

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Desarrollo y diseño de un sensor de fuerza/momento de 6 grados de libertad y construcción del prototipo de calibración para aplicaciones de Biomecánica

Daniel Israel Flores Llanos

Juan Carlos Ramos Rosero

Christian Erian Rosero Andrade

Luis Fernando Velasco Venegas

Ingeniería Mecánica

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

Ingenieros Mecánicos

Quito, 21 de diciembre del 2022

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN

DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

Desarrollo y diseño de un sensor de fuerza/momento de 6 grados de libertad y construcción del prototipo de calibración para aplicaciones de Biomecánica

Daniel Israel Flores Llanos

Juan Carlos Ramos Rosero

Christian Erian Rosero Andrade

Luis Fernando Velasco Venegas

Nombre del profesor, Título académico

Patricio Chiriboga, PhD. Vibraciones,

Delft University of Technology

Quito, 21 de diciembre 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: Daniel Israel Flores Llanos
Código: 00209307
Cédula de identidad: 0502904527
Lugar y fecha: Quito, 21 de diciembre del 2022

Nombres y apellidos: Juan Carlos Ramos Rosero
Código: 00208226
Cédula de identidad: 1754683405
Lugar y fecha: Quito, 21 de diciembre del 2022

Nombres y apellidos: Christian Erian Rosero Andrade

Código: 00207709

Cédula de identidad: 1718615048

Lugar y fecha: Quito, 21 de diciembre del 2022

Nombres y apellidos: Luis Fernando Velasco Venegas

Código: 00209676

Cédula de identidad: 1719343954

Lugar y fecha: Quito, 21 de diciembre del 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

Este proyecto tiene como objetivo el desarrollo y diseño de un sensor de fuerza/momento de 6 grados de libertad en conjunto con la construcción del prototipo de calibración con la finalidad de realizar aplicaciones de biomecánica en la USFQ. Para el desarrollo del proyecto se lleva a cabo un análisis de ingeniería inversa donde se parte del proyecto del sensor previamente desarrollado. En primera instancia, se realiza una prueba del equipo para realizar modificaciones y mejoras como: cambio de galgas extensiométricas, geometría de componentes y presentación de datos/resultados. Además de la implementación del prototipo de calibración el cual se conforma de una mesa de ajuste y una plataforma superior de medición. Posteriormente, mediante los requerimientos del proyecto de las fuerzas y momentos ($F_x = F_y = 2500N, F_z = 4500N, M_x = M_y = M_z = 100Nm$) se realizan los cálculos estructurales de juntas empernadas, soldadas y puntos críticos, así como simulaciones de esfuerzos y factores de seguridad. A continuación, se realizaron los circuitos electrónicos del puente de Wheatstone y los amplificadores operacionales mediante el programa PROTEUS 8, de esta manera se aseguró que al momento de simular dichos circuitos van a cumplir con sus funciones respectivas. De esta manera, una vez fabricados los elementos mecánicos y electrónicos se procedió a realizar las simulaciones y conexiones con el DAQ con esto se realizó una interfaz para obtener datos de diferencia de voltaje con respecto al tiempo para después extrapolar los resultados y obtener las gráficas de diferencial de voltaje y carga aplicada. Una vez que el programa reciba los datos de los amplificadores se realizaron las pruebas de calibración mediante el prototipo construido. Los resultados de estos fueron gráficas con un comportamiento lineal creciente ya que se aplicaron cargas progresivas. Además, en cuanto a la resolución se tienen respuestas variables dependiendo el eje

ya que se tienen dos ejes rígidos "x" "y" y un eje sensible "z", de esta manera la resolución de estos es de 0.3 V/kg por cada 2.5 kg para el eje "z", mientras que para el eje "x" "y" es 0.01 V/kg y 0.5 V/kg por cada 10 kg respectivamente. Algunas de las recomendaciones que se plantean son: encontrar un acople de forma directa al DAQ para mejorarlo, estudiar más diseños acerca de la estructura correcta del sensor para una respuesta mejor, establecer una manera más sencilla de reducir el tamaño de las conexiones y componentes externos del sensor con el propósito de determinar una visualización más profesional y medir en tiempo real el punto de aplicación exacto en la placa superior para obtener vectores de fuerza/momento combinadas.

PALABRAS CLAVE

Sensor de fuerza: Dispositivo electrónico que permite detectar cambios por señales externas proporcionales a una fuerza para responder de una forma análoga/digital.

Fuerza: Magnitud vectorial ejercida sobre un objeto con la capacidad de cambiar su comportamiento o modificar el estado de este ya sea mediante movimiento o deformación.

Momento: Magnitud vectorial ejercida sobre un objeto con brazo de palanca generando una rotación sobre un eje o punto.

Esfuerzo: Magnitud física producida por una fuerza aplicada sobre un área transversal de un cuerpo.

Galga extensiométrica: Tipo de sensor de resistencia eléctrica variable en presencia de deformación producida por una fuerza o momento.

Puente de Wheatstone: Circuito electrónico compuesto por cuatro resistencias eléctricas (usualmente una variable) para medir diferencia de voltaje y extrapolar resultados.

OPAM: Amplificador de señales electrónicas mediante una ganancia que depende del valor de su resistencia consta de dos entradas y una salida, es mejor conocido como amplificador operacional.

Biomecánica: Rama de la mecánica que estudia aspectos biológicos de un cuerpo como el movimiento cinético y cinemático del mismo.

Calibración: Proceso el cual confirma que la lectura arrojada por el instrumento de medición sea el mismo o similar al estándar de referencia.

Soldadura: Proceso para unir materiales (metales) mediante el uso de calor y corriente eléctrica lo cual implica un proceso de fundición para que dos o más piezas se acoplen.

Deformación: Alteración en la forma de un elemento físico como resultado de las tensiones internas causadas por las fuerzas externas aplicadas en el cuerpo como fuerza o momento.

ABSTRACT

The objective of this project is the development and design of a force/moment sensor of 6 degrees of freedom together with the construction of the calibration prototype to use it for biomechanics applications at USFQ. For the development of the project, a reverse engineering analysis is carried out starting from the previously designed sensor. In the first instance, a test of the equipment is made to make modifications and improvements such as: change of strain gauges, geometry of components and presentation of data/results. In addition to the implementation of the calibration prototype, which consists of an adjustment table and an upper measurement platform. Consequently, by means of the project requirements of the forces and moments ($F_x = F_y = 2500N, F_z = 4500N, M_x = M_y = M_z = 100Nm$) the structural calculations of bolted and welded joints and critical points, as well as stress simulations and safety factors are obtained.

KEY WORDS

Force sensor: Electronic device that allows to detect changes by external signals proportional to a force to respond in an analog/digital way.

Force: Vector magnitude applied to an object with the capacity to change its behavior or modify its state either by movement or deformation.

Moment: Vector magnitude applied to an object with a lever arm generating a rotation about an axis or point.

Stress: Physical quantity produced by a force applied on a cross-sectional area of a body.

Strain gauge: Type of sensor with variable electrical resistance in the presence of deformation produced by a force or moment.

Wheatstone bridge: Electronic circuit composed of four electrical resistors (usually one variable) to measure voltage different and extrapolate results.

OPAM: Amplifier of electronic signals by using a gain that depends on the value of its resistance, it consists of two inputs and one output, it is better known as operational amplifier.

Biomechanics: Branch of mechanics that studies biological aspects of a body such as its kinetic and kinematic motion.

Calibration: Process which confirms that the reading of the measuring instrument is the same of like the reference standard.

Welding: Process of joining materials (metals) using heat and electrical current, which involves a casting process so that two or more parts are joined together.

Deformation: Alteration in the shape of a physical element because of internal stresses caused by external forces applied to the body as a force or moment.

NOMENCLATURA**Unidades**

N: Newton

Pa: Pascal

Psi: libra por pulgada cuadrada

m: metro

mm: milímetro

Simbología

σ : *esfuerzo*

b: base

S_{ut} : *resistencia a la tracción*

M: momento

F: fuerza

S_y : *esfuerzo de fluencia*

c: distancia al plano neutro

h: espesor de la placa

Y: deflexión

E: módulo de Young

I_y : *inercia*

S_p : *fuerza de prueba*

F_p : carga de prueba

F_i : fuerza de precarga

k_a : factor modificador condición de superficie

k_b : factor modificador de tamaño

k_c : factor modificador de carga

k_d : factor modificador de temperatura

k_e : factor de confiabilidad

k_f : factor modificador de efectos misceláneos

S_e : límite de endurecimiento crítico en la geometría

S_e' : límite de endurecimiento de espécimen de prueba de haz rotatorio

η : factor de seguridad

n_l : factor de seguridad de carga

n_o : factor de seguridad de junta

n_p : factor de seguridad de cedencia

A_t : área sometida a tensión

A_r : área de diámetro menor

N : número de ciclos

fS_{ut} : fracción del esfuerzo último

t : espesor arandela

h_t : arandela + espesor de 1er cuerpo

l : espesor del material de unión

L : longitud total del tornillo

LT : longitud roscada

ld : longitud sin rosca

lt : porción de ajuste

A_T : área total

A_1 : área cuadrado exterior

A_2 : área cuadrado interior

A_e : área efectiva de la conexión soldada

$\bar{\tau}$: esfuerzo cortante

g : garganta del cordón

l_s : longitud de soldadura

TABLA DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN.....	22
	1.1 Requerimientos del proyecto.....	23
	1.2 Planeación del proyecto.....	25
2.	MATERIALES Y MÉTODOS	26
	2.1 Alternativas de diseño y selección.....	26
	Selección plataforma superior del sensor	26
	Selección OPAM	27
	Selección de Interfaz	29
	Selección de la base del prototipo de calibración.....	31
	2.2 Cálculos	33
	Cálculo de espesor de la plataforma superior del sensor.....	33
	Análisis de falla por cargas dinámicas de fatiga en la plataforma superior del sensor.....	38
	Cálculos estructurales del prototipo del sistema de calibración	48
	Diseño estructural de la base soporte para el sensor y el prototipo de calibración	50
	Cálculo de la junta soldada y cordón de soldadura	51
	2.3 Diseño electrónico	55
	2.4 Simulaciones.....	57
	Simulaciones de esfuerzos de la plataforma superior del sensor	57
	Simulaciones de la mesa de calibración en Autodesk Inventor.....	60
	Simulaciones de PROTEUS	62

	17
2.5 Planos de construcción	64
2.6 Plan de manufactura	64
Diagrama de procesos del ensamblaje del sensor de fuerza	64
Diagrama de procesos del ensamble del sistema de calibración del sensor	65
2.6 Hoja de procesos.....	65
Hoja de Proceso del Sensor de Fuerza y de la Base de Calibración.....	66
3. RESULTADOS Y DISCUSIONES	67
3.1 Análisis de riesgos	67
3.2 Plan de testeo	69
3.3 Seguridad del diseño.....	69
3.4 Manual de mantenimiento y operación	70
3.5 Reporte del diseño	80
3.6 Resultados Experimentales.....	83
3.7 Discusiones	86
3.8 Presupuesto.....	90
3.9 Conclusiones.....	91
3.10 Trabajo futuro	92
4. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	94
ANEXO A: Diagrama de Grant para el desarrollo del sensor y prototipo de calibración.	
96	
ANEXO B: Plano del sensor de fuerza	97
ANEXO C: Plano de placa protectora.....	98

ANEXO D: Plano de la carcasa inferior.....	99
ANEXO E: Plano de la plataforma superior	100
ANEXO F: Plano de platina de sujeción.....	101
ANEXO G: Plano de la estructura de calibración	102
ANEXO H: Plano de placa base.....	103
ANEXO I: Plano de plataforma superior de calibración.....	104
ANEXO J: Plano de polea	105
ANEXO K: Plano de estructura de polea	106
ANEXO L: Plano de conjunto de base de calibración	107
ANEXO M: Diagrama de procesos del ensamblaje del sensor de fuerza	108
ANEXO N: Diagrama de procesos del ensamble del sistema de calibración del sensor	
109	
ANEXO O: Hoja de Proceso del Sensor de fuerza	110
ANEXO P: Hoja de Proceso de las Platinas de sujeción.....	111
ANEXO Q: Hoja de Proceso de la Carcasa Inferior	112
ANEXO R: Hoja de Proceso de la Plataforma Superior	113
ANEXO S: Hoja de Proceso de Estructura Poleas	114
ANEXO T: Hoja de Proceso de la Placa Base.....	115
ANEXO U: Hoja de Proceso de la Estructura de Calibración	116
ANEXO V: Hoja de Proceso de la Plataforma Superior de Calibración.....	117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Lista de requerimientos.....	24
Tabla 2 Pautas de Valoración para matrices de selección.....	26
Tabla 3 Matriz de selección para la plataforma superior.....	27
Tabla 4 Matriz de selección del OPAM.....	29
Tabla 5 Matriz de selección Interfaz.....	30
Tabla 6 Matriz de selección de la base del prototipo de calibración.....	32
Tabla 7 Resultados obtenidos placa circular.....	59
Tabla 8 Error porcentual de las simulaciones.....	60
Tabla 9 Análisis de riesgos.....	68
Tabla 10 Lista de componentes y descripción Descripción: Componentes utilizados para el desarrollo del proyecto.....	80
Tabla 11 Resolución para ejes X, Y y Z Descripción: Resultados obtenidos de resolución para fuerzas y momentos.....	86
Tabla 12 Costos del prototipo Descripción: Costos para la manufactura del proyecto..	90
Tabla 13 Presupuesto del prototipo Descripción: Resumen de costos con déficit.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Geometría de la plataforma superior del sensor.....	26
Figura 2 Opciones OPAM	28
Figura 3 Raspberry	30
Figura 4 DAQ NI 9205.....	31
Figura 5 Diseños de la base de soporte	31
Figura 6 Propiedades del acero AISI 1045 en Autodesk Inventor.....	33
Figura 7 Diagrama de fuerza de la plataforma superior	34
Figura 8 Análisis de similitud de geometrías	34
Figura 9 Diagrama del área equivalente.....	35
Figura 10 Diagrama de variables geometría cuadrada	36
Figura 11 Diagrama de fatiga - criterio modificado de Goodman.....	41
Figura 12 Diagrama de fuerza para los tornillos	42
Figura 13 Diagrama del tornillo de cabeza plana.....	43
Figura 14 Tornillo M6x1 Autodesk Inventor.....	44
Figura 15 Diagrama del prototipo de calibración.....	48
Figura 16 Diagrama de fuerza en base de soporte.....	50
Figura 17 Esquema de junta de soldadura	52
Figura 18 Diagrama de la garganta del cordón.....	52
Figura 19 Configuración Puente de Wheatstone para Fuerzas/Momentos.....	55

