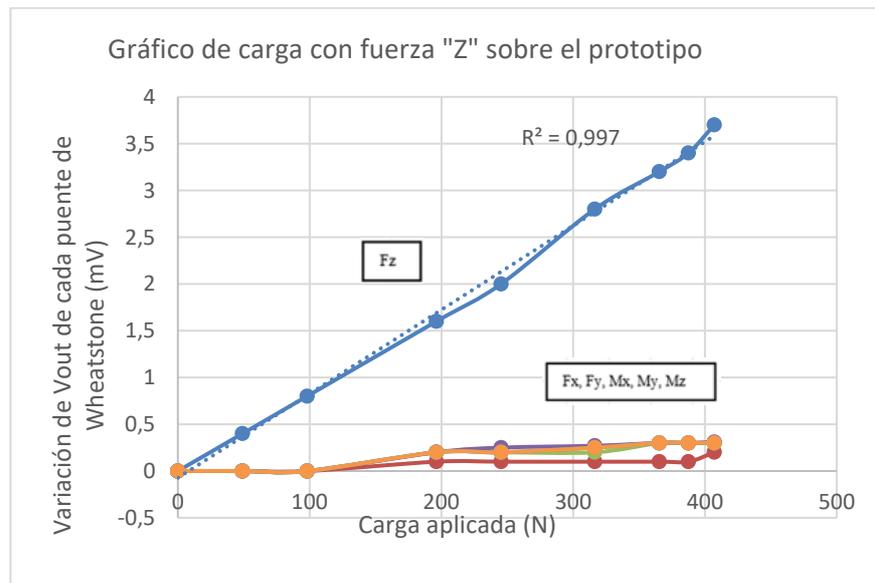


Figura 52. Líneas de carga con relación a la variación de voltaje para la aplicación de fuerza
"Z" pura

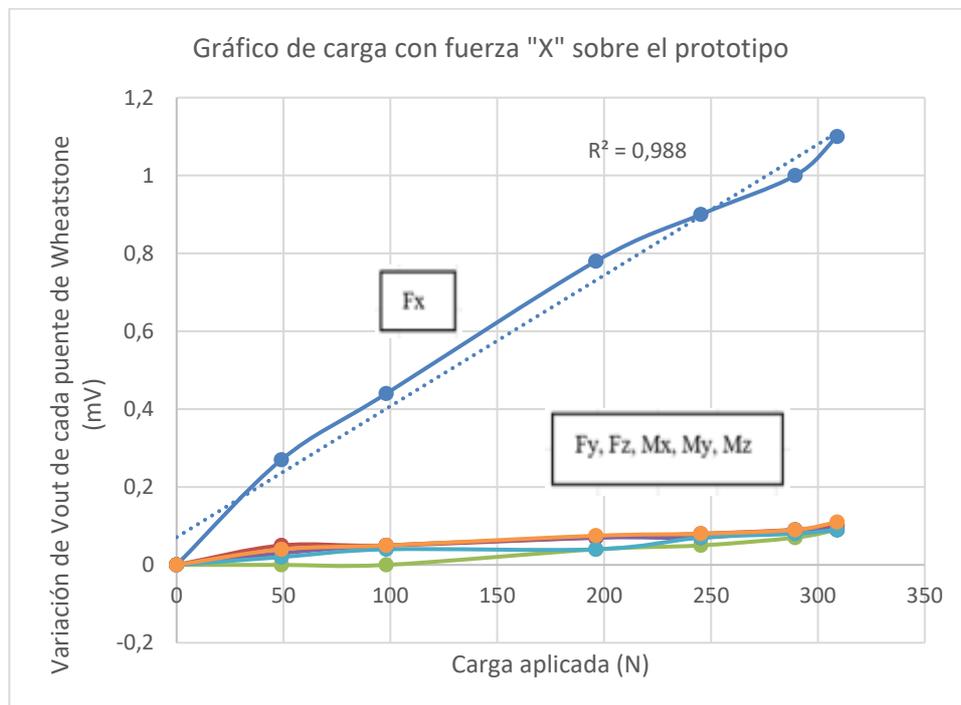


Figura 53. Líneas de carga con relación a la variación de voltaje para la aplicación de fuerza
"X" pura

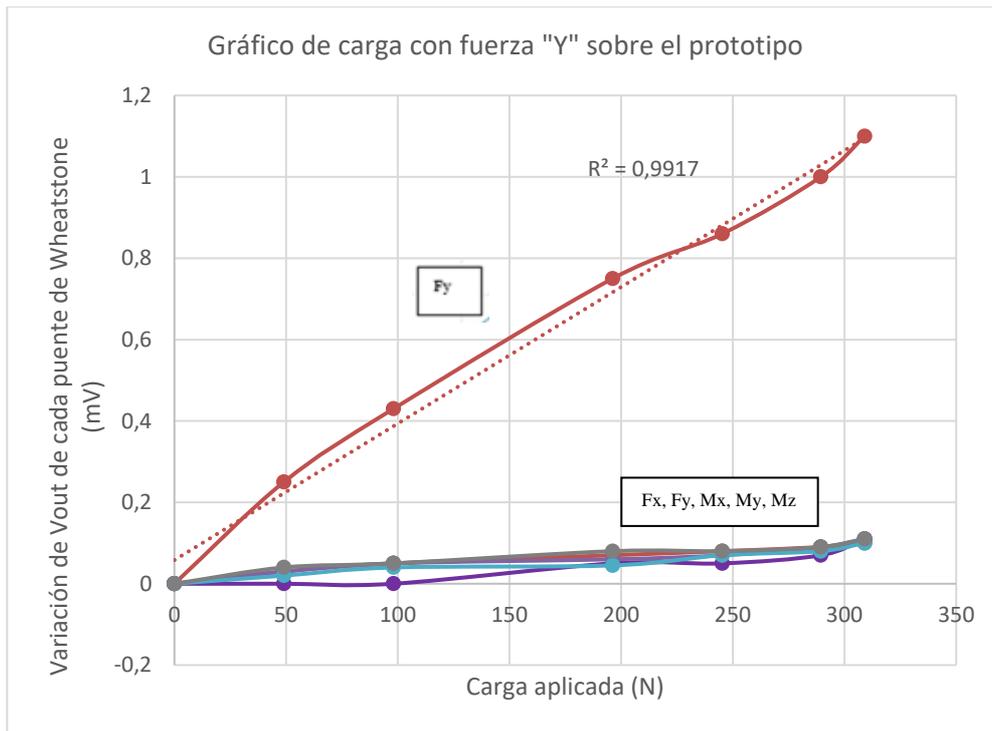


Figura 54. Líneas de carga con relación a la variación de voltaje para la aplicación de fuerza "Y" pura

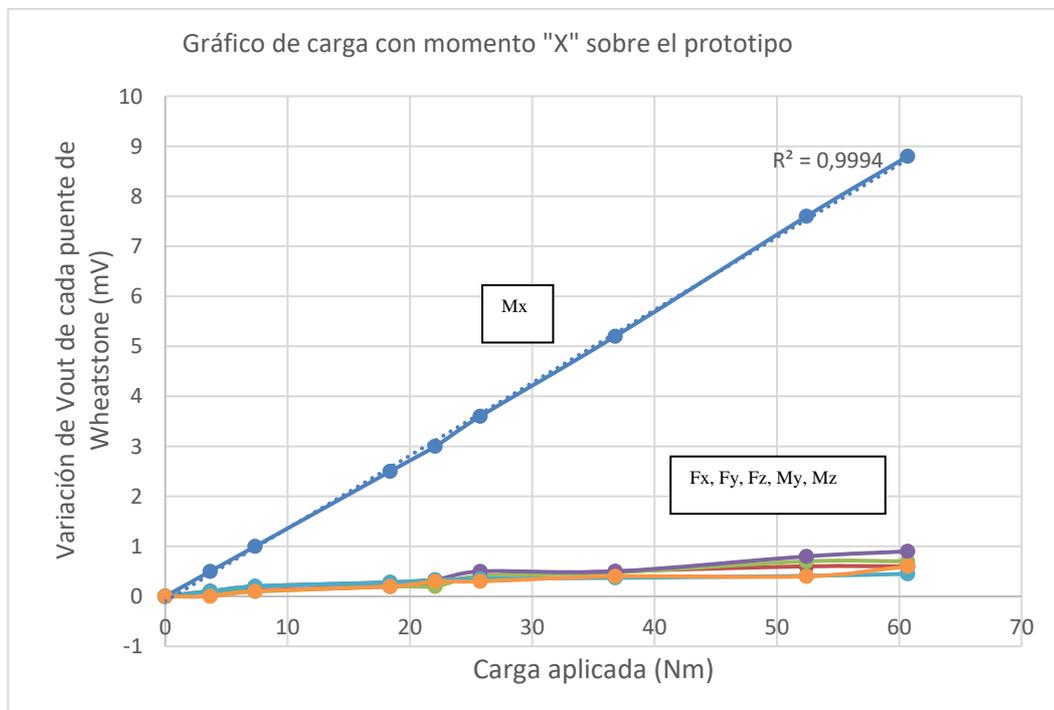


Figura 55. Líneas de carga con relación a la variación de voltaje para la aplicación de momento "X" puro

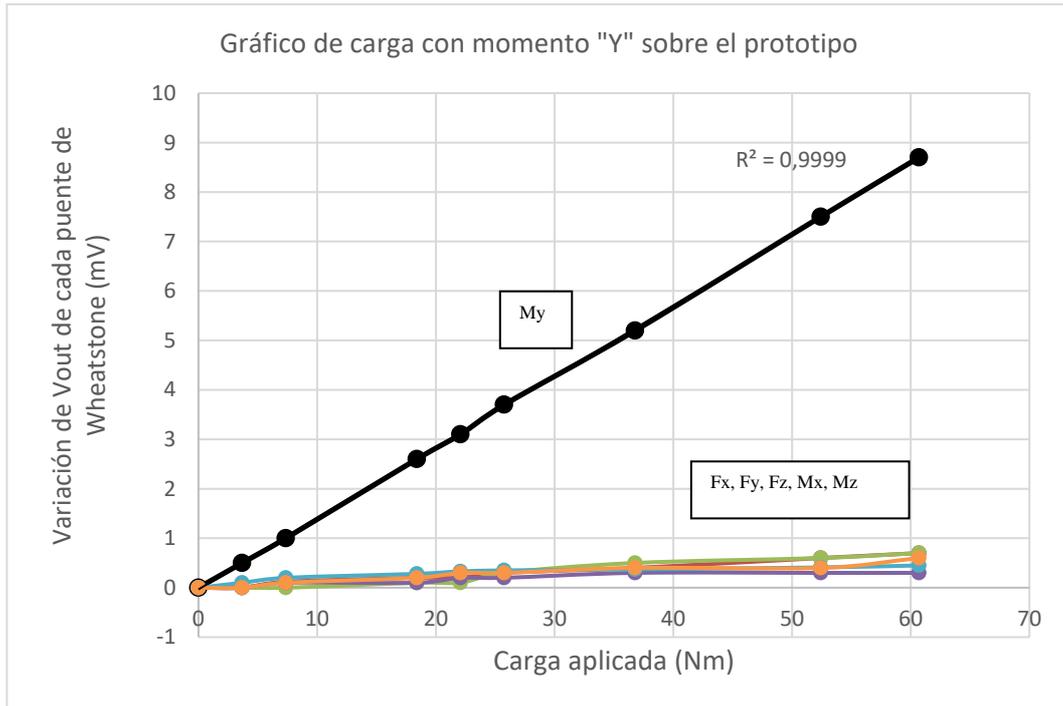


Figura 56. Líneas de carga con relación a la variación de voltaje para la aplicación de momento "Y" puro

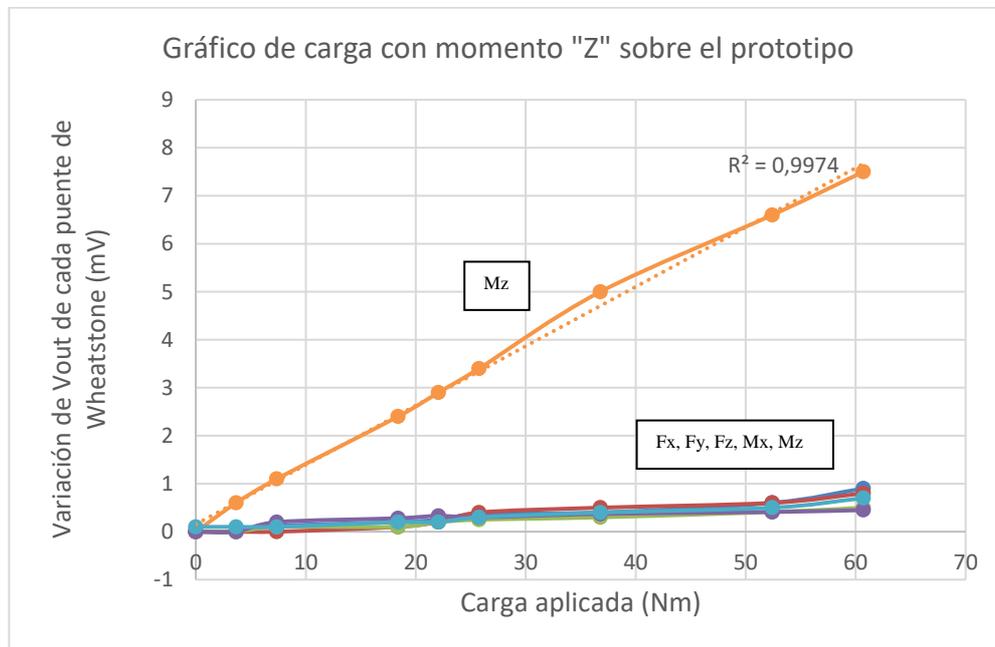


Figura 57. Líneas de carga con relación a la variación de voltaje para la aplicación de momento "Z" puro

De las pruebas de funcionamiento del prototipo del sensor de fuerza se pudo determinar

que el mismo se encuentra operativo en razón de que posee una excelente sensibilidad en razón de que con cargas de fuerza y momento de baja magnitud se puede identificar una variación en el voltaje de salida de cada puente de Wheatstone asociado a una carga respectiva de tal forma que el sensor es capaz de realizar mediciones para cargas de baja magnitud hasta llegar a las cargas máximas establecidas. A su vez, de las líneas de carga que relacionan la variación de voltaje con la carga pura colocada en el sensor en cada caso se puede observar una adecuada respuesta por parte del sensor ya que en cada uno de los seis gráficos de líneas de carga se evidencia desacoplamiento en las mediciones ya que únicamente se detecta variación de voltaje del puente de Wheatstone asociado a la carga colocada mientras que la variación en el voltaje de salida del resto de puentes se mantiene extremadamente baja tal como se puede observar en las líneas de carga asociadas con los puentes no asociados a la carga colocada. A la par, se destaca de las pruebas de funcionamiento del sensor que la respuesta de todos los puentes en su variación de voltaje es lineal en referencia a las fuerzas y momentos aplicados lo cual se corrobora con el factor R^2 de correlación mostrado en cada una de las seis líneas de carga asociadas a cada puente de Wheatstone destinado a medir las cargas puras aplicadas en las pruebas de funcionamiento. Cabe recalcar, que las líneas de carga obtenidas de la experimentación son similares a las realizadas mediante el proceso de simulaciones en ABAQUS y asociación de deformaciones con cargas aplicadas mediante una matriz de calibración ya que ambas líneas de carga reflejan el desacoplamiento de mediciones que valida la calidad del sensor y a su vez el observar una respuesta igual a la simulada en las líneas de carga valida la correcta manufactura del prototipo en razón de que el mismo funciona acorde a lo determinado por cálculos y simulaciones cumpliendo con la función de realizar mediciones únicamente en un solo eje cuando se aplica una carga pura (fuerza o momento) evitando realizar mediciones erróneas en el resto de ejes de tal forma que el arreglo y posicionamiento de las 16 galgas extensiométricas ha permitido cumplir con los objetivos para que sensor pueda ser

funcional. No obstante, para que el presente prototipo se pueda presentar como un producto totalmente terminado es necesario llevar a cabo una serie de tareas y procesos mencionados en la sección de trabajo futuro del presente documento.