Figura 20 Configuración Galgas Extensiométricas para conexión de Puente de Wheatstone para Fuerzas/Momentos.....	56
Figura 21 Esfuerzo de Von Mises placa cuadrada	57
Figura 22 Factor de seguridad placa cuadrada.	58
Figura 23 Esfuerzo de Von Mises placa circular	58
Figura 24 Factor de Seguridad placa circular	59
Figura 25 Esfuerzo de Von Mises Prototipo de calibración	61
Figura 26 Factor de seguridad Prototipo de calibración.....	61
Figura 27 Esquemático y conexiones electrónicas Amplificadores Operaciones para Fuerzas/Momentos.	62
Figura 28 Visualización 3D de Amplificadores Operacionales para Fuerzas/Momentos	62
Figura 29 Esquemático y conexiones electrónicas de puentes de Wheatstone para Fuerzas/Momentos.	63
Figura 30 Visualización 3D de puentes de Wheatstone para Fuerzas/Momentos.....	63
Figura 31 Diferencial de voltaje vs Carga aplicada para Fuerza X	83
Figura 32 Diferencial de voltaje vs Carga aplicada para Momento X	83
Figura 33 Diferencial de voltaje vs Carga aplicada para Fuerza Y	84
Figura 34 Diferencial de voltaje vs Carga aplicada para Momento Y.....	84
Figura 35 Diferencial de voltaje vs Carga aplicada para Fuerza Z.....	85
Figura 36 Diferencial de voltaje vs Carga aplicada para Momento Z.....	85

1. INTRODUCCIÓN

La investigación de los sensores de fuerza ha incrementado a lo largo de los últimos años debido a las aplicaciones que estas pueden tener ya sea en áreas médicas o industriales (Anton , Terrence, & Chyi-Yeu , 2021). Este es el caso de la biomecánica, donde los sensores de fuerza/momento de 6 grados de libertad son muy comunes al analizar la cinemática y cinética con la finalidad de promover, conservar e incrementar el desempeño físico de las personas como el esfuerzo articular o la tensión muscular.

Por esta razón, a partir del modelo de investigación del sensor desarrollado en la Universidad San Francisco de Quito en 2020/2022 y su aplicación de enero a mayo del 2022, se estudió mediante el análisis de elementos finitos (FEA) las distintas deformaciones posibles de las galgas extensiométricas del sensor para posteriormente obtener las fuerzas y momentos correspondientes a los ejes cartesianos X, Y y Z (Aguirre, Oswin, & David, 2020). Con esta información se pretende analizar y mejorar el prototipo físico del sensor, con el objetivo de obtener datos preliminares de las fuerzas y momentos para posteriormente efectuar la calibración de este y realizar las primeras pruebas reales.

A través del análisis de los resultados obtenidos por el prototipo, este sensor podría ser comercializado a mediano/largo plazo con el desarrollo de mejoras para que las grandes industrias lo empleen en sus distintas áreas. Además, esto beneficiaría al campo del desarrollo de investigación en Ecuador, al igual que el área de investigación de biomecánica de la Universidad San Francisco de Quito. Enfatizando su utilidad hacia la cinética de las personas al realizar movimientos, siendo un complemento para los expertos en biomedicina ya que este tipo de sensor permite analizar a tiempo real las fuerzas y momentos efectuados en un cuerpo, además para la biomecánica una de las aplicaciones es el registro y monitoreo de fuerzas/momentos con la finalidad de prevenir lesiones o

identificar el comportamiento para la recolección de información en individuos que requieren rehabilitación.

Con el desarrollo de este proyecto se espera mediante el uso de ingeniería inversa a los proyectos previamente realizados; analizar y probar que todos los componentes se encuentren en óptimo estado para posteriormente implementar nuevos elementos que ayuden a mejorar el desempeño del sensor. Para ello se toma en cuenta los requerimientos principales que permita una carga máxima de 4500 N en el eje vertical y 2500 N en los otros dos ejes perpendiculares, así como 100 Nm para la aplicación de momentos. Se espera realizar cambios en el sensor primordialmente con material local y de ser el caso importado como las galgas extensiométricas, con el fin de que el ensamble sea versátil y así innovar en el mercado local.

Se lleva a cabo cambios en la tapa de la cubierta, con la finalidad de mejorar la rigidez de este para evitar falsas señales electrónicas que influyan en la medición de deformación en las galgas extensiométricas. Además, se realiza una interfaz gráfica amigable con el usuario con el objetivo de visualizar los resultados de manera clara y precisa. Por último, se desea que el desarrollo del proyecto sea beneficioso para aplicaciones internas ya sea en la universidad o en el país como aplicaciones en centros de alto rendimiento en distintos deportes como por ejemplo la halterofilia.

1.1 Requerimientos del proyecto

Para la ejecución del proyecto se debe tomar en cuenta la lista de requisitos proporcionados por el cliente el cual plantea dimensiones y cargas máximas primordialmente. A continuación, se muestra en la tabla 1 los requerimientos detallados:

Tabla 1 Lista de requerimientos

Descripción: Especificaciones técnicas para el desarrollo del sensor de fuerza y prototipo de calibración. Fuente: (Arauz, 2022).

Lista de requerimientos	Especificaciones técnicas
Ergonomía y transporte	Dimensiones: <ul style="list-style-type: none"> • <i>Largo: 150 mm</i> • <i>Ancho: 150 mm</i> • <i>Alto: 100 mm</i>
Medición de fuerza/momento	Capacidad máxima de fuerza y momento: <ul style="list-style-type: none"> • $F_x = F_y = 2500\text{ N}$ • $F_z = 4500\text{ N}$ • $M_x = M_y = M_z = 100\text{ Nm}$
Manufactura del sensor	El material utilizado para el sensor y prototipo de calibración debe ser accesible en el mercado local
Precisión	Resolución de datos: <ul style="list-style-type: none"> • $F_x = F_y = F_z = 0.1\text{ N}$ • $M_x = M_y = M_z = 0.005\text{ Nm}$
Optimización	Minimizar el uso de galgas extensiométricas para las mediciones
Alimentación	Fuente de voltaje: <ul style="list-style-type: none"> • $9\text{-}30\text{ V DC}$
Visualización de datos	Frecuencia de muestro: <ul style="list-style-type: none"> • 4 kHz
Calibración	Prototipo de calibración fácil de operar y dar mantenimiento
Protección	Contra polvo, agua y factores externos <ul style="list-style-type: none"> • $IP53$

En la lista de requerimientos, en ergonomía y transporte se hace referencia a las dimensiones máximas que puede tener el sensor de fuerza, esto con la finalidad de que

sea fácil de manipular y transportar. Para la medición y precisión de fuerza/momento se establecen cargas elevadas suponiendo en un plan a futuro soportar los pesos usados en diferentes deportes como la halterofilia. Para la visualización de datos se desarrolla un software en LabView para la interpretación de datos con la implementación de la tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ) con número de chasis 9178 y tarjeta 9205. Además, se toma en cuenta una protección IP53 para evitar el ingreso de polvo y agua respectivamente en las zonas internas del sensor, la numeración 5 hace referencia a una limitación de ingreso de sólidos que no interfiere con el funcionamiento del equipo, mientras que la numeración 3 hace referencia a la limitación de ingreso de agua por rocío durante al menos 3 minutos constantes (ISO, 2013). En cuanto al prototipo de calibración, este debe tener dimensiones de 600x600x800 mm con la finalidad de tener buena manipulación y operabilidad de los elementos. Este debe ser un prototipo estable el cual permita establecer una capacidad de carga a los 4500 N además de que debe soportar el pandeo local y global. Para la alimentación de todo el sistema se usa una fuente de 12 V la cual alimenta al sensor y al DAQ.

1.2 Planeación del proyecto

La planificación del proyecto se orienta en base al diagrama de Gantt de manera que las tareas son realizadas en base a las fechas y la organización de las tareas, además se realiza un monitoreo continuo del desarrollo del proyecto en relación con los objetivos establecidos ya que también se tienen fechas importantes en las que se deben entregar documentos o avances del prototipo de construcción a manera de avance. Este diagrama se encuentra en la sección de anexos, como Anexo A.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Alternativas de diseño y selección

En el desarrollo y diseño del sensor se toman en cuenta: la plataforma superior del sensor, OPAM, interfaz del sensor y la base del prototipo de calibración. Para cada una de estas matrices de decisión se utiliza diferentes parámetros de evaluación dependiendo el componente del sensor. Para la evaluación de cada uno de estos parámetros se utiliza la siguiente pauta de valoración mostrada en la siguiente tabla.

Tabla 2 Pautas de Valoración para matrices de selección

Descripción: Valoraciones desde 1 como muy malo hasta 5 como muy bueno

Valor	Descripción
1	Muy malo
2	Malo
3	Normal
4	Bueno
5	Muy bueno

Selección plataforma superior del sensor

Para la matriz de selección de la plataforma superior del sensor se analiza la geometría de la placa de presión. Se toma en cuenta 3 tipos de combinaciones las cuales son placas con las siguientes geometrías: placa cuadrada (OP1), placa circular (OP2) y placa rectangular (OP3), como se muestran a continuación.



Figura 1 Geometría de la plataforma superior del sensor

Descripción: Opción 1, 2 y 3 respectivamente para la selección de la geometría

Los parámetros que se analizan en la matriz de selección que se observan en la Tabla 2 son los siguientes: testeo, costos y manufactura. Estos puntos son los más importantes al momento de seleccionar la placa ya que éstos cambian en cuanto al mecanizado, sencillez de calibración, costo total de la pieza y peso del sensor. Cabe recalcar que la función principal de la placa es ser la superficie donde se aplican las fuerzas en los distintos ejes X, Y y Z para obtención de datos o calibración.

Tabla 3 Matriz de selección para la plataforma superior

Descripción: Cada parámetro recibe un porcentaje dependiendo la importancia

Porcentaje	60%		20%		20%		
	Testeo		Costo		Manufactura		
Propuestas	Nota	Nota Ponderada	Nota	Nota Ponderada	Nota	Nota Ponderada	Valor Total
OP1	4	2,4	3	0,6	3	0,6	3,6
OP2	4	2,4	3	0,6	4	0,8	3,8
OP3	2	1,2	3	0,6	3	0,6	2,4

La opción con mayor puntaje es la segunda correspondiente a la placa circular, para realizar el testeo en la placa se pueden efectuar varias perforaciones para sujetar los pesos y hacer la calibración respectiva. Para los costos debido a que las 3 geometrías ocupan el mismo material y la venta de materia prima normalmente es por planchas para su mecanizado o corte láser los precios son similares. Por último, la manufactura de las piezas existe la posibilidad de realizar un corte laser o mecanizar la pieza dependiendo de la disponibilidad de máquinas y presupuesto.

Selección OPAM

Por otra parte, el siguiente componente correspondiente a un subsistema es el OPAM (Operador amplificador operacional), el cual es un factor electrónico importante a la hora de proporcionar la función de transferencia deseada, su función principal es la de

amplificar el voltaje mediante una entrada de tipo diferencial con el fin de obtener una salida amplificada. De esta manera como opciones de aplicación para el OPAM en el proyecto se tiene: comprar un HX711 (OP1) el cual es un transmisor de celdas de carga, este permite la lectura del puente de Wheatstone, el cual se encuentra formado por un conversor y la celda de carga, como segunda opción se tiene la fabricación y diseño de un propio sistema del OPAM (OP2).

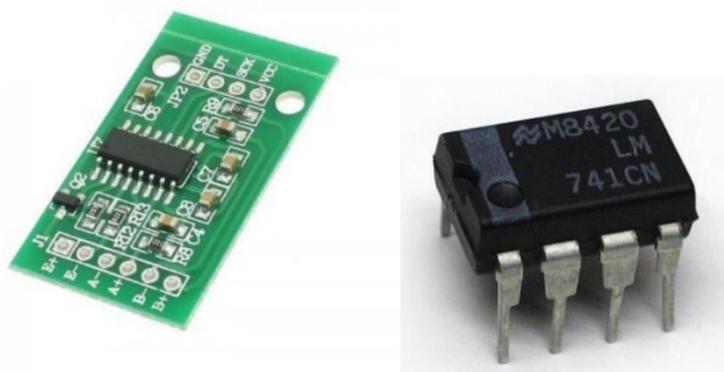


Figura 2 Opciones OPAM

Descripción: Foto referencial de un HX711 y un OPAM respectivamente.