3.7. Seguridad a través del diseño

Como método de vital importancia durante el desarrollo del sensor de fuerza se analizó los posibles riesgos para reconocer a que situaciones o factores poner principal atención para minimizar los riesgos y cumplir a cabalidad con los objetivos y expectativa del sensor. Los riesgos y su mitigación se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 13. Riesgos en orden de prioridad con su respectivo plan de mitigación

Código	Descripción	Prioridad=Impacto x Probabilidad	Responsable	Decisión definida	Status	Observaciones
1	Maquinado de precisión no es posible con la maquinaria de los laboratorios y puede ocasionar fallas en la estructura	5x4=20	Yegor Mejia	Transferir: Subcontratar a un taller para maquinado de torno/fresado de alta calidad	Vigente	Buscar mejores opciones de talleres tomando en cuenta la calidad de los procesos de manufactura
2	No tener un error dado por la matriz de calibración inferior al 5% en todos los ejes	5x3=15	Todos	Reducir: Realizar un diseño mecánico adecuado del bloque principal mediante varias iteraciones	Vigente	Se deben modificar las dimensiones del bloque principal y simular hasta que se procese una matriz de calibración que nos indique un error bajo
3	Seguridad para los sujetos de estudio que usarán el sensor	5x3=15	Anthony Pulla	Evitar: Diseñar el sensor de tal manera que se tenga en cuenta la seguridad de los sujetos de estudio	Vigente	Es necesario tomar en cuenta posible accidentes durante el uso del sensor y modificar el diseño de la plataforma según lo requerido
4	Tener un costo elevado en el maquinado del sensor	3x3=12	Yegor Mejia	Prepararse: Buscar varios talleres de maquinado de buena reputación hasta encontrar la mejor cotización disponible	Vigente	Tomar en cuenta las cotizaciones de los diferentes talleres y comparar con nuestro presupuesto disponible
5	Tener un costo elevado en la materia prima del sensor	3x2=6	Byron Suarez	Prepararse: Buscar varios proveedores de material y comparar sus precios	Vigente	Tomar en cuenta las cotizaciones de los proveedores y la calidad de la materia prima suministrada
6	Obtención de resultados insatisfactorios o no acorde a los cálculos en las simulaciones	4x3=12	Todos	Reducir: Realizar simulaciones con un mallado adecuado y verificar que los cálculos sean correctos	Vigente	Reconocer que los resultados de la simulación sean aproximados a la realidad y que los cálculos consideren situaciones críticas
7	Ubicación incorrecta de galgas extensiométricas en las vigas del bloque principal	4x3=12	John Ochoa	Transferir: Subcontratar a un especialista de electrónica para la instalación de las galgas en el bloque	Vigente	Verificar la experiencia de la persona a subcontratar para la instalación de las galgas
8	Daño al sistema electrónico por agua o polvo	5x2=10	Todos	Evitar: Diseñar el sensor de forma que aisle la parte electrónica a factores externos del ambiente	Vigente	Diseñar el sensor de tal forma que no existan aberturas hacia el ambiente. Total aislamiento de parte electrónica
9	Falla en la estructura mecánica al cargar el sensor con las fuerzas y momentos máximos requeridos por el cliente	5x2=10	Todos	Evitar: Realizar cálculos adecuados y sustentar los mismos mediante simulaciones para evitar que se supere el esfuerzo de fluencia en los materiales	Vigente	Definir un criterio adecuado para el factor de seguridad del sensor antes de realizar cálculos y simulaciones
10	No encontrar los componentes electrónicos adecuados	4x1=4	John Ochoa	Prepararse: Buscar varios proveedores de componentes y asegurar la disponibilidad de los mismos	Vigente	Buscar distintos proveedores de componentes electrónicos y asegurar la calidad de los mismos
11	Incorrecto manejo de los fondos	3x1=3	Byron Suarez	Prepararse: Reservar fondos en caso de que se presente una emergencia durante el desarrollo del proyecto	Vigente	Definir un presupuesto para cada uno de los gastos del proyecto
12	incorrecto cumplimiento del cronograma del proyecto	3x1=3	Todos	Evitar: Organizar las actividades mediante un Diagrama de Gantt y cumplirlas a cabalidad en las fechas indicadas	Vigente	Recordarnos entre los miembros del grupo las actividades necesarias a cumplir y revisar si estamos al día con el proyecto

En la presente tabla se detalla que los principales riesgos a considerar durante el desarrollo del sensor corresponden a las tareas del maquinado de precisión y la obtención de una matriz de calibración con un error de acoplamiento alrededor del 5%. Para lo cual, ciertos riesgos deben ser priorizados y se debe buscar la mejor opción de taller para obtener un maquinado de calidad y con exactitud en dimensiones mientras que para obtener una correcta matriz de calibración se realizó simulaciones para evaluar el funcionamiento del sensor y obtener matrices de calibración de manera iterativa modificando las dimensiones de las vigas, el grosor de la pared fina de apoyo para las vigas y la posición de las galgas hasta generar el debido desacoplamiento de mediciones en función de que cuando se aplique una fuerza o un momento en un eje determinado de interés se realice la medición de la fuerza aplicada solo en ese eje a través del puente de Wheatstone asociado y no se generen mediciones en otros ejes. Además, durante el desarrollo del presente sensor han aparecido riesgos que han generado inconvenientes. Uno de aquellos riesgos, es el retraso acontecido en la entrega de las galgas extensiométricas modelo SGD-7/350-LY41 de OMEGA “Engineering” importadas desde Connecticut, USA ya que las mismas llegaron a Ecuador con un “lead time” de 1 mes lo cual fue mayor al tiempo anticipado y por ende para un futuro prototipo del sensor se debe dar mayor prioridad a la importación de las galgas extensiométricas. Otro inconveniente acontecido y que requiere un mejor manejo de riesgos para un futuro prototipo es el alto costo del maquinado CNC para el bloque principal del sensor ya que el mismo termino costando \$638.40 en el centro de mecanizado “Manufactura CNC” ubicado en Tumbaco, Pichincha, Ecuador. Dicho costo podría ser reducido a través del uso de un torno y fresa manual para dar forma al bloque principal y posteriormente únicamente ajustar las dimensiones con el uso de maquinado CNC en vez de realizar toda la pieza únicamente con procesos CNC. Finalmente, para la construcción de un prototipo más refinado que incluya un circuito electrónico en placa

PCB se deberían considerar otros riesgos como el diseño adecuado e impresión completa del circuito en la placa.

3.8. Manual de operación y mantenimiento

Con base en el diseño planteado para el presente sensor se elaboró un manual de operación y mantenimiento directamente dirigido al comprador o usuario del sensor de fuerza/torque diseñado. El presente manual incluye: detalles de las personas a las cuales va dirigido, uso previsto para el sensor, pasos a seguir para uso adecuado del sensor, indicaciones para procesos de mantenimiento, recomendaciones para transporte del sensor y una lista de las partes que conforman el presente sensor. El manual se puede observar en detalle con todas sus especificaciones en el Anexo P.

3.9. Resultados

- **Resultados del diseño y manufactura**

A continuación, se resumen los resultados más importantes respecto a las opciones seleccionadas para el diseño y manufactura del sensor:

- El diseño óptimo para el bloque principal de un sensor de fuerza consiste en un centro de aplicación de cargas (fuerzas o momentos) unido a cuatro vigas de sección transversal pequeña (Base=8mm, Altura=10mm) apoyadas en paredes finas (Grosor=2mm) que facilitan la deformación de las vigas para asociar dichas deformaciones con la variación de la resistencia de las galgas extensiométricas a ser posicionadas en las vigas del bloque principal del sensor.
- El material óptimo para la elaboración del bloque principal del sensor es la aleación de Aluminio 7075-T6 debido a su elevado esfuerzo a la fluencia ($S_{y_{Al\ 7075-T6}} = 450\text{ MPa}$)

capaz de soportar el esfuerzo máximo encontrado por simulaciones de cargas máximas en el bloque principal del sensor (403 MPa) y también debido a su módulo de Young ($E_{Al\ 7075-T6} = 70\text{ GPa}$) inferior al de otros materiales más rígidos con alto esfuerzo a la fluencia como por ejemplo las aleaciones de acero ($E_{Acero\ 1045} = 200\text{ GPa}$).

- Como complemento al diseño de un sensor de fuerza se requiere de una plataforma superior para la aplicación de cargas directas (fuerzas o momentos) hacia el centro cúbico del bloque principal del sensor y una carcasa base para el almacenamiento de los componentes electrónicos del circuito del sensor. Ambos materiales estructurales se recomiendan que sean elaborados de una aleación de acero como puede ser la AISI 1045.
- Para la elaboración del bloque principal del sensor de fuerza/momento es necesario proceso de maquinado de corte, torneado CNC y fresado CNC todo con el objetivo de que dicho componente fundamental para el sensor tenga las dimensiones y geometría exacta para que funcione de la manera calculada y simulada.
- Para la medición de cargas, la opción resultante del circuito consiste en seis puentes de Wheatstone con 16 galgas extensiométricas. Dos puentes completos para la medición de fuerza “Z” y momento “Z” y cuatro semi-puentes para la medición de: fuerza “X”, fuerza “Y”, momento “X” y momento “Y”.
- **Resultados del análisis ingenieril**
- Acorde a la simulación del bloque principal del sensor con esfuerzos máximos generados por las cargas máximas de “Fx”, “Fy” y “Fz” el esfuerzo de Von Mises máximo es de 403 MPa. El material de dicho componente tiene un esfuerzo de fluencia superior a dicho valor ($Sy_{Al\ 7075-T6} = 450\text{ MPa}$) por lo que en el presente caso el factor de seguridad es de 1.11.
- El factor de seguridad para esfuerzos generados por cortante en los pernos de unión

entre la plataforma y el bloque principal del sensor es de 4.35

- En los cálculos de esfuerzo uniaxial en una sola viga del bloque principal del sensor simplificada como una viga en voladizo con apoyo fijo en la unión con el centro cúbico se calculó un factor de seguridad de 1.11 para carga máxima en fuerza “Z” y 1.28 para carga máxima con fuerza “X” y fuerza “Y”.
- La ubicación de las 16 galgas extensiométricas en las zonas de máxima deformación debido a simulaciones en ABAQUS con cargas uniaxiales son las siguientes:

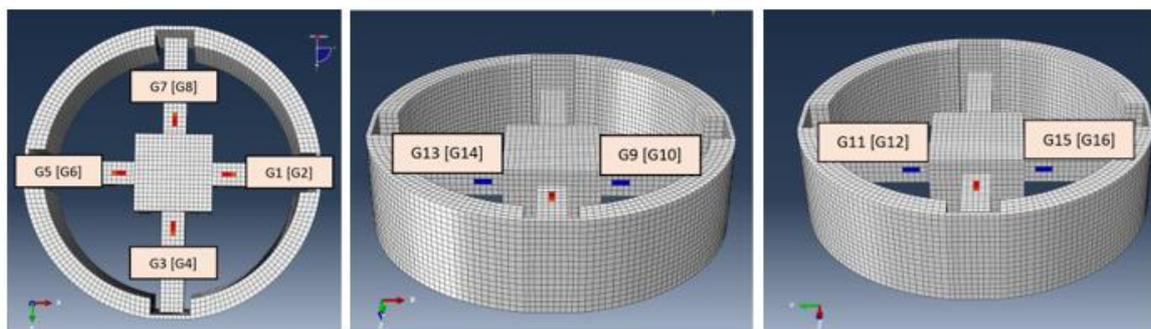


Figura 58. Vistas para detallar posicionamiento de galgas en puntos de deformación máxima

- Los puentes de Wheatstone para la medición de cargas en cada uno de los seis grados de libertad están conformados por los siguientes componentes:
 - Semi-puente de Wheatstone para medición de Fuerza X: galgas 12 y 15 (G12 y G15) más dos potenciómetros con resistencias eléctricas de 350 Ohmios.
 - Semi-puente de Wheatstone para medición de Fuerza Y: galgas 13 y 10 (G13 y G10) más dos potenciómetros con resistencias eléctricas de 350 Ohmios.
 - Puente completo de Wheatstone para medición de Fuerza Z: galgas 2,3,6 y 7 (G2, G3,G6, G7)
 - Semi-puente de Wheatstone para medición de Momento X: galgas 4 y 8 (G4, G8) más dos potenciómetros con resistencias eléctricas de 350 Ohmios.

-Semi-puente de Wheatstone para medición de Momento Y: galgas 1 y 5 (G1, G5) más dos potenciómetros con resistencias eléctricas de 350 Ohmios.

-Puente completo de Wheatstone para medición de Momento Z: galgas 9,11,14,16 (G9, G11, G14, G16)

- La matriz de deformaciones y la matriz de calibración que asocia al vector de deformaciones con las cargas aplicadas sobre el sensor de fuerza/momento fueron calculadas con base en las deformaciones obtenidas de simulaciones de ABAQUS con cargas máximas uniaxiales y se muestran a continuación:

```
S =
1.0e-07 *
0.031123434186505      0      0      0      0      0
0      0.031123434186505      0      0      0      0
0.003685652029118    -0.003641382800976    0.178808872554891    0.000000000000062    -0.000000000000080    -0.000000000000025
0.000000000000009      0      0      0.050755360328153    -0.000000000000001    0.000000000000019
0      0    -0.000000000000006      0      0.000000000000001    0.050613660119408    -0.000000000000008
0.003582715988592    -0.003582715988592      0    -0.000041676361999    0.000041676361999    0.069250747145478

>> MatrizCalibracion
MatrizCalibracion =
1.0e+11 *
8.032532608769786      0      0      0      0      0
0      8.032532608769786      0      0      0      0
-0.298023333148122    0.294443705222731    2.516653640114300    -0.000000000000365    0.0000000000003982    0.0000000000000922
-0.000000000000050    -0.000000000000006      0    0.197023524911382    0.000000000000005    -0.000000000000054
-0.000000000000003      0.000000000000042      0    -0.000000000000004    0.197575120558519    0.000000000000024
-0.016622655605936    0.016622655605936      0    0.000118572348818    -0.000118904309133    0.144402774153360
```

Figura 59. Matriz de deformaciones [S] y matriz de calibración que asocia el vector de deformaciones y las cargas

- El error de acoplamiento del bloque principal a partir de la matriz de deformaciones obtenida con simulaciones de cargas uniaxiales en ABAQUS es de 5.17%
- Se generaron gráficos de carga al simular cargas puras conocidas en ABAQUS (eje de abscisas) sobre el bloque principal y obtener el vector de deformaciones para luego multiplicarlo por la matriz de calibración. Los gráficos se muestran a continuación:

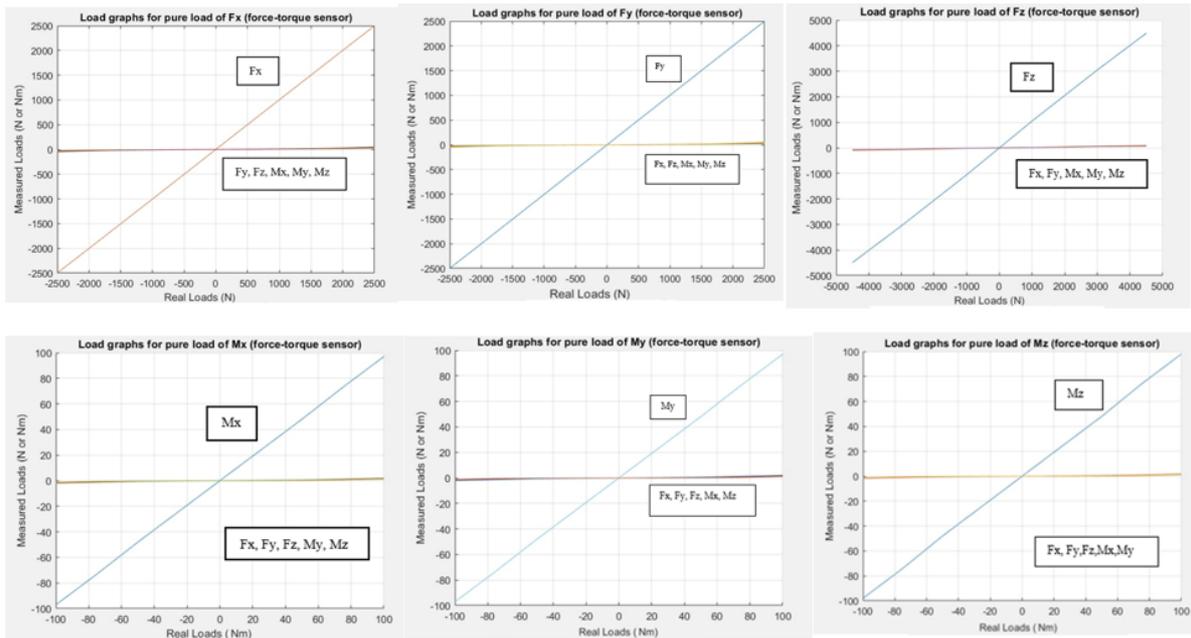


Figura 60. Presentación de los seis gráficos de carga generados mediante resultados de simulaciones en ABAQUS

- **Resultados de experimentación sobre el prototipo del sensor fabricado**
- El prototipo tiene una alta sensibilidad en razón de que se generan variaciones en el voltaje de salida en los puentes de Wheatstone correspondiente cuando se colocan cargas pequeñas sobre el bloque principal del sensor siendo 3.67 Nm y 9.81 N las cargas más pequeñas colocadas con las que se pudo obtener variaciones de voltaje de salida.
- Los gráficos de carga que relacionan las cargas puras colocadas con la variación en los voltajes de salida de cada puente de Wheatstone son las siguientes:

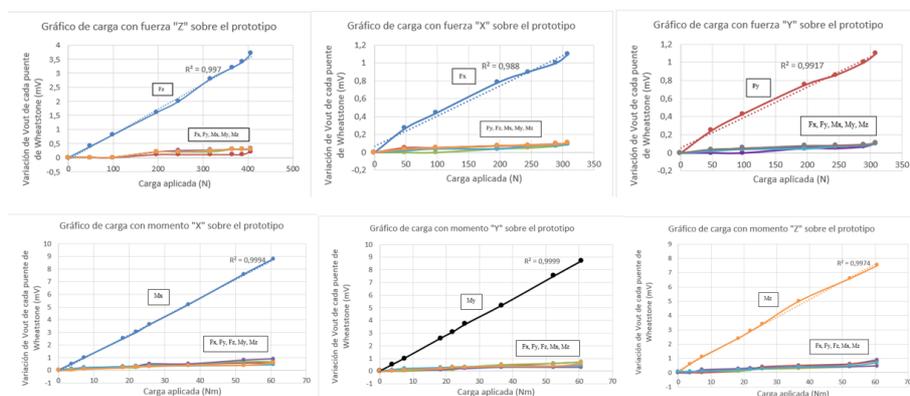


Figura 61. Presentación de los seis gráficos de carga generados mediante pruebas de

funcionamiento del prototipo

- La variación del voltaje de salida de cada puente de Wheatstone relacionado a una carga pura colocada es lineal a la fuerza o el momento aplicado ya que los factores de correlación R^2 son de alrededor de 0.99 en todas las líneas de carga.
- El prototipo del sensor cumple con la función de desacoplamiento en mediciones en razón de que los gráficos de carga muestran variaciones insignificantes en el voltaje de salida de los puentes de Wheatstone no asociados a la carga colocada en cada prueba de funcionamiento del sensor en los seis grados de libertad

3.10. Discusiones

Se considera que para el diseño de un sensor de fuerza de seis grados de libertad es fundamental el tener un plan de manufactura detallado y realizar cálculos y simulaciones que nos permitan tener una mejor visión de cómo va a funcionar el sensor desde antes de proceder con su fabricación. Como procesos a tomar en cuenta es el considerar que las simulaciones deben ser lo más exactas posibles en miras a definir una matriz de calibración que nos otorgue una visión respecto al funcionamiento real del sensor previo a la construcción de este. Se considera que el diseño de un sensor de fuerza es un proceso iterativo debido a que se deben modificar factores como las dimensiones de las vigas, paredes de apoyo para las vigas y posicionamiento de las galgas hasta obtener una configuración que nos permita obtener un error bajo en la matriz de calibración y con aquello proceder a construir el sensor, por ende el uso de código de Python para modificar automáticamente las dimensiones del bloque principal del sensor mientras se realizan simulaciones iterativas economizaría el tiempo invertido en encontrar un diseño adecuado con un bajo error de acoplamiento mediante prueba y error tal como se efectuó en el presente proyecto. Además, tanto a través de las simulaciones como de los cálculos de diseño mecánico se han encontrado factores de seguridad los cuales al ser todos

mayores a 1 nos permiten reconocer que la estructura del sensor no va a fallar ante las cargas máximas requeridas por el cliente. A su vez, se evalúa que el presente sensor cumple con el requerimiento de poder ser elaborado con la tecnología disponible en el país debido a que el mismo se fabrica mediante procesos de maquinado convencionales y el plan detallado en el presente informe permite replicar la construcción del sensor. No obstante, el material (Aluminio 7075-T6) fue importado desde Düren, Alemania y las galgas extensiométricas empleadas de “OMEGA Engineering” provienen de Connecticut, USA por lo que ambos componentes no se disponen en el país y sus costos son elevados por lo que no se ha podido cumplir con el requerimiento de que el sensor sea elaborado a bajo costo en beneficio de que la calidad de materiales y componentes beneficien el funcionamiento del sensor. Por otro lado, respecto a las especificaciones técnicas del sensor se ha podido cumplir a cabalidad con que el diseño soporte las cargas máximas indicadas por el cliente ($F_x=F_y=2500\text{N}$, $F_z=4500\text{N}$, $M_x=M_y=M_z=100\text{ Nm}$) y al mismo tiempo tenga una alta sensibilidad evidenciada por la variación de voltaje en cada puente de Wheatstone asociado a una carga pura cuando durante las pruebas de funcionamiento se aplicaban cargas pequeñas como 3.67 Nm y 9.81 N. Con respecto al desacoplamiento de mediciones se pudo obtener un error de acoplamiento de 5.17% acorde a los resultados de las simulaciones lo cual indica la alta calidad del presente sensor en desacoplar mediciones y aquellos resultados se vieron corroborados acorde a las gráficas de carga realizadas relacionando las variaciones de voltaje de salida en cada uno de los seis puente de Wheatstone con la carga real aplicada de tal forma que la respuesta del prototipo del sensor en temas de desacoplamiento de mediciones tiene un comportamiento igual a lo simulado por lo que el proceso de construcción del prototipo fue el correcto en razón de los resultados de las pruebas de funcionamiento. Por otro lado, se debe destacar que se pudo cumplir con el requerimiento de emplear el mínimo número de galgas extensiométricas (16) y se considera que el emplear un menor número de galgas afectaría la calidad del sensor. Finalmente, se debe

mencionar que a pesar de los excelentes resultados en las pruebas de funcionamiento y el cumplimiento a cabalidad con varios criterios y objetivos, aún es necesario realizar tareas para que un segundo prototipo del sensor pueda ser comercializable. Aquellas tareas se destacan en la sección de trabajo futuro.

3.11. Conclusiones

- El diseño mecánico del bloque principal del sensor es capaz de soportar las cargas máximas requeridas por el cliente ($F_x=F_y=2500\text{N}$, $F_z=4500\text{N}$, $M_x=M_y=M_z=100\text{ Nm}$) sin llegarse a superar el límite de fluencia debido a que el esfuerzo de Von Mises máximo de las simulaciones es de 403 MPa con cargas máximas simultaneas.
- El arreglo de 16 galgas extensiométricas en dos puentes completos para la medición de la fuerza en “Z” y del momento en “Z” y cuatro semi-puentes de Wheatstone para realizar mediciones de fuerza “X”, fuerza “Y”, momento “X” y momento “Y” es adecuado para motivos del presente sensor y la ubicación de las galgas en las vigas corresponde a los puntos de deformaciones máximas por simulaciones de cargas uniaxiales en ABAQUS.
- El aluminio 7075-T6 es el material idóneo para elaborar el bloque principal del sensor de fuerza/momento debido a su elevado límite a la fluencia (450 MPa) y adecuado módulo de Young (70 GPa) que beneficia la facilidad de las vigas de deformarse antes cargas bajas y que los puentes de Wheatstone otorguen una respuesta en forma de variaciones en el voltaje de salida tal como se evidenció en las pruebas de funcionamiento.
- El sensor presentado cumple con una alta capacidad de desacoplamiento de medición en razón de que el error de acoplamiento determinado con base en las simulaciones es del 5.17% y tanto las gráficas de carga realizadas con los resultados de las simulaciones

como las efectuadas con base en las pruebas de funcionamiento indican una medición únicamente en el eje de interés cuando se carga el sensor con una fuerza o momento uniaxial.

- El diseño del presente sensor con unión a una plataforma y una carcasa base permite facilidades al usuario para el uso del presente dispositivo en investigaciones de Biomecánica
- La metodología descrita en el presente informe y los procesos de manufactura seleccionados para la creación del prototipo son adecuados en razón de que los resultados de las simulaciones son comparables a los obtenidos en las pruebas de funcionamiento de tal forma que el sensor se comporta acorde a lo esperado.
- El desarrollo de un sensor de fuerza/momento de bajo costo con altas especificaciones técnicas y criterios como los requeridos en el presente proyecto por el cliente no es viable en Ecuador en razón de los elevados costos del material, maquinado y galgas extensiométricas.
- La metodología de simulaciones para obtener deformaciones en las ubicaciones de las 16 galgas extensiométricas y relacionar dichas deformaciones con las cargas conocidas que se han aplicado es adecuado para proyectar el funcionamiento del sensor previo a su construcción.
- El presente sensor puede ser correctamente calibrado a través del establecimiento de una matriz de calibración debido a la alta calidad en el desacoplamiento de las mediciones en los seis grados de libertad.

3.12. Trabajo futuro

Como trabajo futuro en beneficio de la finalización de un sensor fuerza/momento

que pueda ser comercializado es necesario utilizar nuevas metodologías complejas para obtener una mayor reducción en el error de acoplamiento del sensor. Para dicha tarea se recomienda la vinculación de código de Python con el software de elementos finitos ABAQUS para que las simulaciones efectuadas para obtener deformaciones en las zonas donde se van a posicionar las galgas extensiométricas se puedan efectuar de forma iterativa empleando código que permita modificar en cada iteración las dimensiones del bloque principal del sensor tales como las dimensiones de las vigas y el grosor de la pared fina de apoyo para la vigas y que posteriormente el código se encargue automáticamente de determinar la matriz de deformaciones y la matriz de calibración obteniendo como resultado final el error de acoplamiento CC_{ij} %. Dicha tarea debería ser efectuada de manera iterativa para varios modelos del bloque principal hasta obtener un error lo más bajo posible en beneficio de la exactitud de las mediciones de fuerzas y momentos del sensor para posteriormente fabricar dicho nuevo bloque principal y acoplarlo con la plataforma superior y la carcasa inferior ya diseñada y luego cablear los puentes de Wheatstone y el resto del circuito electrónico para que el nuevo modelo del sensor pueda ser funcional. A su vez se plantea como trabajo futuro el diseño de un circuito impreso en PCB para la parte electrónica del sensor a manera de sustituir los cables presentes en el sensor. Por otro lado, se recomienda el diseño de un filtro de paso alto y paso bajo para que la señal de salida de voltaje de cada puente de Wheatstone pueda ser filtrada y se reduzca el ruido que se visualiza claramente en la señal captada con el uso de la tarjeta de adquisición de datos en vinculación con el software MATLAB. Simultáneamente, se requiere el diseño de un circuito de amplificación de la señal de salida de cada puente de Wheatstone el cual puede emplear amplificadores operacionales para que la señal de salida que actualmente se encuentra en el rango de los milivoltios pueda ser amplificada. Una vez efectuadas dichas tareas, se puede usar el sensor finalmente en experimentos de Biomecánica y a su vez

efectuar un reporte de la calidad del funcionamiento del mismo ya en aplicaciones concretas de investigación y desarrollo dentro del campo de la Biomecánica en la Universidad San Francisco de Quito.

4. Referencias bibliográficas

- Aguirre, X., Crespo, O. y Molina, D. (2020). Diseño y Desarrollo de un Sensor de Fuerza de Seis Grados de Libertad. USFQ: Quito
- Ahmad, A., Terrence W. & Chyi-Yeu L. (2021). A Comprehensive Design of Six-Axis Force/Moment Sensor. *Sensors* 21, no. 13: 4498. <https://doi.org/10.3390/s21134498>
- Arauz, P. (2022). Interview with the client. Via Zoom
- ASTM. (2020). ASTM E251-20a: Standard Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages. Retrieved from: <https://www.astm.org/e0251-20a.html>
- AZOM. (2012). AISI 1038 Carbon Steel (UNS G10380). Retrieved from: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6532>
- Beer, F. P. (2009). *Mechanics of materials*. New York: McGraw-Hill Higher Education.
- Budynas, R. G., Nisbett, J. K., & Shigley, J. E. (2011). *Shigley's mechanical engineering design*. New York: McGraw-Hill.
- Castano, D., Grossard, M., & Hubert, A. (2021). Resonant sensors for multi-axis force and torque estimation in collaborative. Elsevier, 1-3.
- Groover, Mikell P. (2007). *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. Hoboken, NJ: J. Wiley & Sons.
- Hibbeler, R. C. (2018). *Mechanics of materials*. Upper Saddle River, N.J: Pearson

Education.

- Idrovo, P. & Quintanilla, L. (2010). Aplicación de galgas extensiométricas en el laboratorio de Mecánica de Materiales de la carrera de Ingeniería Mecánica para la obtención de deformaciones de elementos sometidos a cargas combinadas. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana
- ISO. (2011). ISO 376-2011 Metallic Materials -- Calibration of Force-proving Instruments Used for the Verification of Uniaxial Testing Machines. Retrieved from: <https://www.iso.org/standard/44661.html>
- Kang, M., Lee, S. & Kim. J. (2014). Shape optimization of a mechanically decoupled six axis force/torque sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*. Volume 209, Pages 41-51, ISSN 0924-4247. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.01.001>.
- Marzbanrad, J., Mehdikhanlo, M., & Pour, A. S. (2010). An energy absorption comparison of square, circular, and elliptic steel, and aluminum tubes under impact loading. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 33(3), 159-166.
- Matmatch. (2022). 7075-T6 Aluminium: Overview & Properties. Retrieved from: <https://matmatch.com/learn/material/7075-t6-aluminium>
- Matweb. (2022). AISI 1045 Steel, cold drawn, high temperature stress relieved, 50-75 mm (2-3 in) round. Retrieved from: https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=193434cf42e343fab880e1dabdb143ba
- Min-Kyung, K., Soobum, L., & Jung, K. (2014). Shape optimization of a mechanically decoupled six-axis force/torque. Elsevier, 1-3.
- Okumura, D., Sakaino, S. & Tsuji T. (2018). High Dynamic Range Sensing by a Multistage Six-Axis Force Sensor with Stopper Mechanism. 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 4065-4070, doi: 10.1109/ICRA.2018.8460571.