Además, para estudiar qué opción es la mejor se debe tomar en cuenta los puntos clave para la toma de decisión, entre ellos se encuentran: los costos en el cual se debe basar el presupuesto que se tiene para la realización del proyecto, también se tiene en cuenta la precisión en la que se obtendrán los datos, el tiempo en el cual se tarda en realizar el OPAM y la facilidad con la que se puede realizar una conexión eléctrica con los puentes de Wheatstone y por último la ocupación de espacio el cual utilizará el dispositivo.

Tabla 4 Matriz de selección del OPAM

Descripción: Cada parámetro recibe un porcentaje dependiendo la importancia

Porcentaje	10%		30%		10%		25%		25%		
	Costo		Precisión		Tiempo		Conexión		Ocupación de espacio		
Propuestas	Nota	Nota Ponderada	Nota	Nota Ponderada	Nota	Nota Ponderada	Nota	Nota Ponderada	Nota	Nota Ponderada	Valor Total
OP1	4	0,4	5	1,5	5	0,5	5	1,25	5	1,25	4,9
OP2	3	0,3	3	0,9	2	0,2	2	0,5	1	0,25	2,15

Los costos del OPAM van a variar debido a que existe un circuito integrado en el mercado con un precio estimado de USD 4 para la primera opción, mientras que fabricar el OPAM se tienen costos de materiales y costos de instrumentación. Además, cabe recalcar que la precisión va de la mano junto al circuito, por lo tanto, el circuito que ya viene diseñado va a ser más exacto que un modelo a fabricar, de la misma manera el tiempo de fabricación será mayor ya que se empezaría desde el diseño del OPAM hasta su construcción, mientras que con el circuito ya trae todas estas características con la conveniencia de que se optimiza el espacio a ocupar y las conexiones. Por lo tanto, la mejor opción para este subsistema es la opción 1, la cual cumple con los criterios ingenieriles más eficientes.

Selección de Interfaz

Para la interfaz las posibilidades para la misma es el uso del software Matlab (OP1) el cual muestra las gráficas de los resultados, otra opción para la interfaz es el software LabVIEW (OP2) donde además de mostrar las gráficas se puede diseñar de manera amigable la visualización de los resultados. Por último, con el uso de un ordenador de placa reducida llamado Raspberry en conjunto con un display permite tener una pantalla únicamente para la visualización de resultados programados con el Raspberry (OP1).



Figura 3 Raspberry

Descripción: Foto referencial de un Raspberry (OP3)

Para la matriz de selección de la interfaz se analiza en los 3 posibles métodos explicados anteriormente, en los cuales se toma en cuenta cual tiene un menor costo de realización, junto a la facilidad con la que se puede programar en base a los conocimientos adquiridos, de igual manera se busca que la estética sea llamativa y la operabilidad del usuario sea sencilla.

Tabla 5 Matriz de selección Interfaz

Descripción: Cada parámetro recibe un porcentaje dependiendo la importancia

Porcentaje	30%		20%		30%		20%		
	Costo		Facilidad		Estética		Operabilidad		
Propuestas	Nota	Nota Ponderada	Nota	Nota Ponderada	Nota	Nota Ponderada	Nota	Nota Ponderada	Valor Total
OP1	4	1,2	4	0,8	3	0,9	4	0,8	3,7
OP2	4	1,2	3	0,6	4	1,2	5	1	4
OP3	2	0,6	2	0,4	4	1,2	4	0,8	3

Realizando la matriz de selección en base a los criterios ingenieriles la mejor opción para utilizar es la segunda, debido a que esta opción es de bajo costo principalmente porque el programa LabVIEW provee la Universidad con la licencia, también se permite tener una estética llamativa a los resultados finales ya que se puede crear un tablero digital en la computadora donde aplastando diferentes botones se muestra las gráficas, al tener esta facilidad para la visualización de los resultados con el programa la operabilidad del usuario es sencilla ya que se puede personalizar las etiquetas. Por último, la facilidad para programar es demorosa en relación con Matlab,

pero los demás criterios son favorables, adicionalmente se puede mencionar que la universidad proporciona un DAQ el cual permite recibir las señales analógicas para transformarlas posteriormente a una señal digital.



Figura 4 DAQ NI 9205

Descripción: Tarjeta de Adquisición de datos (DAQ) de National Instruments

Selección de la base del prototipo de calibración

Para la última matriz de selección correspondiente al prototipo de calibración del sensor, el cual permite calibrar las fuerzas y los momentos aplicados en los 6 ejes. Se busca seleccionar la mejor alternativa del material para la base del prototipo de calibración. Para la primera base se conforma una mesa con perfil de aluminio y placa de madera (OP1), también una mesa con columnas de madera y placa de acero (OP2) y, por último, una mesa con columnas y placa de acero (OP3).

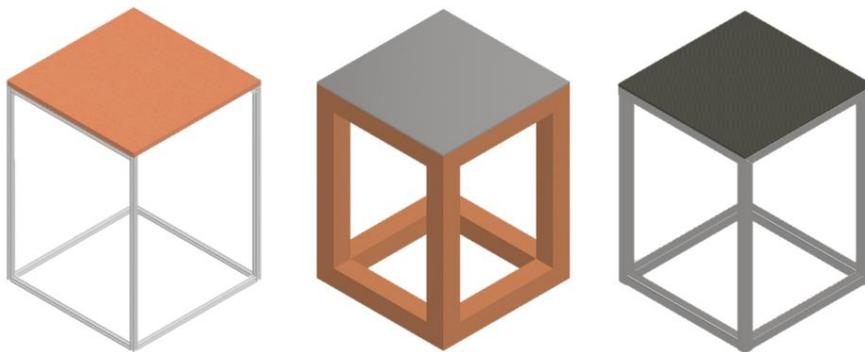


Figura 5 Diseños de la base de soporte

Descripción: Opciones de diseño para la base de soporte del sensor y el prototipo de calibración

La base debe tener un diseño el cual soporte el peso del sensor y la plataforma de calibración, además de discos de pesas colocados en diferentes posiciones para la calibración en los 6 ejes. Los criterios ingenieriles para analizar son el costo de producción de la mesa, la facilidad de manufactura, mayor resistencia a esfuerzos con menor cantidad de material y resistencia al pandeo, todo esto con la finalidad de ejecutar de manera precisa la calibración sin tener errores por pandeo en la placa o vigas de la base con el menor presupuesto posible.

Tabla 6 Matriz de selección de la base del prototipo de calibración

Descripción: Cada parámetro recibe un porcentaje dependiendo la importancia

Porcentaje	30%		20%		10%		40%		Valor Total
	Costo		Manufactura		Cantidad de Material		Resistencia Pandeo		
Propuestas	Nota	Nota Ponderada	Nota	Nota Ponderada	Nota	Nota Ponderada	Nota	Nota Ponderada	
OP1	4	1,2	4	0,8	4	0,4	2	0,8	3,2
OP2	4	1,2	3	0,6	2	0,2	2	0,8	2,8
OP3	3	0,9	4	0,8	4	0,4	5	2	4,1

La opción con mayor puntaje es la tercera, aunque pueda tener un costo mayor para la materia prima en relación con las otras dos opciones, el costo de manufactura al igual que la cantidad de material requerida para su construcción y resistencia a los esfuerzos, va a ser menor. Y dado que la resistencia al pandeo es el criterio más importante al momento de calibrar el sensor, se elige la base con estructura y placa de acero, ya que de acuerdo con la norma ISO 9001 al momento de hacer las distintas mediciones, si existe pandeo las características de medidas se ven afectadas como, por ejemplo, la repetibilidad o fidelidad, la cuales van de la mano y se enfocan en tener los mismos resultados en diferentes tomas de mediciones durante un tiempo determinado.

2.2 Cálculos

Cálculo de espesor de la plataforma superior del sensor

Una vez realizado la selección de la geometría de la plataforma superior, la cual se eligió de forma circular, se procede a realizar los cálculos geométricos y estructurales en base a las dimensiones solicitadas que corresponden a un diámetro de 270 mm y 10 mm de espesor, la plataforma debe soportar una deflexión a una carga de 4500 N (valor indicado por el cliente) en un extremo de la geometría para poder evaluar el caso crítico de deflexión máxima.

A partir de esta información se realiza la primera iteración, conociendo que el material utilizado para el diseño de la plataforma es el acero AISI 1045. Las propiedades del acero AISI 1045 (AZO Materials, 2013), se utilizarán en base a los valores indicados en Autodesk Inventor los cuales son:

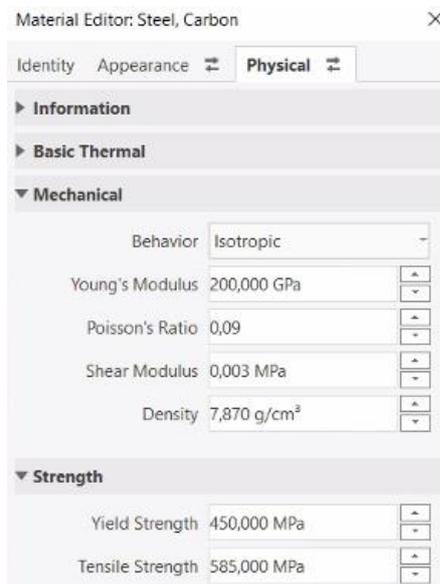


Figura 6 Propiedades del acero AISI 1045 en Autodesk Inventor

Descripción: Configuración de las propiedades del acero AISI 1045 en Autodesk Inventor según AZO Materials Network. Fuente: (AZO Materials, 2013).

A continuación se encuentra el diagrama de la plataforma elegida en la que se muestra la fuerza ejercida y en que punto esta se encuentra, así como los datos conocidos para realizar los cálculos respectivos.

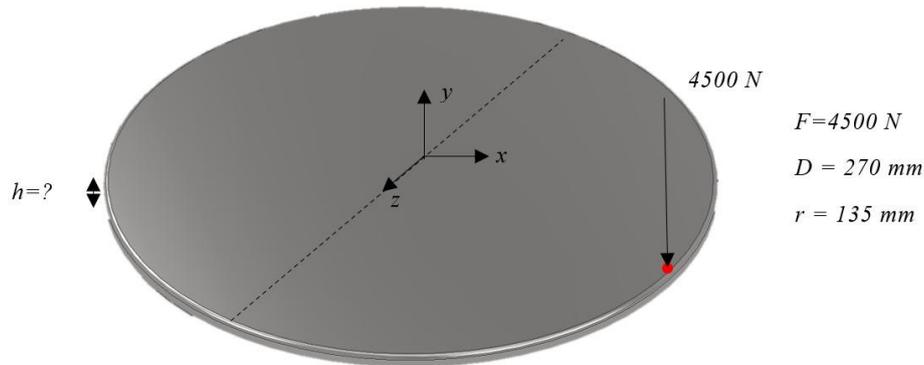


Figura 7 Diagrama de fuerza de la plataforma superior

Descripción: Datos y punto de aplicación de fuerza para estudiar el caso crítico en el análisis de deflexión

Para los cálculos se toman en cuenta las siguiente suposiciones: el acero mantiene sus propiedades constantes a lo largo de la geometría y no hay perforaciones en toda la placa. El primer paso a realizar es el análisis del área de la placa con el objetivo de encontrar una geometría cuadrada equivalente al área circular.

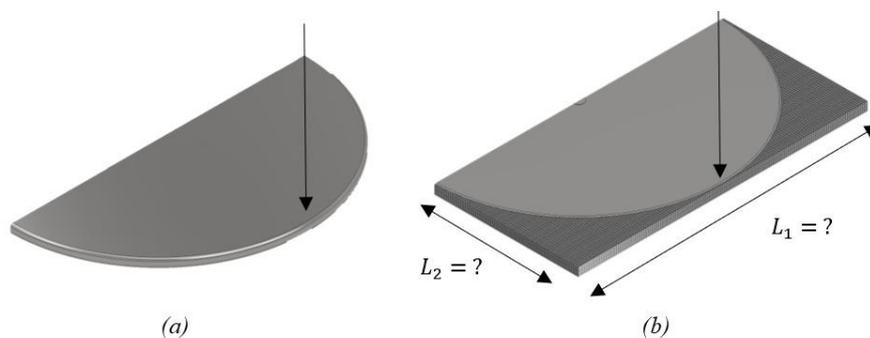


Figura 8 Análisis de similitud de geometrías

Descripción: Diagrama de comparativa de áreas (a) geometría original, (b) estimación de comparativa de áreas circular y cuadrada

A continuación, en base a las fórmulas de las áreas circular y cuadrado se realiza un sistema de ecuaciones para encontrar la longitud equivalente

Área del círculo

$$A_c = \pi r^2 = \pi(135 \text{ mm})^2$$

$$A_c = 57255,53 \text{ mm}^2$$

Área del cuadrado

$$A_c = L^2 = 57255,53 \text{ mm}^2$$

$$L = 239,28 \text{ mm}$$

Después de resolver el sistema de ecuaciones la longitud equivalente es de 239,28 mm, con este valor se representa el siguiente diagrama en la que se muestran ambas geometrías cortadas por el área equivalente.