- OMEGA Engineering. (2018). How to Apply a Strain Gauge - Tutorial (Stainless Steel Flat) [Video]. Retrieved from: <https://www.youtube.com/watch?v=KnmsqkmQjR8>
- OMEGA Engineering. (2022). Precision Strain Gage precision linear pattern for static and dynamic applications. Retrieved from: https://assets.omega.com/pdf/test-and-measurement-equipment/strain-gauges/SGD_LINEAR1-AXIS.pdf
- Robertson, D. (2013). Research methods in biomechanics. Human Kinetics.
- Sun, Y., Liu, Y., Zou, T., Jin, M., & Liu, H. (2015). Design and optimization of a novel six-axis force/torque sensor. Elsevier, 136-138.
- Templeman, J., Sheil, B., & Sun, T. (2019). Multi-axis force sensors: A state-of the-art review. Elsevier, 1-3.
- Ungureanu, C. A., Das, S., & Jawahir, I. S. (2007). Life-cycle cost analysis: aluminum versus steel in passenger cars. TMS (the minerals, metals & materials society), 11-24
- Yuan, C. et. al. (2015). Development and evaluation of a compact 6-axis force/moment sensor with a serial structure for the humanoid robot foot. Measurement. 70, 110-122. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.03.027>.
- Zhang, Z. et al. (2019). A six-dimensional traction force sensor used for human-robot Collaboration. Mechatronics 57, 164-172. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.12.005>
- Zhang, H., Ryoo, Y. & Byun, K. (2016). Development of Torque Sensor with High Sensitivity for Joint of Robot Manipulator Using 4-Bar Linkage Shape. Sensors 2016. doi:10.3390/s16070991

ANEXO A: Diagrama de Gantt para el desarrollo del proyecto

Tareas	Inicio	Finalización	Asignad o	Estado	19.01.2022	22.01.2022	25.01.2022	28.01.2022	31.01.2022	03.02.2022	06.02.2022	09.02.2022	12.02.2022	15.02.2022	18.02.2022	21.02.2022	24.02.2022	27.02.2022	02.03.2022	05.03.2022	08.03.2022	11.03.2022	14.03.2022	17.03.2022	20.03.2022	23.03.2022	26.03.2022	29.03.2022	01.04.2022	04.04.2022	07.04.2022	10.04.2022	13.04.2022	16.04.2022	19.04.2022	22.04.2022	25.04.2022	28.04.2022	01.05.2022	04.05.2022	07.05.2022	10.05.2022	13.05.2022	16.05.2022						
Sensor de Fuerzas	17.01.2022	18.05.2022	Todos	ABIERTO	█																																													
Definición del Problema	19.01.2022	20.01.2022	Todos	ABIERTO	█																																													
Introducción	21.01.2022	27.01.2022	Todos	ABIERTO		█																																												
Tres opciones de modelo	28.01.2022	15.02.2022	Todos	ABIERTO			█																																											
Definición de subsistemas	13.02.2022	17.02.2022	Todos	ABIERTO				█																																										
Análisis de riesgo y problemas de diseño	18.02.2022	24.02.2022	Todos	ABIERTO					█																																									
Selección de pernos	16.02.2022	17.03.2022	Todos	ABIERTO						█																																								
Cálculo de fuerzas en las 4 barras	24.02.2022	02.03.2022	Todos	ABIERTO							█																																							
Cálculo esfuerzos y deformaciones de barras	24.02.2022	03.03.2022	Tods	ABIERTO								█																																						
Calculos de voltaje de salida en puentes de wheatstone	24.20.2022	03.04.2022	Todos	ABIERTO										█																																				
Construcción de Prototipo	20.03.2022	07.04.2022	Todos	ABIERTO															█																															
Planos de Prototipo	03.03.2022	14.04.2022	Todos	ABIERTO																█																														
Revisión de prototipo	10.04.2022	12.04.2022	Todos	ABIERTO																	█																													
Cosntrucción final de Prototipo	14.04.2022	21.04.2022	Todos	ABIERTO																																														
Manual de operación y mantenimiento	25.04.2022	26.04.2022	Todos	ABIERTO																																														
Preparación de la presentación	25.04.2022	26.04.2022	Todos	ABIERTO																																														
Presentación Final	09.05.2022	18.05.2022	Todos	ABIERTO																																														
Presentación de Portafolio	20.01.2022	18.05.2022	Todos	ABIERTO	█																																													

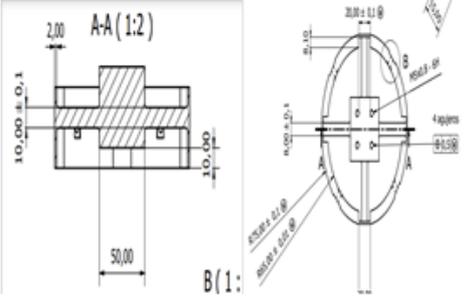
ANEXO B: Informe de gastos

	Cantidad	Costo unitario (\$)	Valor Total (\$)
Maquinado y materia prima de bloque principal de Aluminio 7075-T6	1	638,4	638,4
Pernos M5X0.8	4	0,6	2,4
Tuercas M5	4	0,15	0,6
Arandelas M5	4	0,1	0,4
Cable de tensar	5	0,8	4
Galgas SGD-7/350-LY41	1	275,31	275,31
Platina para brazo de palanca	1	2,6	2,6
Bateria 9V	1	4	4
Portabateria	1	1,25	1,25
Protoboard	6	3	18
Potenciometros 1K	8	1	8
Cables jumper paquete 20	3	3,5	10,5
Lijas de 220 Grits	2	0,8	1,6
Plancha de acero para plataforma	1	10,5	10,5
			977,56

ANEXO C: Hoja de proceso del bloque principal del sensor

MODELO DE HOJA DE PROCESO

HOJA DE PROCESO	
Proyecto:	Bloque Principal Sensor
Material:	Bloque de 30x30 cm Aluminio 7075-t6
Responsable:	Byron Suarez



Nº	Tareas	Croquis	Útiles y herramientas	Operaciones y observaciones	Tiempo
1	Fresar el cubo hasta obtener un cilindro	N/A	Herramienta de arranque de viruta: Nombre: tipo V Designación: VNMG 160404-PF	Proceso manual hasta obtener dimensiones acordadas: Dia=20 cm Vc= 60m/min N=478 rpm F=0.1 mm	3 horas
2	Fresar para obtener geometría	N/A	Herramienta de arranque de viruta: Nombre: tipo V Designación: VNMG 160404-PF	Proceso manual hasta obtener dimensiones acordadas: Vc= 60m/min N=478 rpm F=0.1 mm	5 horas
3	Perforación de horificios para pernos	N/A	Herramienta de arranque de perforación: Nombre: tipo V Designación: VNMG 160404-PF	Proceso manual hasta obtener dimensiones acordadas: Vc= 60m/min N=478 rpm F=0.1 mm	20 min

ANEXO D: Hoja de proceso de la plataforma del sensor

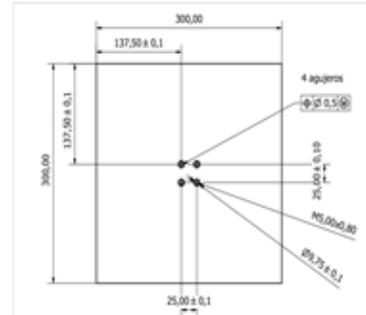
MODELO DE HOJA DE PROCESO

HOJA DE PROCESO

Proyecto: Plataforma

Material: Bloque de 30x30 cm AISI 1045

Responsable: Byron Suarez



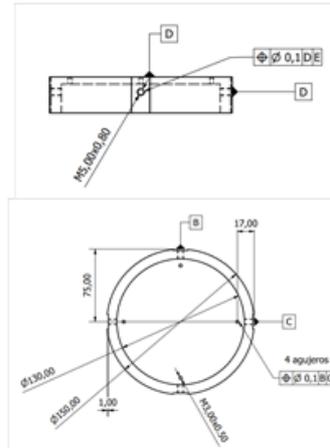
N°	Tareas	Croquis	Útiles y herramientas	Operaciones y observaciones	Tiempo
1	Fresar el cubo hasta obtener un cilindro		Herramienta de arranque de viruta: Nombre: tipo V Designación: VNMG 160404-PF	Proceso manual hasta obtener dimensiones acordadas: Dia=30 cm Vc= 60m/min N=478 rpm F=0.1 mm	3 horas
2	Fresar para obtener geometría		Herramienta de arranque de viruta: Nombre: tipo V Designación: VNMG 160404-PF	Proceso manual hasta obtener dimensiones acordadas: Vc= 60m/min N=478 rpm F=0.1 mm	5 horas
3	Perforación de oficios para pernos		Herramienta de perforación: Nombre: tipo V Designación: VNMG 160404-PF	Proceso manual hasta obtener dimensiones acordadas: Vc= 60m/min N=478 rpm F=0.1 mm	20 min

ANEXO E: Hoja de proceso de la carcasa base del sensor

MODELO DE HOJA DE PROCESO

HOJA DE PROCESO

Proyecto: Carcasa Base
Material: Cilindro Eje Dia 30cm AISI 1045
Responsable: Byron Suarez

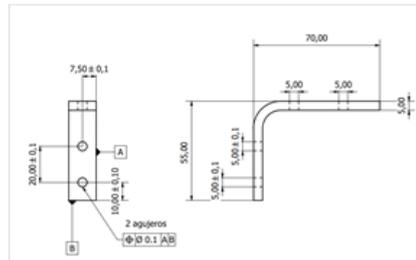


Nº	Tareas	Croquis	Útiles y herramientas	Operaciones y observaciones	Tiempo
1	Tomar		Herramienta de arranque de viruta	Sierra automática de avance fijo. N=1 ciclo/s Laterales de 30x30 cm	30 min
2	Perforar		Herramienta de arranque de perforación: Nombre: broca par acero Designación: broca para acero 1/16	Proceso manual acordadas: Velocidad de perforación sin restricciones. Dia= 5mm	10 min
3	Acabados de brillo		Pulidora automática Designación: N/A	Proceso manual sin especificación de tolerancias. Acabado superficial de porosidad mínimo de 100 micras	20 min

ANEXO F: Hoja de proceso de platinas L

MODELO DE HOJA DE PROCESO

HOJA DE PROCESO
Proyecto: Platinas L
Material: Acero AISI 1045
Responsable: Byron Suarez



Nº	Tareas	Croquis	Útiles y herramientas	Operaciones y observaciones	Tiempo
1	Cortar	N/A	Herramientas: Sierra automática de avance	Sierra automática de avance fijo. N=1 ciclo/s De una plancha se realiza el corte de 4 rectángulos de 15x140 mm	30 min
2	Perforar	N/A	Herramienta de arranque de perforación: Nombre: broca par acero Designación: broca para acero 1/16	Proceso manual acordadas: Velocidad de perforación sin restricciones. Dia= 5mm Realizar cuatro orificios como se muestra en el mapa	10 min
3	Acabados de brillo	N/A	Pulidora automática Designación: N/A	Proceso manual sin especificación de tolerancias. Acabado superficial de porosidad mínimo de 100 micras	20 min

ANEXO G: Código de MATLAB para el cálculo de la matriz de deformaciones

```
2 -   matrizstrains = 'matriz.xlsx';
3 -   MatrizDeformaciones = xlsread(matrizstrains);
4 -   S=zeros(6);
5 -   for i=1:6
6 -       col=MatrizDeformaciones(:,i);
7 -       Strain1 = col(1,1);
8 -       Strain2 = col(2,1);
9 -       Strain3 = col(3,1);
10 -      Strain4 = col(4,1);
11 -      Strain5 = col(5,1);
12 -      Strain6 = col(6,1);
13 -      Strain7 = col(7,1);
14 -      Strain8 = col(8,1);
15 -      Strain9 = col(9,1);
16 -      Strain10 = col(10,1);
17 -      Strain11 = col(11,1);
18 -      Strain12 = col(12,1);
19 -      Strain13 = col(13,1);
20 -      Strain14 = col(14,1);
21 -      Strain15 = col(15,1);
22 -      Strain16 = col(16,1);
23 -      VectorDeformaciones=zeros(6,1);
24 -      VectorDeformaciones(1,1)=(Strain15-Strain12);
25 -      VectorDeformaciones(2,1)=(Strain13-Strain10);
26 -      VectorDeformaciones(3,1)=(Strain2-Strain3+Strain6-Strain7);
27 -      VectorDeformaciones(4,1)=(Strain4-Strain8);
28 -      VectorDeformaciones(5,1)=(Strain1-Strain5);
29 -      VectorDeformaciones(6,1)=(Strain9-Strain11+Strain14-Strain16);
30 -      S(:,i)=VectorDeformaciones;
31 -   end
32 -   S;
```

ANEXO H: Detalle de los cálculos efectuados

1.1. Cálculos de viga con aplicación de fuerza máxima en eje Z

Suposiciones:

- Las vigas se encuentran empotradas al cubo central del bloque principal
- Se asume que las vigas son elaboradas de Aluminio 7075-T6 y tienen propiedades constantes a lo largo de su geometría
- El punto crítico es en la fijación entre la viga y el cubo central.
- La pared de apoyo para la viga tiene un grosor de 2mm y permite un movimiento libre en todos los ejes al no ser considerable la rigidez de una pared extremadamente fina.

Bajo aquellas suposiciones se procede con los cálculos para las vigas analizando si las mismas pueden soportar una carga puntual de 4500 N en el eje Z en el cubo central, carga la cual se dividirá para cada una de las 4 vigas del bloque central del sensor y se toma la longitud de la viga desde la fijación con la pared delgada hasta su unión con el centro del cubo.

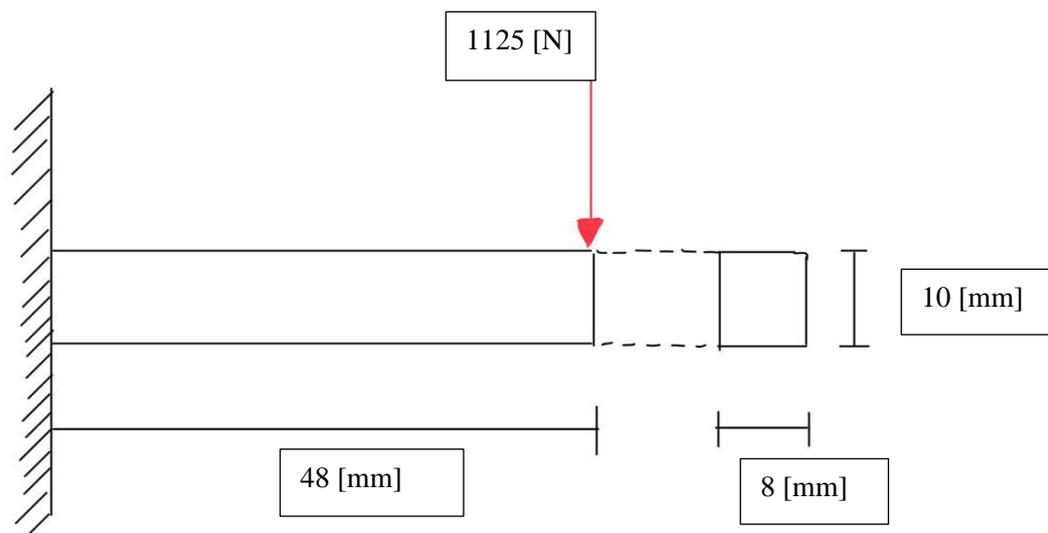


Figura 1: Diagrama de la viga del bloque principal con carga en eje Z

Descripción: En el diagrama se indican las dimensiones de la viga y la carga en eje Z para el análisis estático.