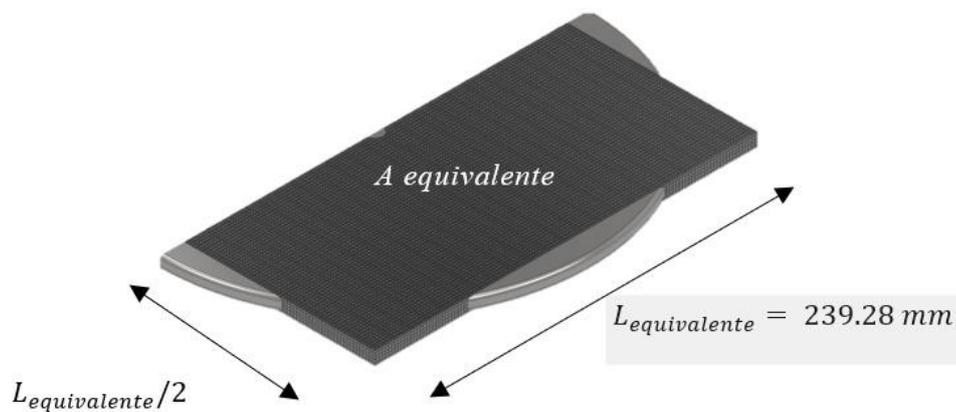


Figura 9 Diagrama del área equivalente

Descripción: Resultado final del análisis de geometrías con la longitud y área equivalente

Una vez encontrado el área equivalente, con la geometría cuadrada ya se pueden iniciar los cálculos de esfuerzos de la placa con las siguientes variables:

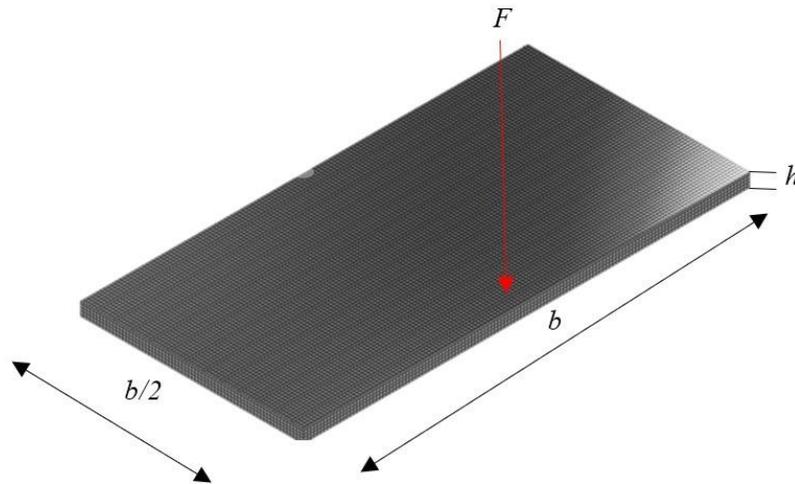


Figura 10 Diagrama de variables geometría cuadrada

Descripción: Geometría cuadrada con la simbología planteada para el cálculo del esfuerzo por deflexión máxima

Para calcular el espesor de la placa se utiliza la ecuación del esfuerzo máximo de tensión por flexión.

$$\sigma = \frac{Mc}{I_y}$$

Donde c es la distancia al plano neutro, representado como $\frac{h}{2}$ y la inercia I_y de un cuadrado es $\frac{1}{12}bh^3$.

$$\sigma = \frac{M * \frac{h}{2}}{\frac{1}{12} * b * h^3} = \frac{F * \frac{b}{2}}{\frac{1}{6} * b * h^2}$$

$$450 \text{ MPa} = \frac{4500 \text{ N} * 119,64 \times 10^{-3}}{\frac{1}{6} * 239,28 \times 10^{-3} * h^2} = \frac{13500 \text{ N}}{h^2}$$

$$h = 5,477 \text{ mm}$$

Con el resultado dado del espesor de 5,477 mm se considera un espesor mínimo de la placa de 6 mm, además se asume un factor de seguridad de $n = 1,5$ para el cálculo del esfuerzo de diseño sabiendo que el esfuerzo de fluencia S_y es de 450 MPa.

$$\sigma_{diseño} = \frac{S_y}{n} = \frac{450 \text{ MPa}}{1,5} = 300 \text{ MPa}$$

Con el esfuerzo de diseño de 300 MPa se procede a recalculer el espesor de la placa en base a la ecuación antes planteada.

$$300 \text{ MPa} = \frac{13500 \text{ N}}{h^2}$$

$$h = 6,71 \text{ mm} = 7 \text{ mm}$$

Donde, de acuerdo al mercado nacional y el proveedor no existe esta medida de 7 mm de espesor, por lo cual se procede a utilizar su inmediato superior con una placa de 8 mm de espesor. A partir de esto se procede a calcular el esfuerzo máximo con su respectivo factor de seguridad considerando carga estática.

$$\sigma_{max} = \frac{4500 \text{ N} * \left(\frac{239,28 \times 10^{-3}}{2} \text{ m}\right) * \left(\frac{8 \times 10^{-3}}{2} \text{ m}\right)}{\frac{1}{12} * 239,28 \times 10^{-3} * \left(\frac{8 \times 10^{-3}}{2} \text{ m}\right)}$$

$$\sigma_{max} = 210,93 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{max}} = \frac{450 \text{ MPa}}{210,93 \text{ MPa}}$$

$$n = 2,13$$

Finalmente se encuentra la deflexión máxima de la placa, con la ecuación correspondiente y a partir del apéndice D del libro de Shigley se tiene que el módulo de Young es $E = 200 \text{ GPa}$ (Budynas & Nisbett, 2015).

$$Y_{max} = \frac{-FL^3}{3EI}$$

$$Y_{max} = \frac{-4500 \text{ N} * \left(\frac{239,28 \times 10^{-3} \text{ m}}{2}\right)}{3 * 200 \times 10^9 \text{ Pa} * \left(\frac{1}{12} * (239,28 \times 10^{-3} \text{ m}) * (8 \times 10^{-3})^3\right)}$$

$$Y_{max} = 1,258 \text{ mm}$$

El resultado de deflexión máxima es de 1.258 mm para la plataforma superior del sensor, siendo un resultado óptimo ya que la carga ejercida es de 4500 N representando una elevada masa de 459.18 kg. Y si relacionamos la deflexión con respecto a la masa tenemos que por cada 115 kg la placa fleja 0.3145 mm aproximadamente. Lo que muestra una deflexión mínima en referencia a las altas cargas a las que se someterá el sensor.

Análisis de falla por cargas dinámicas de fatiga en la plataforma superior del sensor

Para el análisis de falla por cargas dinámicas primero se calcula y se grafica el diagrama de Wöller para el acero AISI 1045, donde primordialmente se ocupa el límite de resistencia (Se), el esfuerzo último (Sut), la fracción del esfuerzo último ($fSut$), etc.

$$Sut = 585 \text{ MPa} \rightarrow 84.84 \text{ kpsi}$$

$$Sy = 450 \text{ MPa}$$

Fracción del esfuerzo último " $fSut$ "

En primer lugar, se revisa la literatura del libro de Shigley para el cálculo de la fracción del esfuerzo último y el límite de resistencia sin factores modificadores utilizando las respectivas figuras y fórmulas (Budynas & Nisbett, 2015).

De la Figura 6-18 (Budynas & Nisbett, 2015), se obtiene:

$$f \approx 0.87 \text{ para } 10^3 \text{ ciclos}$$

$$fS_{ut} = 508.95 \text{ MPa}$$

Límite de resistencia sin factores modificadores:

$$S_{e'} = 0.5 S_{ut}$$

$$S_{ut} \leq 1400 \text{ MPa}$$

$$S_{e'} = 0.5 (585 \text{ MPa})$$

$$S_{e'} = 292.5 \text{ MPa}$$

Límite de resistencia con factores modificadores

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S_{e'}$$

Factor de superficie:

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

De la tabla 6-2 se obtiene el factor a/b por maquinado:

$$a = 4.71 \quad b = -0.265$$

$$k_a = 4.71 (5.85)^{-0.265} = 0.87$$

Factor de tamaño:

$k_b = 1$ debido a que la carga no tiene efecto de torsión

Factor de carga:

$k_c = 1$ debido a que se produce un momento con el punto de aplicación

Factor de temperatura:

$k_d = 1$ debido a que al objeto no se expondrá a condiciones que afecten su

temperatura

Factor de confiabilidad:

$k_e = 0.868$ debido a una confiabilidad del 95%

Factor de efectos misceláneos (varios)

$k_f = 1$ debido a que no existen efectos residuales o efectos varios

$$Se = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot Se'$$

$$Se = (0.87) \cdot (1) \cdot (1) \cdot (1) \cdot (0.868) \cdot (1) \cdot (292.5 \text{ MPa})$$

$$Se = 220.88 \text{ MPa}$$

Con los resultados obtenidos se puede observar que el esfuerzo calculado se encuentra en la sección de vida infinita y alto ciclaje correspondiente a 220.88 MPa. Suponiendo que la carga es repetida porque el esfuerzo mínimo es 0 sin aplicación de carga y el esfuerzo máximo es el Se suponiendo la aplicación de la carga máxima, se procede a calcular el esfuerzo medio y amplitud.

Esfuerzo medio y amplitud

En este punto, se utilizan las fórmulas del esfuerzo medio y de amplitud con el fin de hallar el factor de seguridad.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = \frac{210.93}{2} = 105.47 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right| = \left| \frac{210.93}{2} \right| = 105.47 \text{ MPa}$$

Factor de Seguridad a Fatiga con el criterio de Goodman

$$n_f = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{Se} + \frac{\sigma_m}{Sut}}$$

$$n_f = \frac{1}{\frac{105.47 \text{ MPa}}{220.86 \text{ MPa}} + \frac{105.47 \text{ MPa}}{585 \text{ MPa}}}$$

$$n_f = 1.52$$

Con el resultado del factor de seguridad de fatiga el cual es $n_f = 1.52$, se concluye que no existe fallo en la placa ya que sobrepasa el valor de 1 como valor mínimo al factor de seguridad. Con los valores calculados del esfuerzo medio y de amplitud se puede crear el diagrama del criterio modificado de Goodman a fatiga para analizar en que sección se encuentra el punto de enfuerzo planteado como se muestra en el siguiente diagrama:

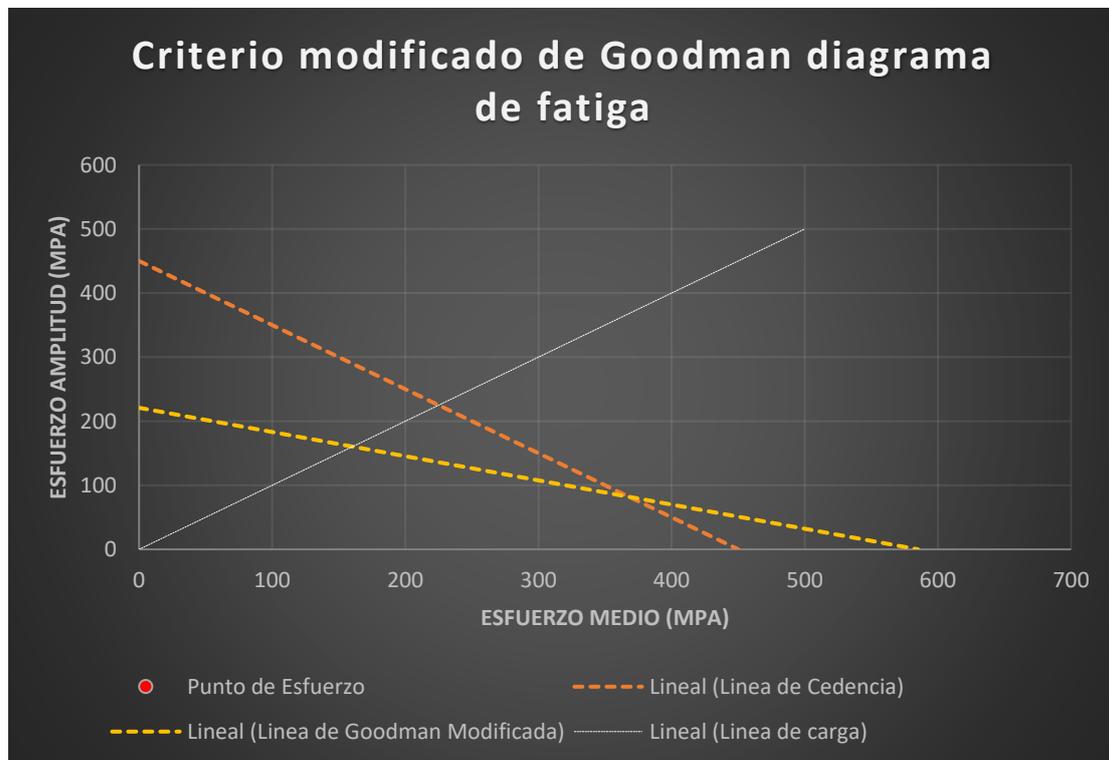


Figura 11 Diagrama de fatiga - criterio modificado de Goodman

Descripción: Gráfico obtenido de la aplicación del criterio modificado de Goodman con el esfuerzo medio y de amplitud

Con el diagrama se puede observar la resistencia y que el esfuerzo hallado no sobrepasa los valores límites de las líneas de cedencia, del criterio modificado de Goodman y de la carga.