Datos:

$$F = 4500 \text{ [N]}$$

$d = 48 \text{ [mm]}$ (distancia desde el punto de unión entre la viga y el cubo hasta la unión de la viga con la pared fina de apoyo)

$$c = 5 \text{ [mm]}$$

$$b = 8 \text{ [mm]}$$

$$h = 10 \text{ [mm]}$$

$$E = 70 \text{ [GPa]} \text{ (Beer, 2009)}$$

Debemos dividir nuestra fuerza para 4 ya que son 4 vigas las que van a soportar la fuerza.

$$F = \frac{4500}{4} = 1125 \text{ [N]}$$

Calculamos el momento generado.

$$M = F * d = 1125 * 48$$

$$M = 54000 \text{ [N * mm]}$$

Calculamos el momento de inercia.

$$I = \frac{b * h^3}{12} = \frac{(8)(10)^3}{12}$$

$$I = 666.67 \text{ mm}^4$$

Calculamos el esfuerzo de flexión.

$$\sigma = \frac{M * c}{I} = \frac{(54000)(5)}{(666.67)} \text{ (Beer, 2009)}$$

$$\sigma = 404.99 \text{ [MPa]}$$

Sabemos que el esfuerzo de fluencia del aluminio 7075-T6 es de 450 [MPa], con esto calculamos el factor de seguridad (Matmatch,2022).

$$n = \frac{S_y}{\sigma_A} = \frac{450}{404.99} = 1.11$$

Para calcular el límite de endurecimiento S_e .

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_f * S'_e \text{ (Budynas, Nisbett, & Shigley, 2011)}$$

Para calcular el S'_e necesitamos el esfuerzo de tensión ultimo S_{ut} que para el aluminio 7075-T6 es de 560 [MPa] (Matmatch,2022).

$$S'_e = 0.5 * S_{ut} = 0.5 * 560$$

$$S'_e = 280 \text{ [MPa]}$$

Debemos calcular los distintos factores, empezamos con el factor de superficie.

$$k_a = a * S_{ut}^b$$

Utilizamos los valores para una superficie maquinada.

$$k_a = 4.51 * (560)^{-0.265} = 0.84$$

Después calculamos el factor de tamaño. Para esto debemos calcular un diámetro equivalente ya que tenemos un rectángulo.

$$d_e = 0.808\sqrt{hb} = 0.808\sqrt{8 * 10}$$

$$d_e = 7.23 \text{ [mm]}$$

Calculamos el factor de tamaño con la siguiente formula.

$$k_b = 1.24d^{-0.107} \quad 2.79 \leq d \leq 51 \text{ [mm]}$$

$$k_b = 1.24(7.23)^{-0.107} = 1$$

El factor de carga es 1 ya que nuestra carga se encuentra flexión.

$$k_c = 1$$

El factor de temperatura es 1.

$$k_d = 1$$

El factor de confiabilidad es 1.

$$k_e = 1$$

El factor de efectos misceláneos es 1.

Calculamos el límite de endurecimiento S_e .

$$S_e = 0.84 * 1 * 1 * 1 * 1 * 1 * 1 * 280$$

$$S_e = 235.2 \text{ [MPa]}$$

Calculamos el esfuerzo medio.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = \frac{404.99 + 0}{2} = 202.49 \text{ [MPa]}$$

Calculamos el esfuerzo amplitud.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{404.99 - 0}{2} = 202.49 \text{ [MPa]}$$

Utilizamos a su vez la teoría de Gerber.

$$n = \frac{1}{2} \left(\frac{S_{ut}}{\sigma_m} \right)^2 \frac{\sigma_a}{S_e} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 * \sigma_m * S_e}{S_{ut} * \sigma_a} \right)^2} \right] \quad (\text{Budynas, Nisbett, \& Shigley, 2011})$$

$$n = \frac{1}{2} \left(\frac{560}{202.49} \right)^2 \frac{202.49}{204.15} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 * 202.49 * 235.2}{560 * 202.49} \right)^2} \right] = 1.16$$

Para finalizar calculamos la deflexión de la viga, información importante para conocer el máximo desplazamiento de la viga ante la máxima carga vertical.

$$y_{\max} = -\frac{F * d^3}{3 * E * I} = -\frac{(1125)(48^3)}{3(70e3)(666.67)} = -0.88 \text{ [mm]} \quad (\text{Hibbeler, 2018})$$

Dibujamos la línea de carga, en este caso tenemos esfuerzos repetidos por lo tanto el esfuerzo amplitud y medio son iguales.

$$\sigma_a = \sigma_m$$

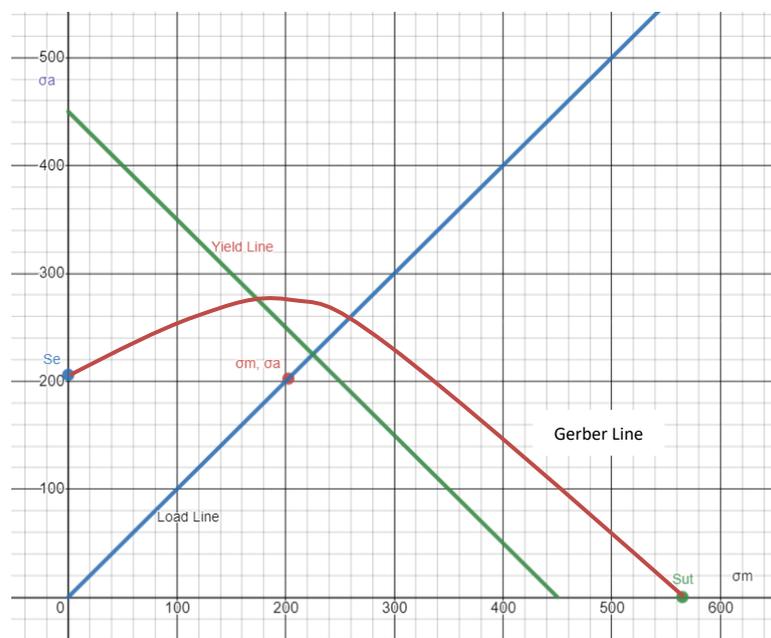


Figura 2: Línea de carga para las vigas sometidas a efectos de fuerza máxima aplicada en el bloque central de 4500 N en el eje Z.

Descripción: Se observa un esquema de la carga de la viga y se consideran las líneas de fluencia y Gerber a manera de visualizar un esquema del proceso de carga del material y de cómo el mismo posee un factor de seguridad superior a 1 en función de que el punto de intersección entre el esfuerzo medio y el esfuerzo amplitud se encuentra por debajo de las líneas asociadas a los criterios de factores de seguridad

1.2.Cálculos viga aplicación fuerza en “X” y “Y”

Para complementar los estudios anteriormente definidos se procede a estudiar el comportamiento de las vigas ante la máxima fuerza en ejes “X” y “Y” para validar los factores de seguridad.

Suposiciones:

- Se consideran las mismas suposiciones anteriormente detalladas para estudios de viga con aplicación de fuerza máxima en eje Z.

Se complementan los estudios de las vigas en torno a fuerza realizando procesos de cálculos para cuando las vigas soportan cargas de 2500N en los ejes “X” y “Y”, dichos cálculos se efectúan de manera simplificada ya que la fuerza crítica es la anteriormente estudiada en eje Y de 4500N. Debido a la simetría de las barras, el esfuerzo es el mismo en diferentes direcciones y la fuerza de 4500 N debe ser dividida para las cuatro vigas. A continuación, se muestran los diagramas representativos y los cálculos

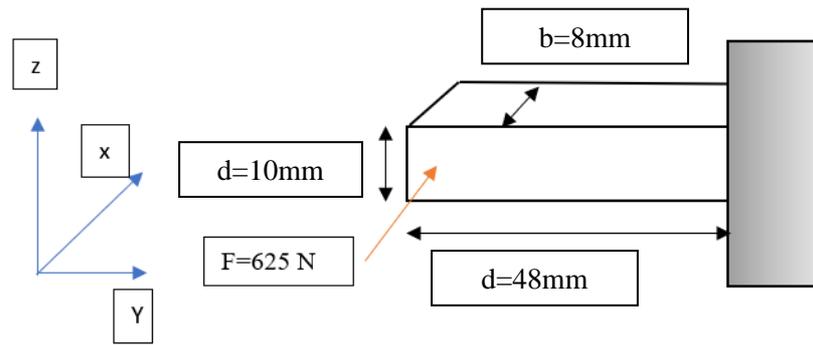


Figura 3. Representación gráfica de sistema de fuerzas aplicadas en la viga sometida a fuerza en “X” máxima

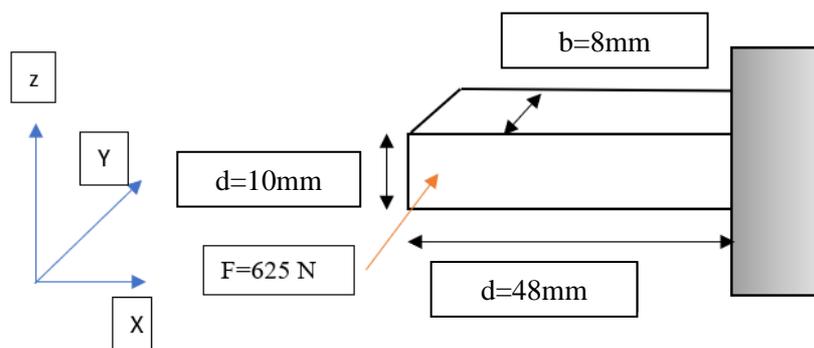


Figura 4. Representación gráfica de sistema de fuerzas aplicadas en la viga sometida a fuerza en “Y” máxima

Descripción: Se observa en los diagramas las cargas laterales dadas por fuerza en los ejes “X” y “Y” para realizar el correspondiente análisis estático.

Del diagrama se extrae los siguientes datos, elementales para el cálculo de esfuerzos, deformación máxima.

Datos:

$$F = 625 \text{ N}$$

$$d = 48 \text{ mm}$$

$$c = 5 \text{ mm}$$

$$b = 8 \text{ mm}$$

$$h = 10 \text{ mm}$$

$$E = 70 \text{ GPa (Beer, 2009)}$$

Se aclara que el sistema de coordenada difiere en cada dirección de fuerza, sin embargo, el valor es el mismo.

$$M = F \times d = 625 \text{ N} \times 48 \text{ mm} = 30000 \text{ Nmm}$$

Se calcula el momento a aplicar a la viga

$$\sigma_f = \frac{M \times c}{I} \text{ (Beer, 2009)}$$

Se calcula la inercia donde la base corresponde a 13 mm y la altura 12mm, tomando en cuenta el sentido de aplicación de las fuerzas

$$I = \frac{1}{12} \times b \times h^3 = 426.67 \text{ mm}^4$$

$$c = \frac{h}{2} = 5 \text{ mm}$$

Finalmente se obtiene el esfuerzo y se calcula el factor de seguridad mediante teoría de esfuerzo normal máximo (Shigley, 2015).

$$\sigma_f = \frac{M \times c}{I} = \frac{625 \times d \times \frac{h}{2}}{\frac{1}{12} \times b \times h^3} = 351.56 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{450 \text{ MPa}}{351.56 \text{ MPa}} = 1.28$$

Mediante una tabla se resume esfuerzos, factores de seguridad dependiendo de la aplicación de la fuerza.

Tabla 1. Resumen de esfuerzos y factores de seguridad del análisis estático

Fuerza	Base (mm)	Inercia (mm ⁴)	Esfuerzo (MPa)	Factor de seguridad
X	10	426.67	351.56	1.28
Y	10	426.67	351.56	1.28
Z	8	666.67	404.99	1.11

Descripción: Se presenta un resumen de los cálculos efectuados para análisis estático en vigas por carga máxima en ejes “X” y “Y”

Para determinar la deflexión de la viga tras aplicación de carga máxima en carga máxima en ejes “X” y “Y”, se emplea la siguiente fórmula:

$$y_{\max} = -\frac{F \times d^3}{3 \times E \times I} = -\frac{625 \times d^3}{3 \times E \times \frac{1}{12} \times b \times h^3} \quad (\text{Hibbeler, 2018})$$

$$y_{\max} = -0.77 \text{ mm}$$

1.3.Cálculos de pernos de unión entre la plataforma y el bloque principal en cortante

El método usado para unir la plataforma con el bloque principal son pernos. Se decidió usar un mínimo de 4 pernos de 5 mm con paso grueso y encontrar los factores de seguridad correspondiente. En la siguiente imagen, se puede mostrar un diagrama de fuerza de los componentes a unir con los pernos y el punto de aplicación de la fuerza.

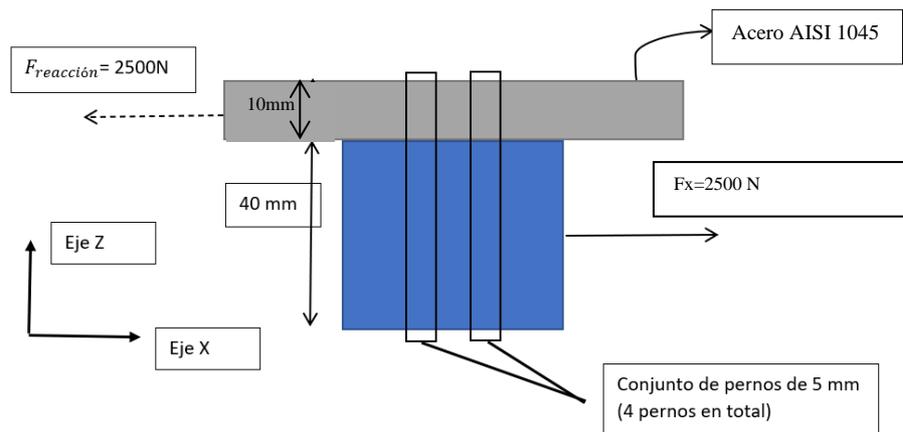


Figura 5. Diagrama de fuerza de la unión del perno con sus miembros

Descripción: En el diagrama se observa la junta entre el bloque principal y la plataforma con los pernos y la fuerza aplicada con su respectiva fuerza de reacción

En el diagrama de fuerzas se puede observar que los pernos van a estar sometidos a un esfuerzo cortante. Se comienza definiendo las características del perno según su diámetro. En la tabla 8-1 del libro de Shigley se encuentra el paso (p), área según esfuerzo de tensión (A_t) y área de diámetro menor (A_r) dependiendo de su diámetro y su paso (fino, grueso, etc.). Una buena recomendación y usada muy común en la actualidad es escoger un perno con paso grueso. Dada las anteriores características, se resume en la siguiente elección (Budynas, Nisbett, & Shigley, 2011).

Tabla 2. Características del perno seleccionado

Diámetro nominal mayor d (mm)	Paso grueso		
	Paso p (mm)	Área según esfuerzo de tensión A_t (mm)	Área de diámetro menor A_r (mm)
5	0.8	14.2	12.7

(Budynas, Nisbett, & Shigley, 2011)

Descripción: Características definitorias del perno a emplear para uniones entre componentes del sensor de fuerza

Lo siguiente es poder definir la longitud del perno que vamos a utilizar mediante la siguiente formula. Un perno bien diseñado lleva arandelas en sus dos extremos, una tuerca que permite ajustarlo (regular hexagonal) y dejar un mínimo de dos veces el paso después de la tuerca. En este caso, los materiales que van a ajustar son el grosor de la plataforma de Acero AISI 1045 (10 mm) y la altura del bloque del cubo (40 mm).

$$L = G_m + 2 * (G_a) + H_t + 2 * (p)$$

- Nomenclatura para cálculo de longitud del perno:

L=Longitud total del perno

G_m =Grosor de los materiales= 10 mm + 40 mm = 50 mm

G_a = Grosor de la arandela = 1.75 mm (seleccionando una arandela 5R en la tabla A-33)

(Budynas, Nisbett, & Shigley, 2011)

Ht = altura de la tuerca = 4.7 mm (para un tamaño nominal M5 en la tabla A – 31)

(Budynas, Nisbett, & Shigley, 2011)

p = paso = 0.8 mm

$$L = 50 \text{ mm} + 2 * (1.75 \text{ mm}) + 4.7 \text{ mm} + 2 * (0.8 \text{ mm}) = 59.8 \text{ mm}$$

En la tabla A-17, se escoge una longitud nominal estandarizada de 60 mm para la longitud L del perno.

$$L = 60 \text{ mm}$$

En la tabla 8-11 del libro, se escoge la clase ISO 4.6 por su diámetro M5 con una fuerza de prueba mínima $S_p = 225 \text{ MPa}$, esfuerzo último a la tensión de $S_{ut} = 400 \text{ MPa}$, esfuerzo de fluencia $S_{y_{bolt}} = 240 \text{ MPa}$ y esfuerzo de fluencia cortante $S_{s_{y_{bolt}}} = 0.577 * (240 \text{ MPa}) = 138.48 \text{ MPa}$ (Budynas, Nisbett, & Shigley, 2011). El estudio se lo realiza con la sección de grosor menor de la unión. En este caso es el acero AISI 1045 con esfuerzo de fluencia $S_{y_{member}} = 450 \text{ MPa}$ y esfuerzo último en tensión $S_{ut_{member}} = 565 \text{ MPa}$ (Matweb, 2022).

- Estudio de esfuerzo cortante en los pernos

El primer caso pertenece si la parte roscada se encuentra en el plano cortante y el segundo caso es cuando el plano cortante no tiene parte roscada.

- Plano cortante sin parte roscada

$$\tau = \frac{F}{A_s} = \frac{2500 \text{ N}}{4 * \left(\frac{\pi d^2}{4}\right)} = \frac{2500 \text{ N}}{\pi * (5 \text{ mm})^2} = 31.83 \text{ MPa}$$

τ = Esfuerzo cortante (MPa)

A_s = Area del plano cortante (mm^2)

$$n = \frac{S_{sybolt}}{\tau} = \frac{138.48 \text{ MPa}}{31.83 \text{ MPa}} = 4.35$$

S_{sybolt} = Esfuerzo cortante de fluencia – perno (MPa)

- Plano cortante con parte roscada

$$\tau = \frac{F}{A_r} = \frac{2500\text{N}}{196.85\text{mm}^2} = 12.7 \text{ MPa}$$

A_r = Area de diametro menor (mm^2) – tabla 8 – 1 (Budynas, Nisbett, & Shigley, 2011)

$$n = \frac{S_{sybolt}}{\tau} = \frac{138.48 \text{ MPa}}{12.7 \text{ MPa}} = 10.9$$

Los cálculos demuestran que el perno pasa todos los tipos de falla mencionados al tener factores de seguridad superiores a 1. A continuación, se muestra un diagrama del perno dentro de la unión con motivos de ejemplificar al mismo ya ensamblado.

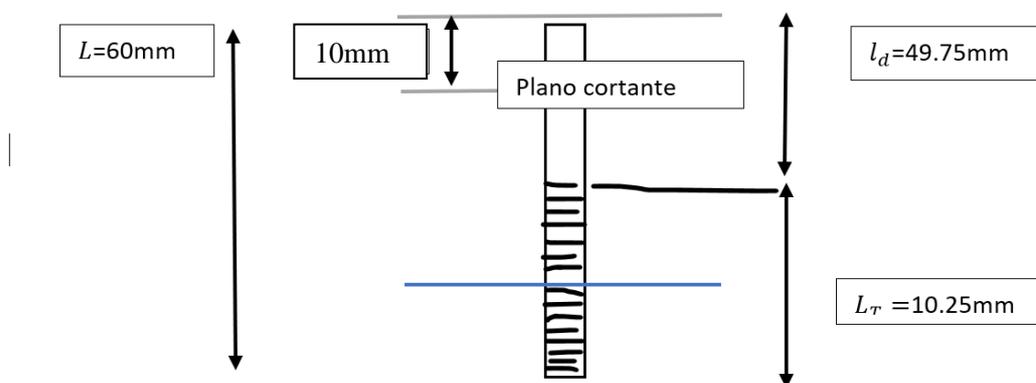


Figura 6. Parte del perno dentro de la unión

Descripción: En el diagrama se puede observar la parte del perno dentro de la unión entre la plataforma y el bloque principal a manera de esquema representativo que facilite la comprensión de los cálculos

$$L_T = 2 * (d) + \frac{1}{4}$$

$$L_T = 2 * (5) + \frac{1}{4}$$

$$L_T = 10.25\text{mm}$$

$$l_d = L - L_T = 60\text{mm} - 10.25\text{mm} = 49.75\text{mm}$$

l_d = parte sin rosca dentro de la union (mm)

L = Longitud total del perno (mm)

L_T = parte roscada del perno (mm)

1.4. Deflexión en la plataforma del sensor

En el caso de la plataforma es necesario encontrar la máxima deflexión de esta cuando una fuerza vertical máxima se aplica al borde. La plataforma se encuentra empernada al cubo del bloque principal a manera de transmitir totalmente la fuerza. En el siguiente diagrama por simplificación se omiten las vigas y el anillo exterior del bloque principal del sensor.

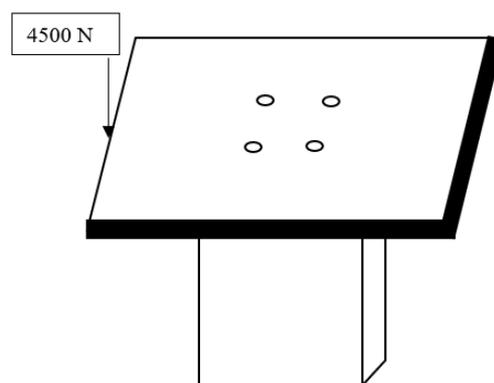


Figura 7. Plataforma con carga máxima en un extremo en unión al bloque sin tomar en cuenta detalles como las vigas y el anillo exterior del bloque principal

Descripción: Se considera una carga en el extremo de la placa como caso crítico para evaluar deflexión máxima. La plataforma por recomendación del cliente debe tener unas dimensiones de 27 cm X 27 cm de sección frontal

Suposiciones:

- Se secciona la placa hasta la zona de apoyo al bloque que se encuentra emperrado a la plataforma y se simplifica la estructura como una viga en voladizo.
- Se considera que la placa está elaborada de acero AISI 1045 y tiene propiedades constantes a lo largo de su geometría

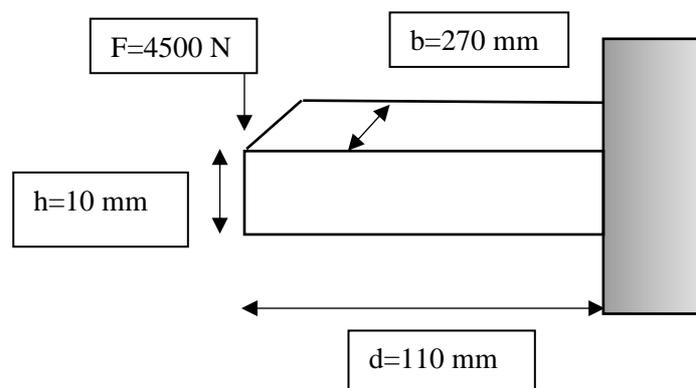


Figura 8. Representación del extremo libre de la plataforma como una viga en voladizo para simplificación en cálculos

Descripción: Se considera una carga en el extremo de la placa como caso crítico a analizar para evaluar la deflexión máxima y estudiar la distancia que se puede dejar de separación entre el anillo exterior del bloque principal y el extremo de la plataforma.

- Datos:

$$F = 4500 \text{ N}$$

$$d = 110 \text{ mm}$$

$$c = 5 \text{ mm}$$

$$b = 270 \text{ mm}$$

$$h = 10 \text{ mm}$$

$E = 200 \text{ GPa}$ (propiedad de la aleación de acero AISI 1045) (Budynas, Nisbett, & Shigley, 2011)

$S_y = 450 \text{ MPa}$ (Matweb, 2022)

$$M = F \times d = 4500 \times d$$

$$\sigma_f = \frac{M \times c}{I}$$

$$I = \frac{1}{12} \times b \times h^3$$

$$c = \frac{h}{2}$$

$$\sigma = \frac{M \times c}{I} = \frac{4500 \times d \times \frac{h}{2}}{\frac{1}{12} \times b \times h^3} = 110 \text{ MPa (Beer, 2009)}$$

- Factor de seguridad con teoría del esfuerzo máximo

$$n = \frac{S_y}{\sigma_f} = \frac{450 \text{ MPa}}{110 \text{ MPa}} = 4.09$$

Para encontrar la máxima deflexión para el extremo de la plataforma se considera la tabla de deflexión de vigas del apéndice C del libro de Mecánica de Materiales de Hibbeler:

$$y_{\max} = -\frac{F \times d^3}{3 \times E \times I} = -\frac{4500 \times d^3}{3 \times E \times \frac{1}{12} \times b \times h^3} \quad (\text{Hibbeler, 2018})$$

$$y_{\max} = -0.44 \text{ mm}$$

1.5. Cálculos de circuitos electrónicos y puentes de Wheatstone

Datos:

- $V_{\text{in}} = 9 \text{ V}$
- $GF=2$ (Para una galga SGD-7/350-LY41)
- $R_n=350 \Omega$ (Para una galga SGD-7/350-LY41)
- Cálculos de voltajes de salida en los puentes de Wheatstone

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} = 2 = \frac{\Delta R/350}{\varepsilon} \quad (\text{Idrovo \& Quintanilla, 2010})$$

$$700 = \frac{\Delta R}{\varepsilon}$$

Se aplica fuerzas y momentos independientes en los seis grados de libertad. Luego mediante cálculos mecánicos se busca la deformación longitudinal en las 16 galgas que componen los 6 puentes de Wheatstone, buscando los grupos de 4 deformaciones en las galgas de un puente asociadas a la aplicación individual de cargas en cada eje. Con dichas deformaciones se determina teóricamente con la ecuación antes definida las variaciones en la resistencia para cada galga y se calculan los voltajes teóricos de salida de un solo puente cuando

se aplica una carga máxima en un eje de interés y los voltajes de salida se calculan considerando un total desacoplamiento entre las deformaciones registradas por cada puente.

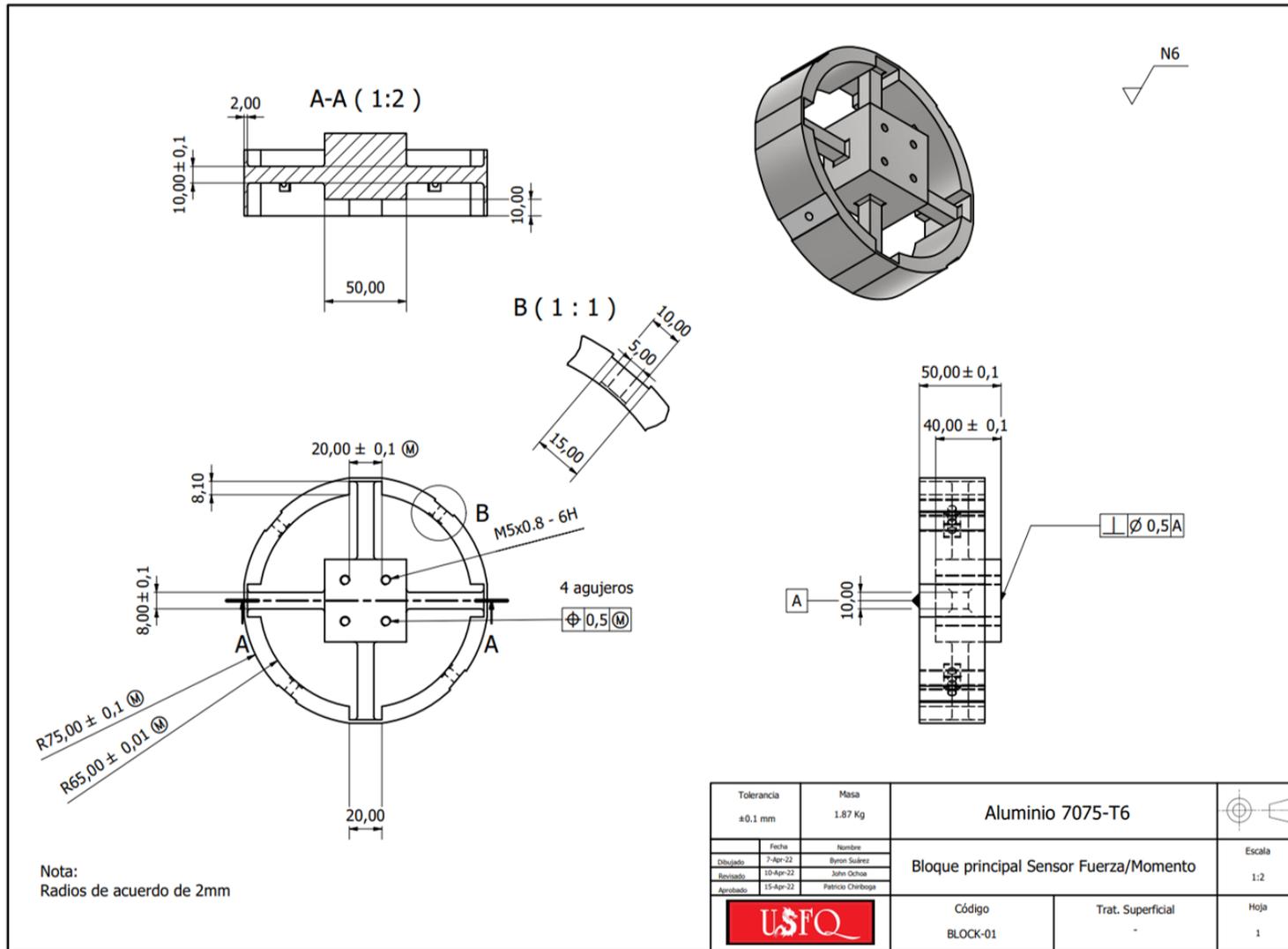
$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \left(\frac{R_n(\Delta R_2 - \Delta R_1 + \Delta R_3 - \Delta R_4) + (\Delta R_2 \times \Delta R_3 - \Delta R_1 \times \Delta R_4)}{4R_n^2 + 2R_n(\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3 + \Delta R_4) + (\Delta R_1 + \Delta R_2)(\Delta R_3 + \Delta R_4)} \right)$$

(Idrovo & Quintanilla, 2010)