Cálculo de la sección emperrada de la plataforma superior del sensor

Una vez establecido el espesor de la plataforma de 8 mm, el siguiente paso es determinar el tipo de tornillo que pueda soportar el esfuerzo cortante que hay debido a las fuerzas aplicadas a la plataforma. Las fuerzas ejercidas son aplicadas como se muestra en la siguiente figura.

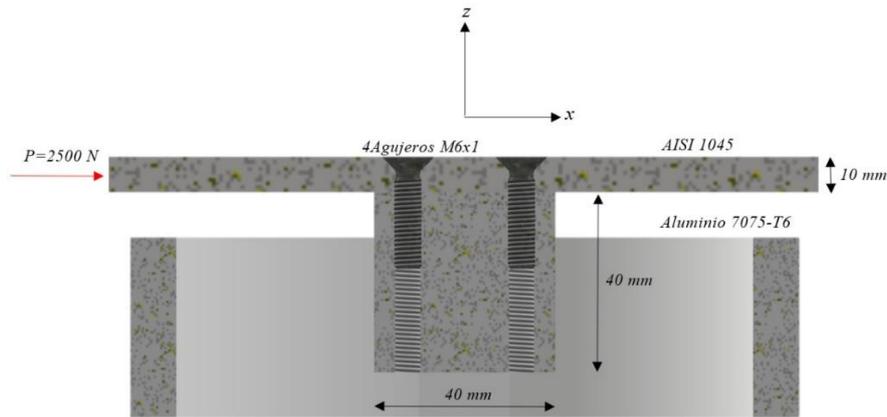


Figura 12 Diagrama de fuerza para los tornillos

Descripción: Diagrama de referencia de la plataforma superior anclada mediante tornillos al sensor de fuerza

De acuerdo al diagrama de la figura anterior y con los datos conocidos y extraídos del libro de Diseño Mecánico para las propiedades (Budynas & Nisbett, 2015).

$$\# \text{ tornillos} = 4$$

$$p = 1$$

$$F = 2500\text{ N}$$

$$E_1 = 200\text{ GPa AISI 1045}$$

$$E_2 = 71\text{ GPa Aluminio}$$

De la tabla 8.1 con paso grueso:

$$A_t = 20,1 \text{ mm}^2$$

$$A_r = 17,9 \text{ mm}^2$$

De la tabla 8.11 para las propiedades mecánicas

$$S_p = 225 \text{ MPa}$$

$$S_{ut} = 400 \text{ MPa}$$

Con los datos ya propuestos se procede a calcular la longitud del tornillo, para lo cual se realiza el diagrama sugerido de la rigidez del tornillo como se muestra a continuación:

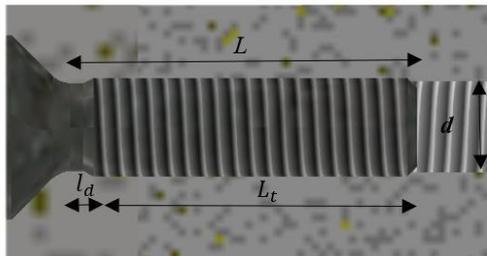


Figura 13 Diagrama del tornillo de cabeza plana

Descripción: Simbología de las longitudes del tornillo a utilizar para el cálculo de sus dimensiones

Mediante las fórmulas guía del libro de Shigley (Budynas & Nisbett, 2015), se procede a calcular las longitudes: roscada, sin roscar, total, de ajuste, etc. Cabe recalcar que hay que tomar en cuenta las condiciones de diseño para implementar cada ecuación.

$$L > l + 1,5d \quad (1)$$

$$t \rightarrow \text{de la tabla A.33 } t = 2,3 \text{ mm}$$

$$LT = 2d + 6\text{mm} = 2(6 \text{ mm}) + 6 \text{ mm}$$

$$LT = 18 \text{ mm}$$

$$l = h + \frac{d}{2} \text{ con } t_2 \geq d$$

$$l = (2,3 + 8)mm + \frac{6mm}{2} \text{ donde } 40 mm \geq 6 mm$$

$$l = 13,3 mm$$

$$L > 13,3 mm + 1,5 * 6 mm$$

$$L > 22,3 mm$$

$$lt = l - ld = 15,3 mm - 7mm$$

$$lt = 8,3 mm$$

$$ld = L - LT = 25 mm - 18 mm$$

$$ld = 7 mm$$

Se obtiene una longitud $L = 22,3 mm$ donde comercialmente no se encuentra la dimensión exacta, por lo que con la ayuda de la tabla A.17 se tiene que la longitud $L = 25 mm$ la cual es una dimensión de tornillo estandarizada y disponible en el mercado.

*Tornillo cabeza Plana
M6x1*



Figura 14 Tornillo M6x1 Autodesk Inventor

*Descripción: Tornillo cabeza plana M6x1 extraído de la librería de Autodesk Inventor
2023*

A continuación, se calcula la sección de carga C para lo cual se debe obtener el área del tornillo con el diámetro de 6 mm y la rigidez del tornillo k_b , de los materiales k_1

y k_2 con distinto espesor y módulo de elasticidad para el acero AISI 1045 y el aluminio 7075-T6 respectivamente.

Área de tornillo:

$$A_d = \frac{\pi}{4} (6 \text{ mm})^2 = 28,27 \text{ mm}^2$$

Diámetro aproximado de la arandela:

$$D = 1,5d = 1,5 * 6 \text{ mm}$$

$$D = 9 \text{ mm}$$

Rigidez del tornillo M6x1:

$$k_b = \frac{A_d * A_t * E}{A_d * l_t + A_t * l_d}$$

$$k_b = \frac{20,1 \text{ mm}^2 * 28,27 \text{ mm}^2 * 200 \text{ GPa}}{28,22 \text{ mm}^2 * 8,3 \text{ mm} + 20,1 \text{ mm}^2 * 7 \text{ mm}}$$

$$k_b = 302,77 \frac{\text{MN}}{\text{m}}$$

Rigidez de material de acero AISI 1045, donde $E = 200 \text{ GPa}$:

$$k_m = \frac{0,5774\pi * E * d}{\ln \left(\frac{(1,155t + D - d) * (D + d)}{(1,155t + D + d) * (D - d)} \right)}$$

$$k_1 = \frac{0,5774\pi * 200 \text{ GPa} * 6x10^{-3}}{\ln \left(\frac{((1,155 * 8x10^{-3}) + 9x10^{-3} - 6x10^{-3}) * (9x10^{-3} + 6x10^{-3})}{((1,155 * 8x10^{-3}) + 9x10^{-3} + 6x10^{-3}) * (9x10^{-3} - 6x10^{-3})} \right)}$$

$$k_1 = 2350.335 \frac{\text{MN}}{\text{m}}$$

Rigidez del material de Aluminio 7075-T6, donde $E = 71 \text{ GPa}$:

$$k_2 = \frac{0,5774\pi * 71 \text{ GPa} * 6x10^{-3}}{\ln \left(\frac{((1,155 * 40x10^{-3}) + 9x10^{-3} - 6x10^{-3})}{((1,155 * 40x10^{-3}) + 9x10^{-3} + 6x10^{-3})} \right)}$$

$$k_2 = 555,46 \frac{MN}{m}$$

Y se procede a calcular la rigidez equivalente debido a que se tienen dos materiales diferentes:

$$k_{eq} = \frac{k_1 * k_2}{k_1 + k_2}$$

$$k_{eq} = 449,28 \frac{MN}{m}$$

Fracción de carga:

$$C = \frac{kb}{kb + k_{eq}}$$

$$C = \frac{302,77 \text{ Mn/m}}{302,77 \text{ Mn/m} + 449,28 \text{ MN/m}}$$

$$C = 0,40$$

Cálculo de fuerza de precarga:

$$F_i = 0,75 F_p$$

Carga de fuerza de prueba:

$$F_p = A_t * S_p$$

$$F_p = (20,1 \text{ mm}^2)(225 \text{ Mpa})$$

$$F_p = 4,522 \text{ kN}$$

Para comprobar la veracidad de los cálculos y asegurarse del correcto funcionamiento de la sección emperrada se procede a encontrar los 3 factores de seguridad (carga, junta y cedencia), donde se utilizan los resultados obtenidos anteriormente de las fuerzas de precarga y prueba.

Factor de seguridad de carga:

$$n_L = \frac{(S_p * A_t) - F_i}{C * \frac{P}{\#_{PERNOS}}}$$

$$n_L = \frac{(4.522 \times 10^3 \text{ N}) - (3.391 \times 10^3 \text{ N})}{0.40 * \frac{2500 \text{ N}}{4}}$$

$$n_L = 4.524$$

Factor de seguridad de junta:

$$n_o = \frac{F_i}{P(1 - C)}$$

$$n_o = \frac{3.391 \times 10^3 \text{ N}}{\frac{2500 \text{ N}}{4} * (1 - 0.40)}$$

$$n_o = 9.04$$

Factor de seguridad de cedencia:

$$n_p = \frac{S_p * A_t}{(C * P) + F_i}$$

$$n_p = \frac{4.522 \times 10^3 \text{ N}}{\left(0.41 * \frac{2500 \text{ N}}{4}\right) + 3.391 \times 10^3 \text{ N}}$$

$$n_p = 1.24$$

Como se puede observar en los resultados anteriores, los factores de seguridad de carga $n_L = 4.524$, de junta $n_o = 9.04$ y de cedencia $n_p = 1.24$ son mayores a 1.2 lo que indica que el tornillo seleccionado es el correcto y no fallará por ninguna de estas causas.

Cálculos estructurales del prototipo del sistema de calibración

Para el diseño de la plataforma de calibración se utiliza como material base el acero AISI 1045, adicionalmente para la distancia de la base del brazo de la plataforma superior de calibración y la distancia entre centros para generar el momento se asumen dimensiones de $b = 5$ cm y $l = 22,5$ cm respectivamente. Además, se asume una geometría simétrica como se especifica en la siguiente figura.

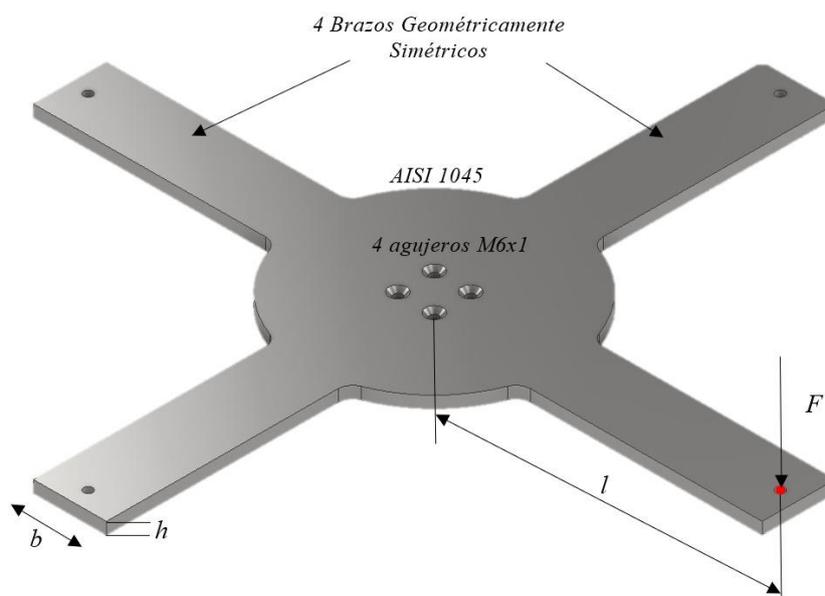


Figura 15 Diagrama del prototipo de calibración

Descripción: Datos y punto de aplicación de fuerza para estudiar la deflexión de la plataforma para la calibración de momentos

Con las dimensiones asumidas, se procede a calcular el espesor de la placa, con la ecuación del esfuerzo máximo de tensión por flexión. Es importante recalcar que el esfuerzo de tensión del acero AISI 1045 es de 450 MPa y la distancia al plano neutro c es el espesor de la placa sobre 2.

$$\sigma = \frac{M * \frac{h}{2}}{\frac{1}{12} * b * h^3} = \frac{F * \frac{b}{2}}{\frac{1}{6} * b * h^2}$$

$$450 \text{ MPa} = \frac{245 \text{ N} * 0,225 \text{ m}}{\frac{1}{6} * 0,05 \text{ m} * h^2} = \frac{55,125 \text{ Nm}}{8,33 \times 10^{-3} * h^2}$$

$$h = 3,83 \text{ mm}$$

Debido a que este espesor de placa no está disponible en el mercado, se elige para el diseño una placa de 4 mm de espesor. Se calcula el esfuerzo de diseño con un factor de seguridad de 1.5 obteniendo lo siguiente:

$$\sigma_{diseño} = \frac{S_y}{n} = \frac{450 \text{ MPa}}{1,5} = 300 \text{ MPa}$$

Con el esfuerzo de diseño de 300 MPa se procede a recalcular el espesor antes encontrado con el nuevo valor.

$$300 \text{ MPa} = \frac{55,125 \text{ Nm}}{8,33 \times 10^{-3} * h^2}$$

$$h = 4,69 \text{ mm}$$

Con este nuevo espesor de 4.69 mm se utiliza un espesor comercial de 5 mm (Dismetal, 2022), y con este resultado se calcula el esfuerzo de diseño final y el factor de seguridad de carga estática.

$$\sigma_{max} = \frac{245 \text{ N} * (0,225 \text{ m}) * \left(\frac{0,005}{2} \text{ m}\right)}{\frac{1}{12} * 0,225 \text{ m} * (0,005 \text{ m})^3}$$

$$\sigma_{max} = 264,6 \text{ MPa}$$

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma_{max}} = \frac{450 \text{ MPa}}{264,6 \text{ MPa}}$$

$$\eta = 1,7$$

Diseño estructural de la base soporte para el sensor y el prototipo de calibración

Para realizar el cálculo de la base del soporte para el sensor y el prototipo de calibración de acuerdo con la matriz de selección, se utiliza acero AISI 1045 para la placa base de la estructura, y el perfil de las columnas correspondientes a la mesa es de acero ASTM A36, donde se utilizan las columnas como un punto crítico y se necesita estudiar el comportamiento a esfuerzo normal y a continuación se puede observar el diagrama de la base.