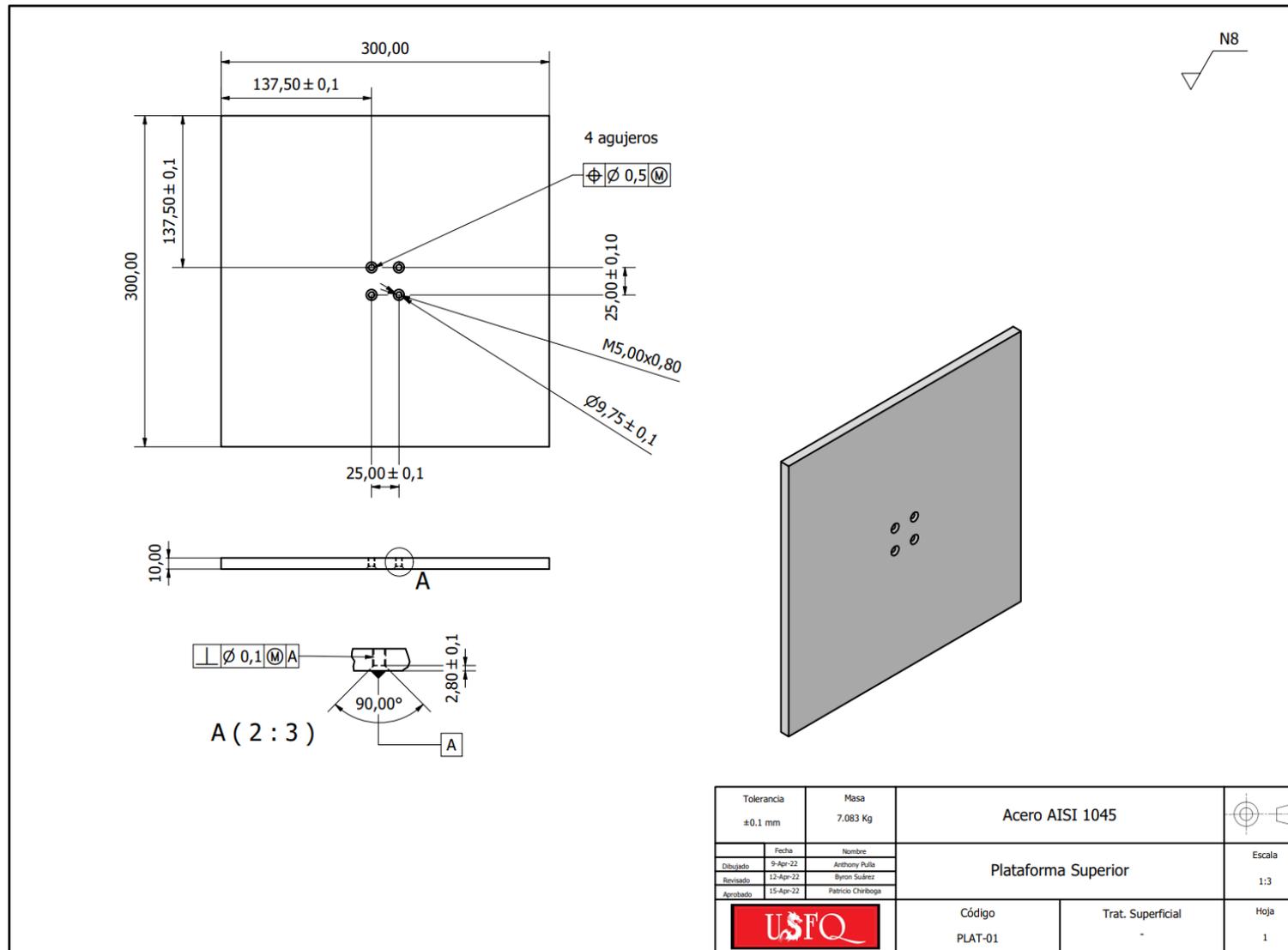
$$V_{\text{out}} = 9V \left(\frac{350 \times (\Delta R_2 - \Delta R_1 + \Delta R_3 - \Delta R_4) + (\Delta R_2 \times \Delta R_3 - \Delta R_1 \times \Delta R_4)}{122500 + 700(\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3 + \Delta R_4) + (\Delta R_1 + \Delta R_2)(\Delta R_3 + \Delta R_4)} \right)$$

A manera de encontrar las variaciones en la resistencia para cada puente se consideran las deformaciones a obtener a través de las simulaciones, lo cual es la siguiente parte que será desarrollada para el proyecto.

ANEXO I: Plano del bloque principal del sensor de fuerza/momento

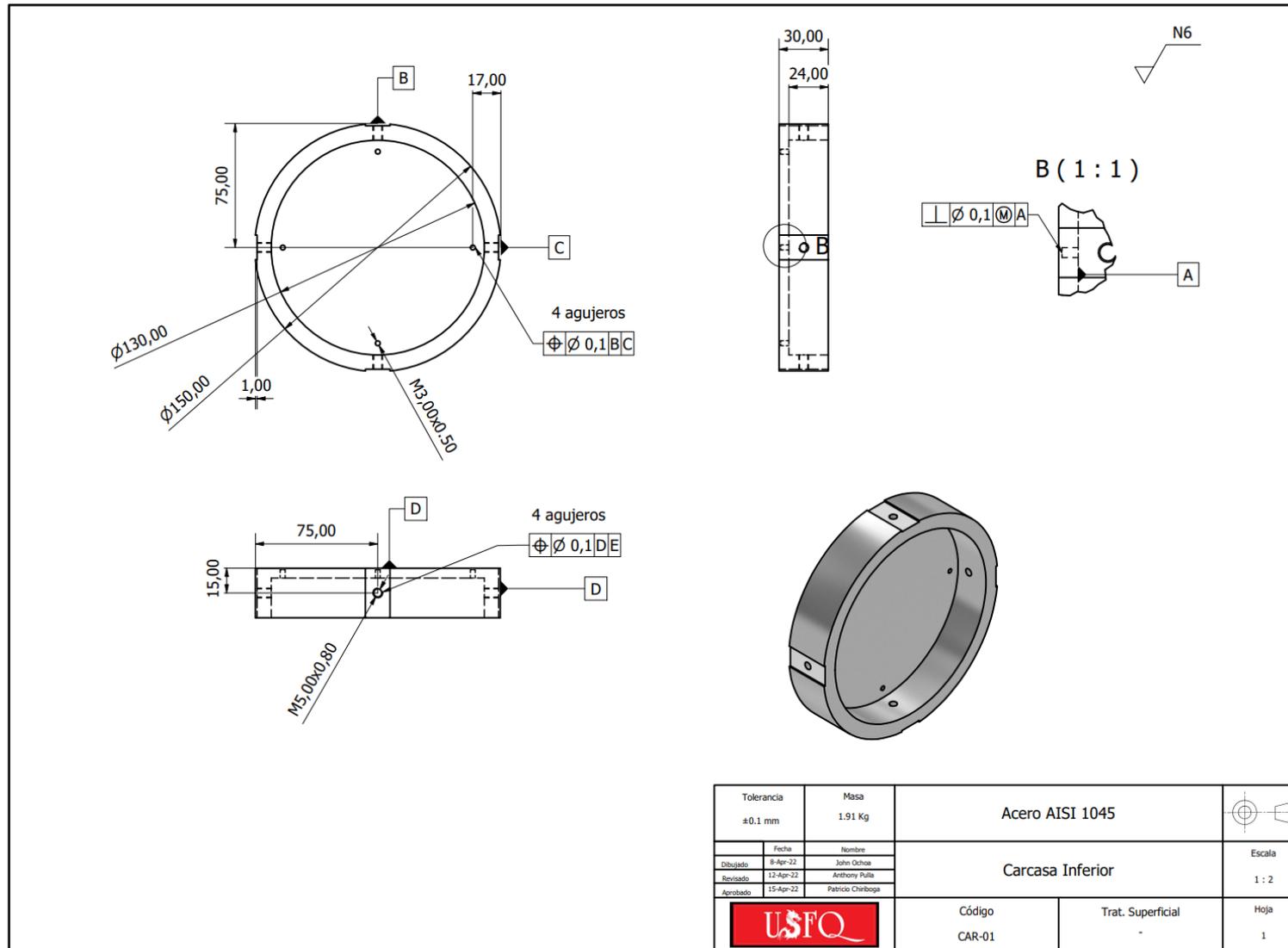


ANEXO J: Plano de la plataforma superior

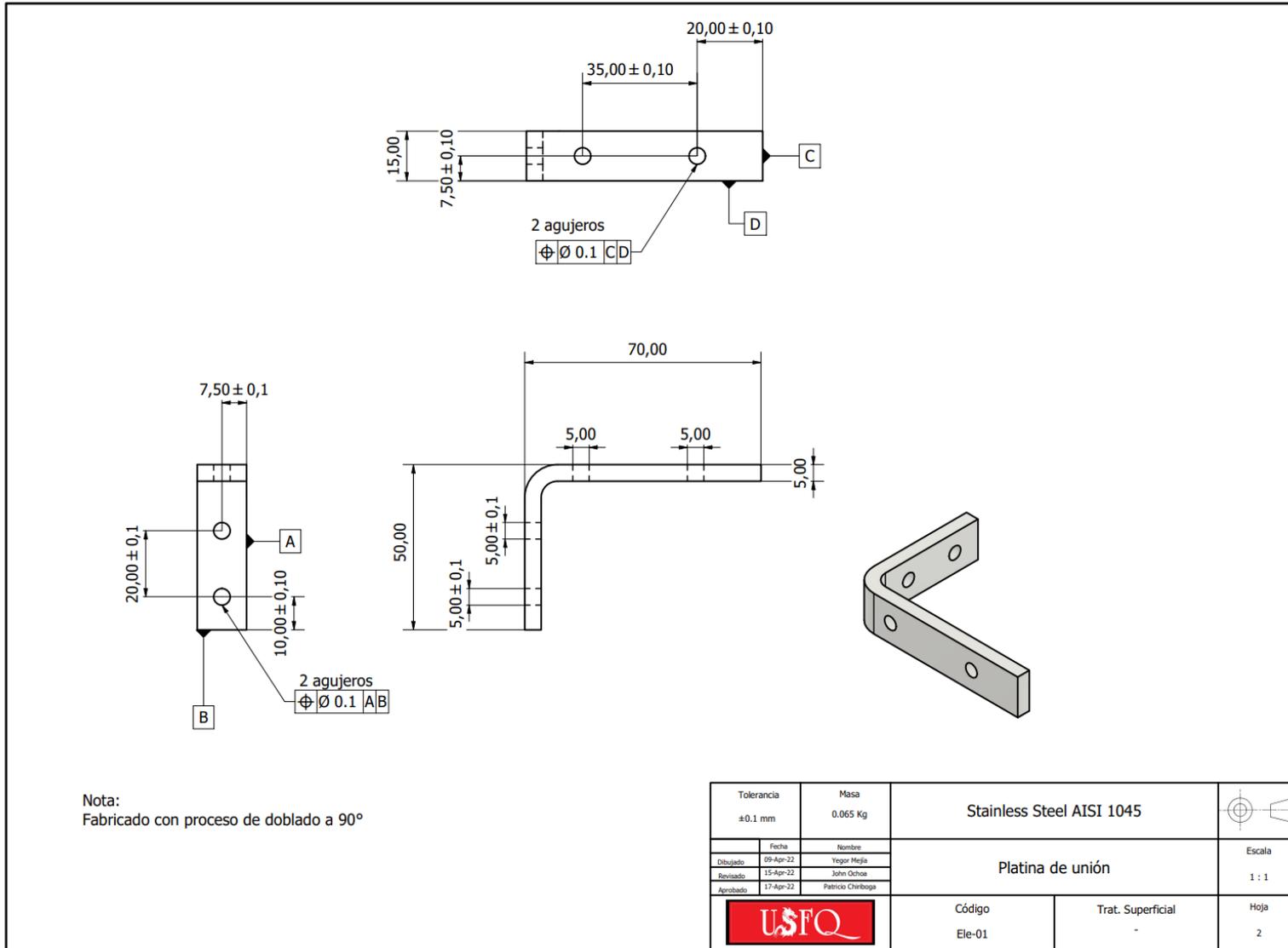


Tolerancia ±0.1 mm	Masa 7.083 Kg	Acero AISI 1045	
Dibujado 9-Abr-22 Revisado 13-Abr-22 Aprobado 15-Abr-22	Fecha Nombre Anthony Palla Byron Salazar Patricio Chiriboga	Plataforma Superior	Escala 1:3
		Código PLAT-01	Trat. Superficial - Hoja 1

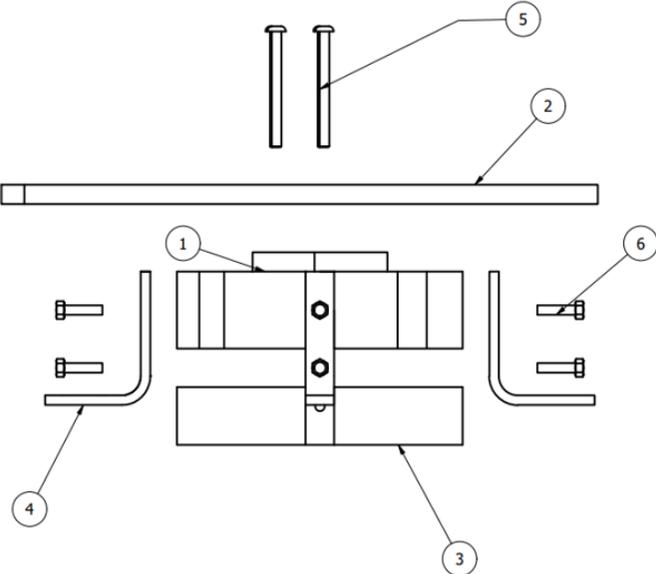
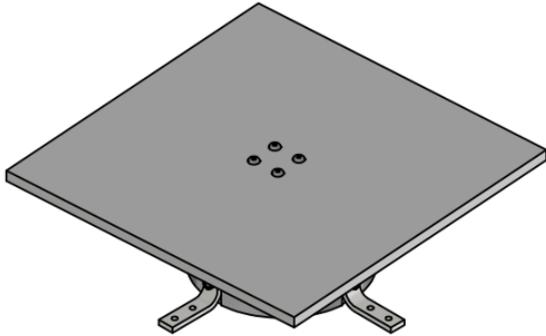
ANEXO K: Plano de la carcasa inferior



ANEXO L: Plano de las platinas de unión



ANEXO M: Plano de conjunto del sensor fuerza/momento

PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Bloque principal del sensor	Bloque principal con centro cúbico, cuatro vigas y anillo exterior cilíndrico
2	1	Plataforma Superior	Plataforma de presión (centro cúbico)
3	1	Carcasa Inferior	Carcasa de almacenamiento de componentes electrónicos
4	4	Platinas de unión	Platinas para unir bloque principal con carcasa inferior y fijar al piso
5	4	ANSI B18.3.4M - M5 x 0.8 x 60, BHSBHCSM	Broached Hexagon Socket Button Head Cap Screw - Metric
6	8	AS 1427 - M5 x 20	ISO metric machine screws

Dimensiones generales 30cmX30cmX10cm		Masa 12.84 Kg	Maquinaria requerida para desmontaje: No	
Fecha		Nombre		Escala 1 : 2
Dibujado 10-Abr-22		Byron Suárez		
Revisado 14-Abr-22		Anthony Palla		
Aprobado 15-Abr-22		Patricio Chiriboga		
		Código SENS-F-T-01	Trat. Superficial -	Hoja 1

ANEXO N: Bitácora de reuniones con el cliente para definición del proyecto

A continuación, se detallan las reuniones llevadas a cabo con el cliente (Paul Arauz- Profesor a tiempo completo de Ingeniería Mecánica de la USFQ) tanto de manera presencial como por vía telemática (Zoom) a manera de definir aspectos del sensor de fuerza/torque a ser tomados en cuenta durante el desarrollo del proyecto:

1. Reunión del 28 de enero del 2022. (Vía Zoom)

Tema tratado: Explicación de los objetivos del proyecto más recomendación de papers académicos para lectura y comprensión del funcionamiento de un sensor de fuerza/torque.

2. Reunión del 3 de marzo del 2022. (Vía Zoom)

Tema tratado: Presentación y discusión de metodología empleada en el software de elementos finitos ABAQUS para la determinación de las posiciones de las galgas extensiométricas y la obtención de deformaciones en dichas posiciones.

3. Reunión del 14 de marzo del 2022. (Reunión presencial)

Tema tratado: Presentación de avances en simulaciones de ABAQUS y explicación del diseño propuesto para el sensor de fuerza/torque

4. Reunión del 24 de marzo del 2022. (Reunión presencial)

Tema tratado: Consulta respecto a la metodología para la obtención de la matriz de calibración del sensor y su utilidad

5. Reunión del 5 de abril del 2022. (Reunión presencial)

Tema tratado: Consulta respecto a modificaciones en la geometría de las vigas para maximización de la lectura de deformaciones

6. Reunión del 11 de abril del 2022. (Vía Zoom)

Tema tratado: Presentación de la matriz de deformaciones, matriz de calibración y error de

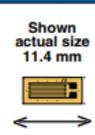
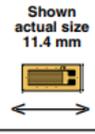
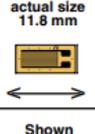
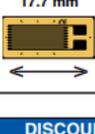
acoplamiento para el bloque principal del sensor a manera de obtener el visto bueno para proceder con la creación de planos e iniciar la manufactura del sensor

7. Reunión del 4 de mayo del 2022. (Reunión Presencial)

Tema tratado: Experimentación para evaluación de la calidad del prototipo del sensor construido a través de la carga de fuerzas y momentos conocidos

ANEXO O: Especificaciones de las galgas extensiométricas incluidos detalles de la galga SGD-7/350-LY41

PRECISION STRAIN GAGE PRECISION LINEAR PATTERN FOR STATIC AND DYNAMIC APPLICATIONS

To Order										
GAGE PATTERN <small>Leads not shown</small>	MODEL NO. <small>Pkg of 10</small>	NOM. RESIS- TANCE (Ω)	DIMENSIONS mm (inch) [†]				MAX V* (Vrms)	TERMINATION	TEMP COMP	TERM PAD
			GRID		CARRIER					
			A	B	C	D				
	SGD-6/120-LY11	120	6.50 (0.256) 3.10 (0.122) 11.40 (0.449) 5.10 (0.201) Linear pattern, medium size 120 Ω	9	Ribbon Leads	ST	BTP-4			
	SGD-6/120-LY13	120			12	Ribbon Leads		AL		
	SGD-6/120-LY41	120			9	Solder Pads		ST		
	SGD-6/120-LY43	120			12	Solder Pads		AL		
	SGD-7/350-LY11	350	6.50 (0.256) 3.10 (0.122) 11.40 (0.449) 5.10 (0.201) Linear pattern, medium size 350 Ω	15	Ribbon Leads	ST	BTP-5			
	SGD-7/350-LY13	350			20	Ribbon Leads		AL		
	SGD-7/350-LY41	350			15	Solder Pads		ST		
	SGD-7/350-LY43	350			20	Solder Pads		AL		
	SGD-7/1000-LY11	1000	7.00 (0.276) 3.60 (0.142) 11.80 (0.465) 5.60 (0.220) Medium size, higher resistance, reduced heat generation 1000 Ω	27	Ribbon Leads	ST	BTP-5			
	SGD-7/1000-LY13	1000			37	Ribbon Leads		AL		
	SGD-7/1000-LY41	1000			27	Solder Pads		ST		
	SGD-7/1000-LY43	1000			37	Solder Pads		AL		
	SGD-10/120-LY11	120	10.00 (0.394) 4.90 (0.193) 17.70 (0.697) 8.00 (0.315) Linear pattern, Large size 120 Ω	14	Ribbon Leads	ST	BTP-5			
	SGD-10/120-LY13	120			19	Ribbon Leads		AL		
	SGD-10/120-LY41	120			14	Solder Pads		ST		
	SGD-10/120-LY43	120			19	Solder Pads		AL		



DISCOUNT SCHEDULE	
1 to 10 pkgs.	Net
11 to 24 pkgs.	5%
25 to 49 pkgs.	10%
50 and up and OEM . .	Consult Factory

* Maximum permitted bridge energizing voltage (Vrms).
Note: For strain gage accessories visit us online.
Ordering Example: SGD-6/120-LY13, 6.5 mm grid,
 120 Ω nominal-resistance strain gage.

NOTE:
ST = Steel
AL = Aluminum

**Custom-Designed
Strain Gages
Available!**
 No Minimum Quantities.
 Consult Engineering.

BONDABLE TERMINAL PADS

When installing strain gages with ribbon leads or solder pads, use Bondable Terminal Pads (BTP) between the strain gage and the wires to your instrumentation.

The Bondable Terminal Pads provide a large easy to use soldering area and provide strain relief between the strain gage and the heavy instrument wires.

Using Bondable Terminal Pads is simple. Use the same adhesive and bonding procedure on the Bondable Terminal Pads as you use on the strain gage.

OMEGA offers BTPs in several sizes and wiring configurations to fit most all strain gage applications.

Terminal pad patterns.



BTP



BTPD



BTPC

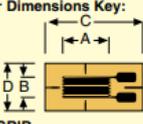


BTPB



BTPE

† Dimensions Key:



GRID
A: Active gage length
B: Active gage width
CARRIER
C: Matrix length
D: Matrix width

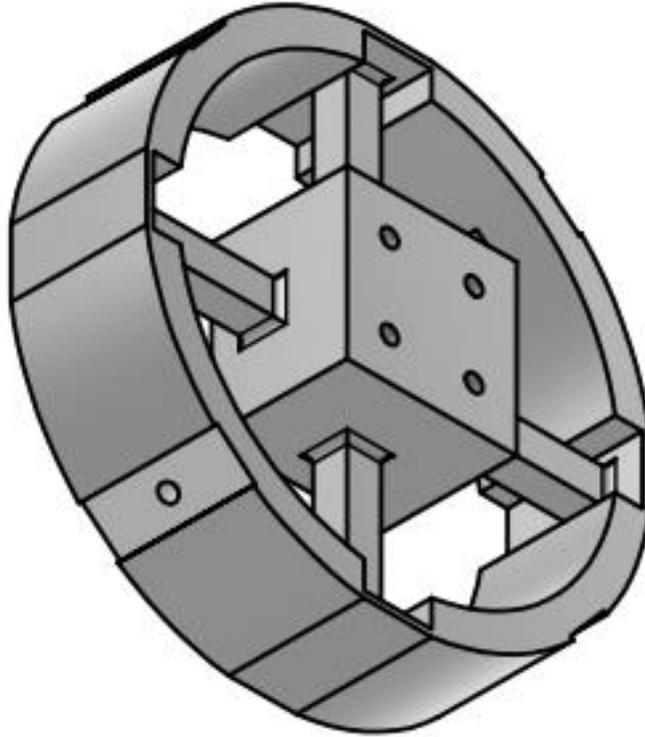
E-18

STRAIN GAGES

**ANEXO P: Manual de operación y mantenimiento del sensor de
fuerza/torque**

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

**MANUAL DE INSTRUCCIONES SENSOR DE FUERZA/MOMENTO DE 6
GRADOS DE LIBERTAD**



Realizado: Byron Suarez

Revisado: John Ochoa y Yegor Mejía

Editorial: UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Última edición: 3/5/2022

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

El presente es un sensor de fuerza/momento de seis grados de libertad. El mismo consta de: una plataforma para la aplicación directa de cargas (fuerzas o momentos), un bloque principal cuyo diseño permite la operatividad del sensor (explicación de funcionamiento reservada por temas de confidencialidad), una carcasa almacenadora del circuito electrónico y el respectivo circuito asociado al sensor. El mismo cumple con la función de ser útil para investigaciones en las que se requiera conocer en tiempo real fuerzas y momentos aplicados. Para más información respecto al uso del sensor y su mantenimiento por favor leer con atención el presente manual.

INDICACIONES DE SEGURIDAD

- A quien va dirigido: personal experto autorizado con experticia en temas como: Biomecánica, Robótica y Electrónica.

Todas las acciones descritas en este manual de instrucciones sólo deberán ser realizadas por personal experto debidamente formado y autorizado por el usuario del sensor. Sólo instale y ponga en servicio el equipo tras haber leído y entendido el manual de instrucciones y conocer las normas sobre seguridad laboral y prevención de accidentes. El presente sensor tiene uso exclusivo para investigaciones en las que se requieran medir en tiempo real fuerzas y momentos en los seis grados de libertad

INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD GENERAL



Respete las indicaciones de este manual de instrucciones. El uso inadecuado o distinto al previsto, así como cualquier manipulación puede acarrear un funcionamiento erróneo del equipo. En consecuencia, se pueden causar daños materiales y/o personales durante el funcionamiento. Por este motivo, deben respetarse todas las

indicaciones de manejo del equipo descritas en este documento. Para más información, observar las instrucciones correspondientes de la norma ISO 14119.

- El fabricante queda excluido de toda responsabilidad y garantía en caso de incumplimiento de indicaciones o de normas, en particular por manipulaciones y/o modificaciones en el equipo. Tampoco asume responsabilidad alguna por daños derivados del uso de piezas de recambio o accesorios no autorizados.
- Los fallos causados por daños no pueden ser detectados por el sensor.
- El equipo solamente puede ser utilizado según las indicaciones dadas.
- Mantener alejados de niños menores de 10 años.
- Equipo extremadamente pesado, mantener cuidado al transporte.
- Al manipular el equipo, cortar suministro eléctrico.
- Dispositivo con aristas vivas, transportar con EPP adecuado (guantes de protección).

RECOMENDACIONES PREVIO AL USO

- Anclar el sensor a una superficie plana con el uso de pernos M5x0.8 a conectarse en los orificios roscados de las platinas en forma de “L”, previo a su funcionamiento. Verificar que el sensor se encuentre completamente fijo (empotrado)
- La fuerza/momento debe ser aplicada en la plataforma superior y no en otras partes del sensor.
- No girar la perilla de los potenciómetros del circuito al encontrarse los mismos configurados para otorgar una resistencia eléctrica fija de 350 Ohmios
- El sensor de fuerza/momento de 6 grados de libertad ha sido diseñado para detectar fuerzas y momentos en todos los ejes (“X”, “Y”, “Z”).
- La fuerza aplicada en los ejes “X” y “Y” no puede superar los 2500 Newtons [N] para evitar fallas en la estructura del sensor

- La fuerza aplicada en el eje Z no puede superar los 4500 Newtons [N] para evitar fallas en la estructura del sensor
- El momento aplicado en los ejes “X”, “Y” y “Z” no puede superar los 100 Newtons por metro [N*m] para evitar fallas en la estructura del sensor.
- El sensor debe estar alejado de residuos como polvo, ya que puede afectar en la precisión o incluso dañar el equipo.
- Se sugiere usar el equipo en lugares con baja humedad para evitar errores de medición.
- Utilizar el equipo en lugares estáticos sin vibraciones producidas por efectos externos para que los valores medidos sean lo más exactos posibles.

PASOS PARA USO DEL SENSOR

1. Verificar que el sensor se encuentre totalmente fijo al piso y tomar en cuenta todas las condiciones indicadas en la sección de “RECOMENDACIONES PREVIAS AL USO” del presente manual.
2. Conectar el sensor a una fuente de 9V y conectar los cables de salida de voltaje de los puentes de Wheatstone (cables de color amarillo) a un módulo de entrada de voltaje de la serie C como puede ser el módulo “NI 9206 CARD” (no incluido con el presente sensor fuerza/torque).
3. Los “outputs” del presente sensor son voltajes por lo que se debe conectar el mismo al módulo de entrada de voltaje a un computador con el software MATLAB para visualizar en tiempo real las señales dadas por el sensor al medir fuerzas y momentos pudiendo reconocer los voltajes generados durante la aplicación de diferentes cargas sobre el sensor.

4. Aplicar fueras y momentos sobre la plataforma del sensor en la dirección que se desee tomando en consideración los rangos máximos de fuerzas y momentos que el sensor puede medir en cada eje.
5. Visualizar la señal de voltajes generados y de cargas (fuerzas y momentos) con el uso del software MATLAB al cargar el sensor fuerza/torque.

MANTENIMIENTO

Para realizar un correcto mantenimiento se deben seguir las siguientes indicaciones:

- Desconectar el equipo de la fuente de energía.
- Para la limpieza del exterior del sensor utilizar un paño suave húmedo, no utilizar productos de limpieza, detergentes, etc.
- Asegurarse que la placa electrónica se mantenga limpia y que ningún componente se encuentre en mal estado.
- Si se encuentra algún residuo en la placa electrónica utilizar alcohol isopropílico para su limpieza.
- Asegurarse que el sensor este seco. La presencia de líquidos dañará gravemente el sensor.
- Revisar la continuidad en las uniones por cables mediante el uso de un multímetro
- Se debe medir la resistencia entre terminales de galgas para verificar que las mismas se encuentre funcionales.
- Verificar que las galgas estén alineadas correctamente, caso contrario usar disolvente de pegamento y reposicionar las galgas.
- Verificar con el uso de un multímetro que entre las terminales de los potenciómetros se mida exactamente una resistencia de 350 Ohmios.
- El sensor puede descalibrarse debido al uso elevado, por lo que se recomienda realizar una calibración cada 6 meses con el fabricante.

- En caso de identificar fallas en el funcionamiento del sensor por favor contactarse directamente con el fabricante.
- El mantenimiento de todos los aspectos anteriormente detallados se recomienda llevarlo a cabo cada 3 meses o cada que sea necesario al observar una falla en el funcionamiento normal del sensor.

TRANSPORTE DEL PRODUCTO

Para transportar correctamente el producto se deben seguir las siguientes indicaciones:

- Proteger el sensor para que no sufra golpes durante su transporte. Para esto utilizar material de embalaje como espuma de polietileno, papel burbuja o cojines de aire que tengan un grosor superior a 50 mm.
- Cubrir por completo todo el sensor y tratarlo como contenido frágil.
- Verificar que el sensor no se encuentre conectado a una fuente de voltaje
- Colocar el sensor envuelto en material de embalaje en una caja de cartón o de madera para facilitar su transporte mediante vehículos.
- Revisar la integridad del sensor siguiendo las indicaciones de la sección de “MANTENIMIENTO” y realizando una prueba de uso del sensor siguiendo las instrucciones de la sección de “PASOS PARA USO DEL SENSOR” al enviar y recibir el sensor para verificar que el mismo se encuentre completamente funcional.

LISTA DE PARTES ESTRUCTURALES

1. Bloque principal
2. Plataforma superior
3. Carcasa inferior
4. 4 platinas de Unión
5. 4 pernos ANSI B18.3.4M – M5 x 0.8 x 60
6. 8 pernos AS 1427 – M5 x 20

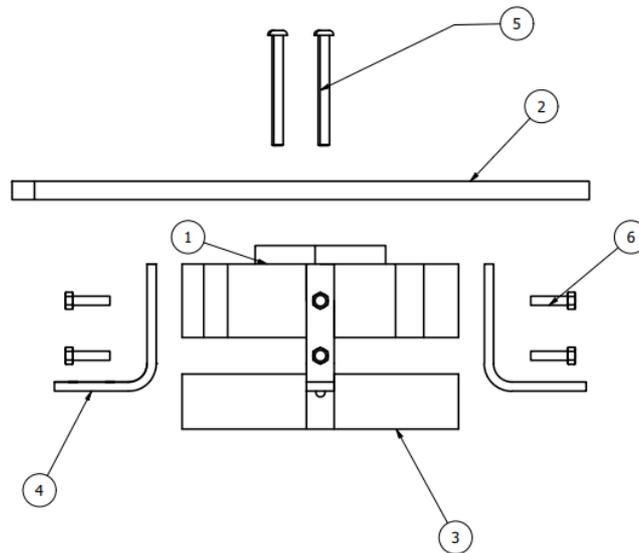


Figura 1. Diagrama del sensor fuerza/torque con sus componentes

LISTA DE PARTES ELECTRÓNICAS

1. 16 galgas extensiométricas tipo SGD-7/350-LY41
2. 8 potenciómetros de precisión fijados en 350 Ohmios
3. Cables de conexión del circuito