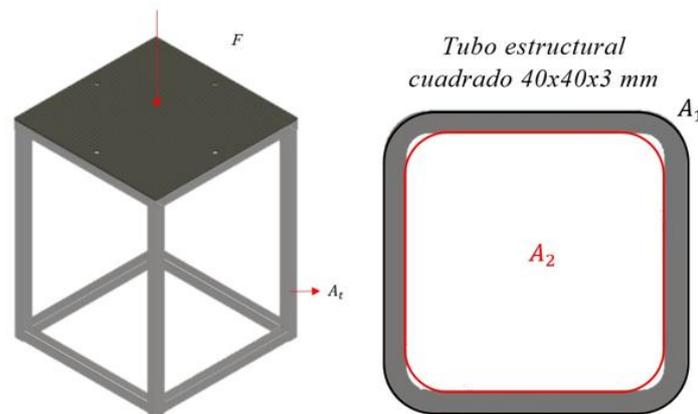


Figura 16 Diagrama de fuerza en base de soporte

Descripción: Aplicación de fuerza y datos del tubo estructural para el cálculo de esfuerzo y factor de seguridad

Con las dos áreas, la externa e interna se realiza el cálculo total del área para las columnas.

$$A_t = A_1 - A_2$$

$$A_1 = 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$$

$$A_1 = 1600 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = 37 \text{ mm} \times 37 \text{ mm}$$

$$A_2 = 1369 \text{ mm}^2$$

$$A_t = 1600 \text{ mm}^2 - 1369 \text{ mm}^2$$

$$A_t = 231 \text{ mm}^2$$

Esfuerzo normal

$$\sigma = \frac{P}{A_t} = \frac{\frac{F}{4}}{A_t} = \frac{\frac{1960 \text{ N}}{4}}{231 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma = 2.12 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad

$$\eta = \frac{S_y}{\sigma_{max}} = \frac{250 \text{ MPa}}{2.12 \text{ MPa}}$$

$$\eta = 117.92$$

Con el factor de seguridad de 117.92 hallado se concluye que las columnas no fallan para un esfuerzo de 2.12 MPa. Asumiendo que la fuerza aplicada en la mesa es de aproximadamente 200 kg y esta se distribuye en las 4 columnas que conforman la mesa.

Cálculo de la junta soldada y cordón de soldadura

Para el cálculo de la soldadura utilizaremos el tipo MIG (Metal Inert Gas) donde el gas utilizado es argón y transferencia de cortocircuito ya que deseamos realizar una soldadura de baja penetración ya que en nuestro caso trabajamos con un tubo cuadrado de bajo espesor. Adicionalmente el material utilizado para el diseño y cálculos es el acero al carbón ASTM A-36 (Metal Supermarkets, 2017). El tipo de cordón de soldadura

utilizado es de filete simple donde se unirán tres elementos esencialmente (2 vigas / 1 columna).

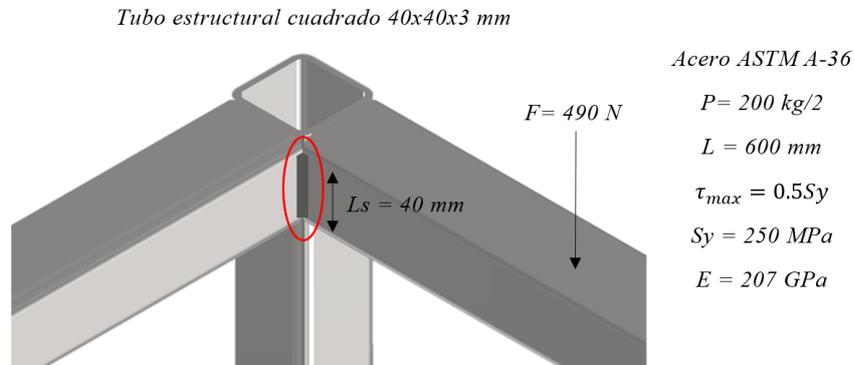


Figura 17 Esquema de junta de soldadura

Descripción: Soldadura MIG de filete sencillo con transferencia de corto circuito

Área efectiva de la conexión de soldadura

$$A_e = g \times L_s$$

Para el cálculo del área efectiva del cordón de soldadura asumimos dimensiones de 3x3 mm. Esto nos permitirá unir los tres tubos estructurales. Además, al realizar el análisis en cortante debemos tomar en cuenta que el área del esfuerzo de la garganta de cordón como se muestra a continuación:

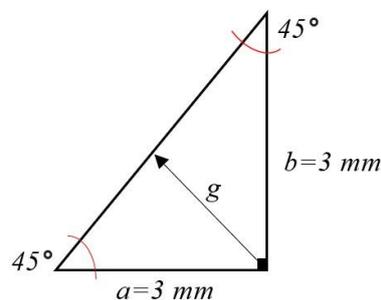


Figura 18 Diagrama de la garganta del cordón

Descripción: Diagrama referencial para la realización del cálculo de la garganta del cordón

$$g = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$g = \sqrt{(3 \times 10^{-3})^2 + (3 \times 10^{-3})^2}$$

$$g = 4.24 \text{ mm}$$

Área efectiva conexión soldada

$$A_e = g \times L_s$$

$$A_e = 4.24 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$$

$$A_e = 169.6 \text{ mm}^2$$

Cálculo del cortante directo en la soldadura

$$\bar{\tau}_{Directo} = \frac{F}{A_e} = \frac{490 \text{ N}}{169.6 \text{ mm}^2}$$

$$\bar{\tau}_{Directo} = 2.89 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad del cortante directo

$$\eta = \frac{\tau_{max}}{\bar{\tau}_{Directo}} = \frac{0.5S_y}{\bar{\tau}_{Directo}} = \frac{0.5 * 250 \text{ MPa}}{2.89 \text{ MPa}}$$

$$\eta = 43.25$$

Cortante por flexión en la soldadura

Para el cálculo del cortante por flexión en la soldadura se realiza en base al momento, la inercia y la distancia al plano neutro, en donde se tiene que para cada soldadura en la columna se debe hallar la carga en cada una para obtener el momento.

$$F = \frac{200 \text{ kg}}{4} = 50(9.8) = 490 \text{ N}$$

$$\tau'' = \frac{Mc}{I}$$

$$M = \left(\frac{0.60}{2}\right)(490) = 147 \text{ Nm}$$

Asimismo, la inercia se calculó mediante el segundo momento unitario del área el cual se encuentra en la tabla 9-2 del libro de Shigley. Así, se obtiene el cortante, con esto el módulo del cortante total (directo y por flexión) y como último paso se calcula el factor de seguridad por flexión mediante los valores de los cortantes.

$$I = 0.707 * (W) * (I_u)$$

$$I = 0.707 * (3 \text{ mm}) * (1.59 \times 10^{-5}) = 3.337239 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$\tau'' = \frac{(147 \text{ Nm})(0.02 \text{ m})}{3.337239 \times 10^{-8} \text{ m}^4} = 86.726 \text{ MPa}$$

$$\tau_{total} = \sqrt{(2.89 \text{ MPa})^2 + (86.726 \text{ MPa})^2}$$

$$\tau_{total} = 86.774 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad del cortante por flexión

$$\eta_{total} = \frac{\tau_{max}}{\tau''} = \frac{0.5Sy}{\tau''} = \frac{0.5 * 250 \text{ MPa}}{86.774 \text{ MPa}}$$

$$\eta_{total} = 1.44$$

Como podemos observar el cordón de soldadura si cumple con su función de unir la estructura de la mesa sin fallar. Además, el esfuerzo cortante máximo no afecta en la deformación de la mesa ya que siempre se encuentra en un rango elástico al aplicar la fuerza en la estructura, dando así un factor de seguridad total de 1.44 como se observa anteriormente.

2.3 Diseño electrónico

Para el desarrollo del circuito electrónico se tomó en cuenta dos secciones fundamentales las cuales son: puente de Wheatstone y amplificadores operacionales. En nuestro caso de estudio realizamos placas independientes de los circuitos. Partiendo de un esquema general donde el eje más sensible deberá estar compuesto por puentes de Wheatstone completos, mientras que los ejes fuertes o más rígidos estarán compuestos por semi puentes de Wheatstone, tomando en cuenta que los amplificadores serán los mismo para cada eje.

En cuanto a los amplificadores operacionales, utilizamos los circuitos integrados AD620 los cuales son los amplificadores con mejores resultados en el mercado. En la etapa de amplificación dependiendo la diferencia de voltaje de los puentes se puede obtener una amplificación 100:1 o 10:1 dependiendo el caso. Los potenciómetros ocupados para esta etapa de ganancia son de 10 kilo ohmios ya que nos permite variar las ganancias anteriormente mencionadas.

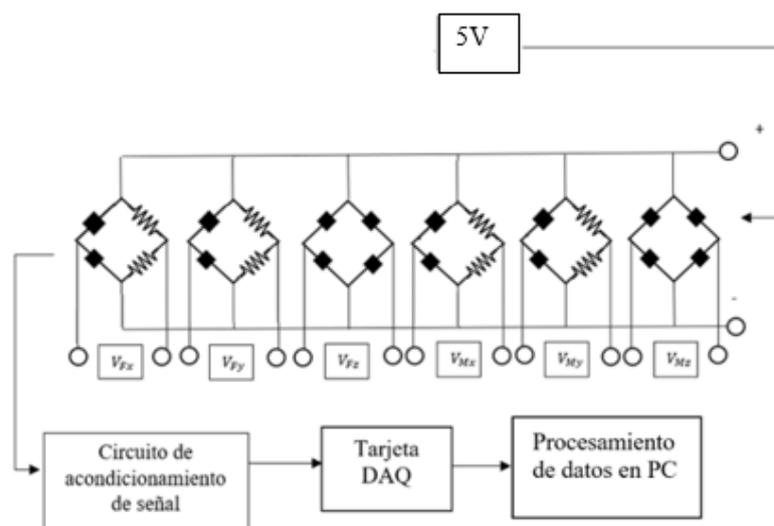


Figura 19 Configuración Puente de Wheatstone para Fuerzas/Momentos.

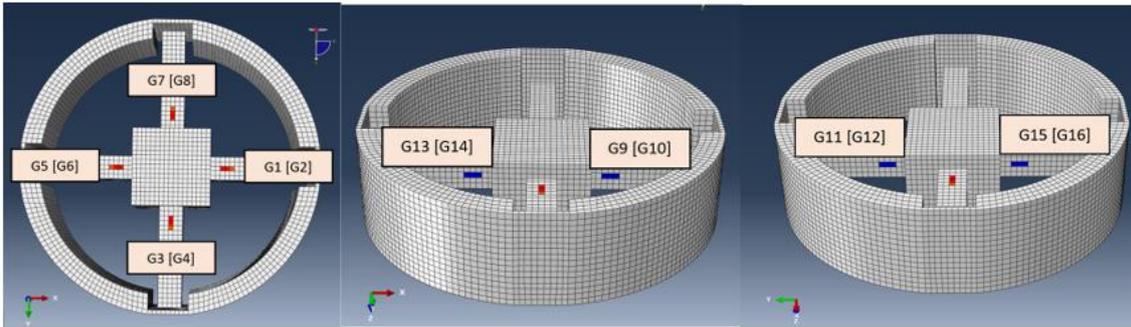


Figura 20 Configuración Galgas Extensiométricas para conexión de Puente de Wheatstone para Fuerzas/Momentos

- Galgas del puente de Wheatstone para medición de Fuerza X: G15(4;4), G12(2;4).
POSITIVO DERECHA (2)
- Galgas del puente de Wheatstone para medición de Fuerza Y: G13(1;2), G10(3;2).
- Galgas del puente de Wheatstone para medición de Fuerza Z: G2(3;3), G3(2;1), G6(1;3), G7(4;1).
- Galgas del puente de Wheatstone para medición de Momento X: G4(2;3), G8(4;3)
- Galgas del puente de Wheatstone para medición de Momento Y: G1(3;1), G5(1;1)
- Galgas del puente de Wheatstone para medición de Momento Z: G9(3;4), G11(2;2), G14(1,4), G16(4;2).

En la sección de simulaciones se podrá observar el esquema electrónico utilizado para las dos secciones de circuitería eléctrica, además es importante mencionar que para alcanzar un equilibrio en el puente de Wheatstone es necesario utilizar potenciómetros de 1 kilo ohmio con un valor variable de 350 ohmios correspondientes a la resistencia de las galgas extensiométricas. Por último, es necesario tomar en cuenta que existen 6 amplificadores conectados a 6 puentes correspondientes a las fuerzas /momentos: FX, FY, FZ, MX, MY, MZ.

2.4 Simulaciones

Simulaciones de esfuerzos de la plataforma superior del sensor

Se procede a realizar simulaciones del esfuerzo de Von Mises y Factor de Seguridad en la placa cuadrada y circular con el fin de comparar sus resultados y verificar la cercanía de la equivalencia. Para encontrar los valores de las simulaciones y realizar una comparación adecuada, se marcaron 5 puntos del centro de la placa a uno de sus extremos tanto para la cuadrada como para la circular. Estos puntos tienen una separación de 0,4 mm como se muestra en las siguientes figuras ordenadas primero para la plataforma cuadrada y luego la circular, ambas cumpliendo con todos los cálculos anteriormente realizados, tanto para el esfuerzo aguantando una carga de 4500 N y el factor de seguridad de 1.5 superior.

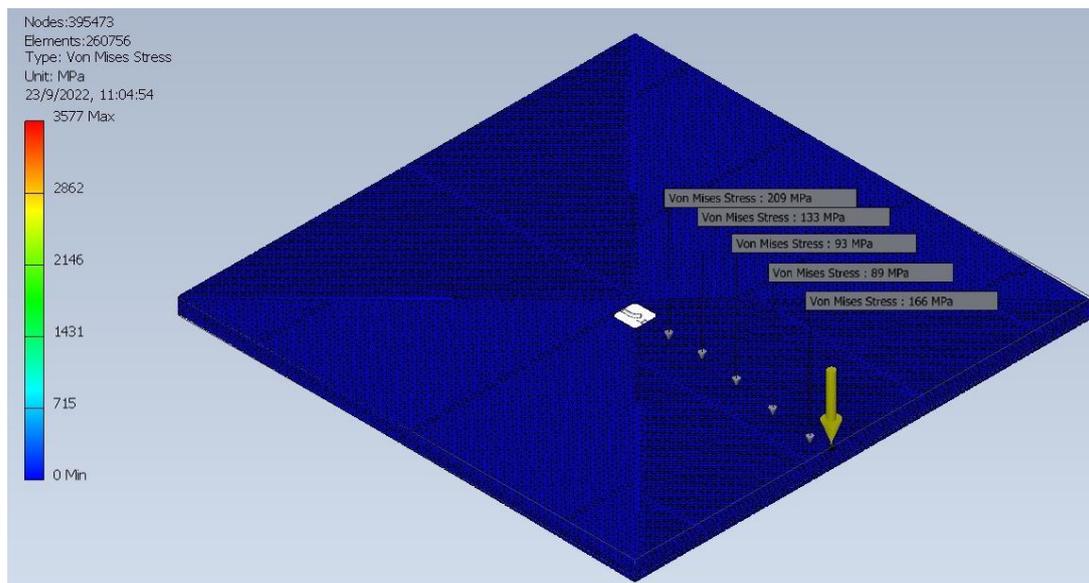


Figura 21 Esfuerzo de Von Mises placa cuadrada

Descripción: Simulación del esfuerzo de Von Mises de la placa cuadrada en Autodesk Inventor

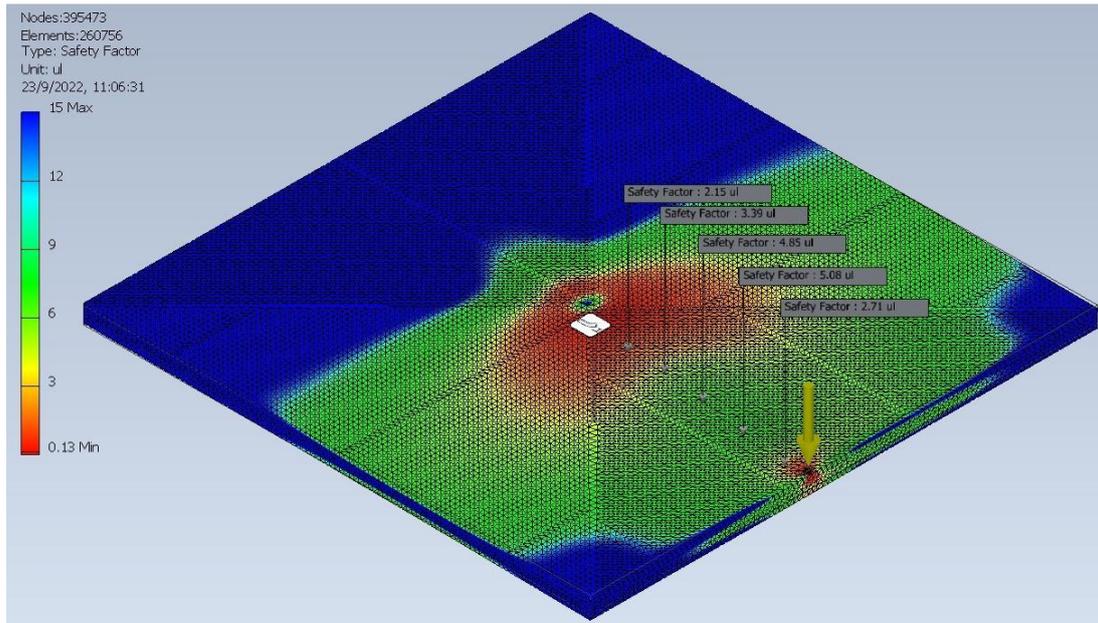


Figura 22 Factor de seguridad placa cuadrada.

Descripción: Simulación del factor de seguridad de la placa cuadrada en Autodesk Inventor

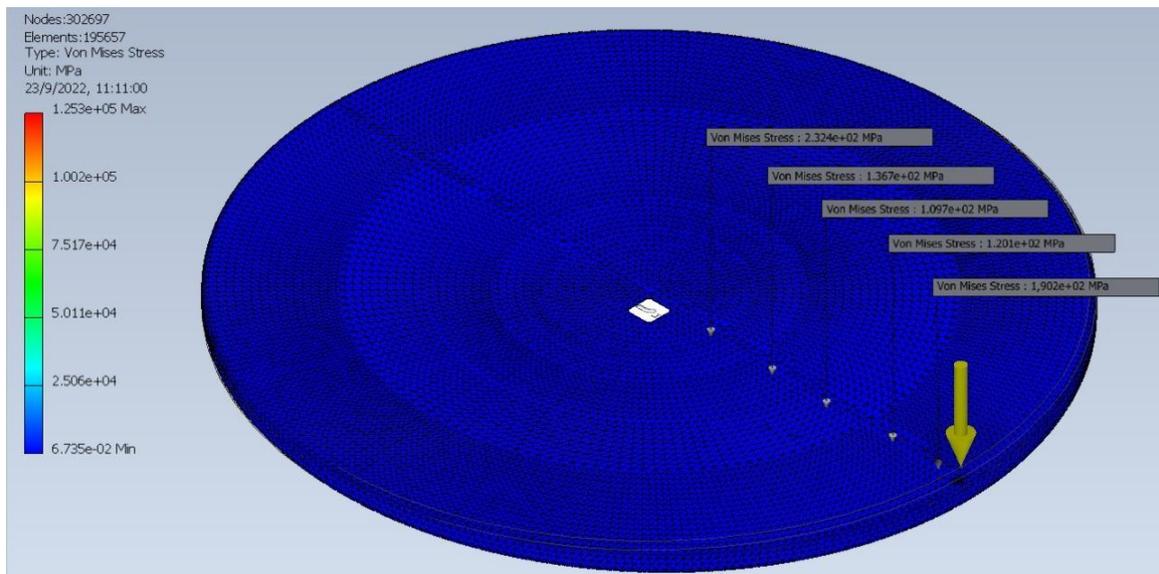


Figura 23 Esfuerzo de Von Mises placa circular

Descripción: Simulación del esfuerzo de Von Mises de la placa circular en Autodesk Inventor

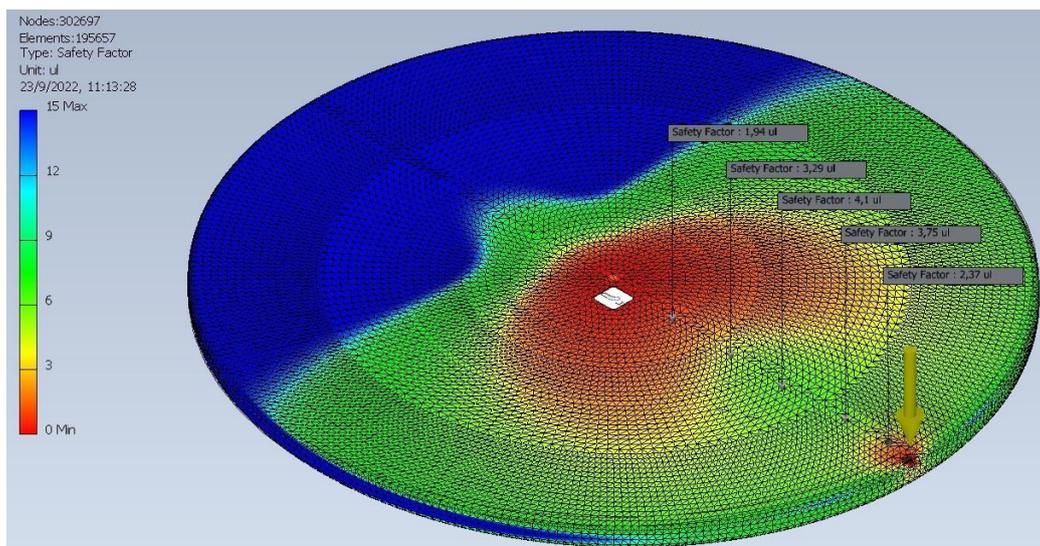


Figura 24 Factor de Seguridad placa circular

Descripción: Simulación del factor de seguridad de la placa circular en Autodesk Inventor

En la tabla siguiente se muestra los resultados de las simulaciones de manera tabulada en los 5 diferentes puntos aplicados en la placa circular y cuadrada.

Tabla 7 Resultados obtenidos placa circular

Descripción: Resumen de los datos obtenidos en la simulación para la placa cuadrada y circular

#	<i>Geometría placa cuadrada</i>		<i>Geometría placa circular</i>	
	Esfuerzo de Von Mises [MPa]	Factor de seguridad	Esfuerzo de Von Mises [MPa]	Factor de seguridad
1	209	2,15	232	1,94
2	113	3,39	136	3,29
3	93	4,85	109	4,1
4	89	5,08	120	3,75
5	166	2,71	190	2,37

Utilizando la fórmula del error porcentual con los datos de la tabla anterior se obtiene el error porcentual de las placas con diferentes geometrías.

Tabla 8 Error porcentual de las simulaciones

Descripción: Cálculo del error porcentual en relación con la placa cuadrada (aproximada) y placa circular (real)

ERROR PORCENTUAL DE LA PLACA APROXIMADO VS REAL

#	Esfuerzo de Von Mises [%]	Factor de seguridad [%]
1	9,91	10,82
2	16,91	3,04
3	14,68	18,29
4	25,83	35,47
5	12,63	14,35

Una vez realizada la simulación de la placa circular, se realiza una comparación del resultado del factor de seguridad calculado de $n = 2,13$ y el factor de seguridad obtenido en la simulación de $n = 2.37$, los cuales corresponden al mismo punto de análisis. El error porcentual que se obtiene es de 11.26%.

Simulaciones de la mesa de calibración en Autodesk Inventor

Se realiza la simulación de soldadura en todas las uniones del tubo estructural cuadrado, así como la adición de la placa, las cuales poseen de material base acero AISI 1045. Asimismo, se muestran las simulaciones realizadas en la mesa de calibración seleccionada, en donde, la primera simulación es del esfuerzo de Von Mises y la segunda simulación es acerca del factor de seguridad. Estas simulaciones se realizan con el propósito de tener una idea aproximada sobre si el prototipo funcionará previo a la fabricación de este, de esta manera, la carga con la que se trabaja es de 1960 N.

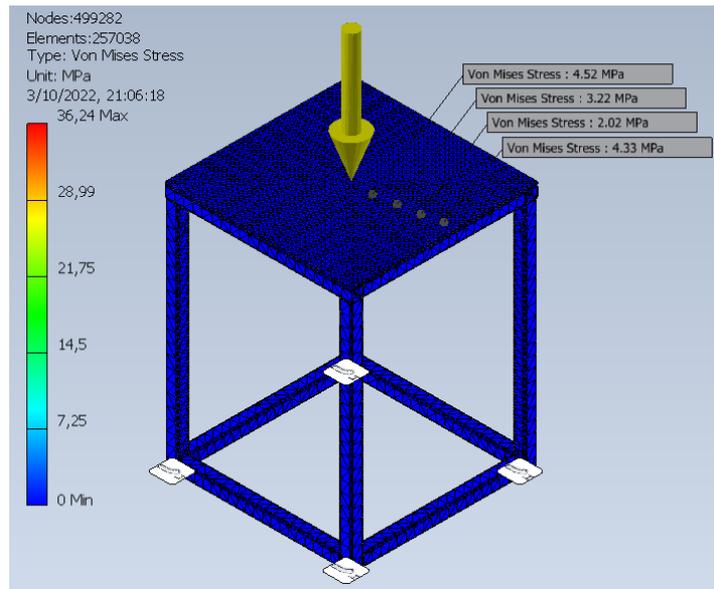


Figura 25 Esfuerzo de Von Mises Prototipo de calibración

Descripción: Esfuerzo de Von Mises Prototipo de calibración en Autodesk Inventor

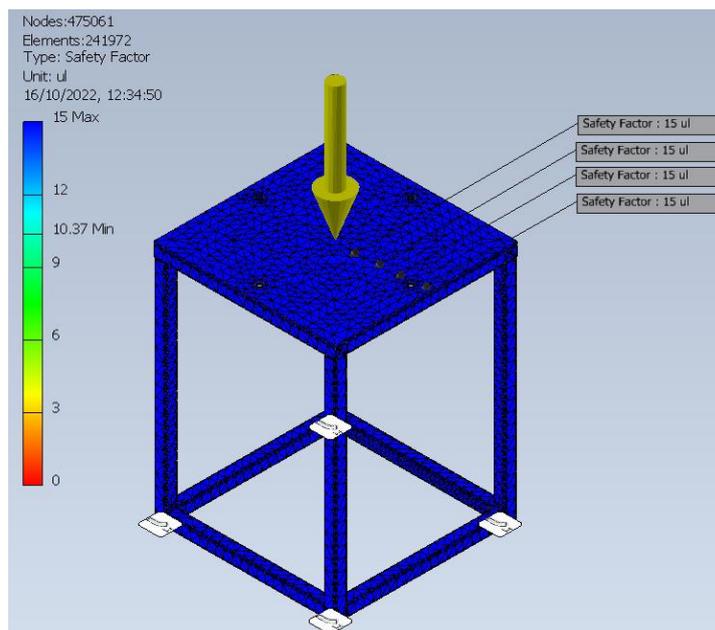


Figura 26 Factor de seguridad Prototipo de calibración

Descripción: Factor de seguridad Prototipo de calibración en Autodesk Inventor

Debido a que la carga es completamente axial, los factores de seguridad son máximos en todos los puntos, además de que no existe pandeo local y global en la estructura.

Simulaciones de PROTEUS

A continuación, se muestran los diseños electrónicos utilizados para los amplificadores y puentes de Wheatstone, además se muestra el esquemático y la visualización 3D de los circuitos electrónicos. Todo esto se simuló en el software Proteus 8 el cual es un software de análisis electrónico donde nos permite realizar simulaciones de los sistemas necesarios.

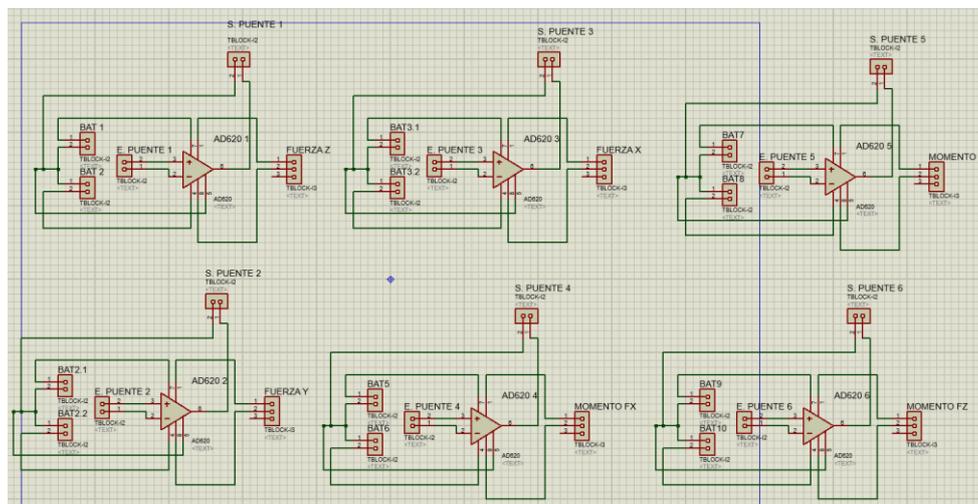


Figura 27 Esquemático y conexiones electrónicas Amplificadores Operaciones para Fuerzas/Momentos.

Descripción: Diseño PROTEUS Amplificadores operacionales

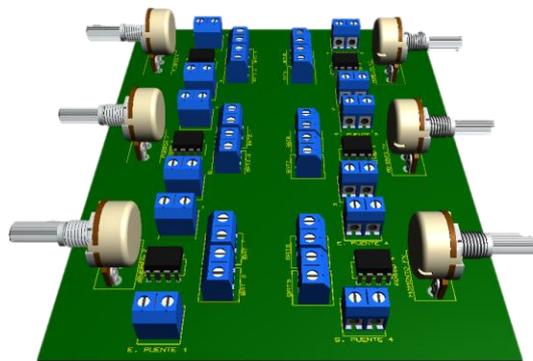


Figura 28 Visualización 3D de Amplificadores Operacionales para Fuerzas/Momentos

Descripción: Diseño PROTEUS con visualización esquemática de los amplificadores operacionales

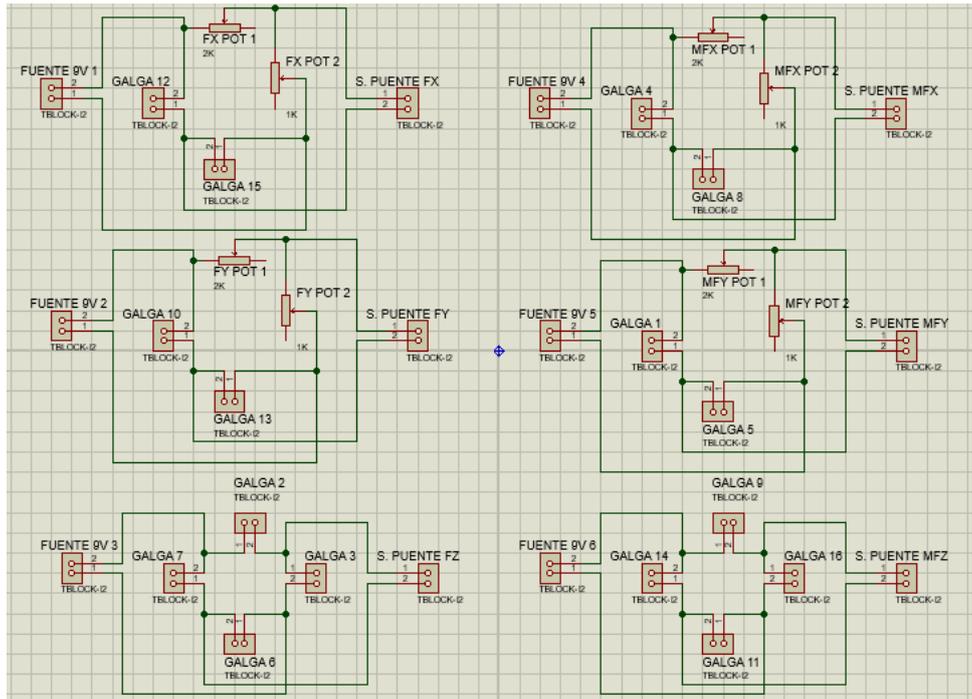


Figura 29 Esquemático y conexiones electrónicas de puentes de Wheatstone para Fuerzas/Momentos.

Descripción: Diseño en PROTEUS de los puentes de Wheatstone

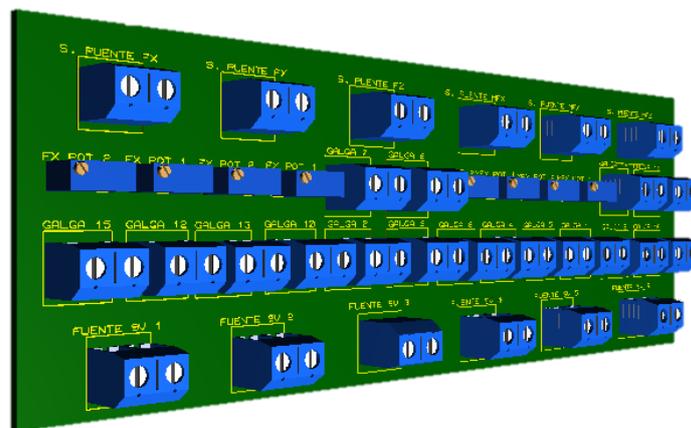


Figura 30 Visualización 3D de puentes de Wheatstone para Fuerzas/Momentos.

Descripción: Diseño en PROTEUS con visualización esquemática de los puentes de Wheatstone

2.5 Planos de construcción

Para el desarrollo del proyecto, previo a la manufactura del sensor y el prototipo de calibración es necesario tener los planos de los componentes a fabricar. Por ende, es necesario especificar la geometría con las medidas y tolerancias exactas de cada parte, incluyendo el material y la cantidad requerida, y además de los planos de conjunto tanto para el sensor como para el prototipo de calibración. Por ello, los planos individuales de cada componente se pueden apreciar en la sección de anexos de la siguiente forma: plano del sensor de fuerza (Anexo B), plano de placa protectora (Anexo C), plano de la carcasa inferior (Anexo D), plano de la plataforma superior (Anexo E), plano de platina de sujeción (Anexo F), plano de la estructura de calibración (Anexo G), plano de placa base (Anexo H), plano de plataforma superior de calibración (Anexo I), plano de polea (Anexo J), plano de estructura de polea (Anexo K); y finalmente el plano de conjunto correspondiente a la base de calibración (Anexo L).

2.6 Plan de manufactura

Uno de los factores principales dentro de la construcción del proyecto, es el plan de manufactura, en donde se debe identificar los materiales y el proceso de cada elemento del ensamble del proyecto. Los componentes para analizar son: Sensor de fuerza, carcasa inferior, platinas de sujeción, plataforma superior de calibración, placa base, estructura de poleas, estructura de calibración y plataforma superior de calibración. La elección del proceso de manufactura se basa en los elementos que ofrecen un acabado que cumpla con el objetivo y que se encuentren al alcance. Véase Anexo M y N.

Diagrama de procesos del ensamblaje del sensor de fuerza

En este caso, se muestra el diagrama de procesos del ensamble del sensor de fuerza (Anexo N), en donde se tiene cinco elementos principales; bloque principal, componentes

electrónicos, carcasa inferior, plataforma superior, placa protectora y patinas de sujeción. En estos se realizan preparaciones e instalaciones de galgas extensiométricas y el cableado de puentes de Wheatstone en el bloque principal y la instalación de PCB, DAQ y conexiones en la carcasa inferior, se realizan inspecciones con el fin de realizar un control. Luego se realiza un ensamble con pernos de la plataforma superior, placa protectora y la platina de sujeción y, finalmente, si el ensamble es aprobado mediante la inspección se tendrá el sensor de fuerza de seis grados de libertad armado y listo para usarse.

Diagrama de procesos del ensamble del sistema de calibración del sensor

Para esta figura (Anexo O), se encuentra el diagrama del proceso del ensamble del sistema de calibración del sensor, en el cual como elementos principales se tiene el sensor de fuerza previamente ensamblado, la placa base y la estructura de calibración. Para esto se realiza una preparación, acople de las partes y se inspecciona con el fin de tomar la decisión de ensamblar, mediante pernos y tornillos, la plataforma superior de calibración, la estructura de poleas & poleas para colocar las pesas. Se toma la última decisión y se obtiene el ensamble final de la base de calibración del sensor.

2.6 Hoja de procesos

Por otra parte, un factor importante dentro de los procesos de manufactura es los equipos de protección personal (EPP), los cuales su función principal es la de prevenir accidentes laborales y salvaguardar la vida de las personas que manejan las herramientas. De esta manera, para las actividades de mecanizado (uso de la fresadora, soldadura, taladrado, esmerilado, torneado avellanado) se utilizó equipos que protegen partes específicas del cuerpo, entre las cuales están; gafas de protección visual, protectores auditivos, mascarilla, mandil, guantes de cuero y zapatos con punta de acero.

Hoja de Proceso del Sensor de Fuerza y de la Base de Calibración

Para la realización del plan de manufactura del sensor de fuerza cada uno de los componentes del sensor necesariamente son definidos mediante las hojas de procesos en donde se explica cómo llevar a cabo el proceso necesario y la manera en que debe ser maquinado el componente, también indicando el plano con las vistas principales y el modelado 3D de cada pieza. La generación de las hojas de proceso permite que la manufacturación sea estándar del producto al tener diferentes detalles sobre el proceso del componente dando la posibilidad de replicar el producto con el mismo acabado en caso de la creación de más sensores de fuerza. En las siguientes figuras se muestra las hojas de procesos de los siguientes elementos del sensor los cuales son: la estructura del sensor de fuerza, las platinas de sujeción carcasa inferior del sensor y la platina superior. Además, también se realizan las hojas de proceso de la base de calibración la cual tiene los siguientes elementos: estructura poleas, estructura de la mesa de calibración, plataforma superior. Donde cada una de las hojas de procesos anteriormente descritas poseen sus propias tareas con su maquinaria y herramienta necesaria, así como las observaciones del caso y el tiempo de demora de cada operación. Todas las hojas de procesos se encuentran en la sección de anexos ordenados de la siguiente manera: sensor de fuerza (Anexo O), platinas de sujeción (Anexo P), carcasa inferior (Anexo Q), plataforma superior (Anexo R), estructura de poleas (Anexo S), placa base (Anexo T), estructura de calibración (Anexo U) y plataforma superior de calibración (Anexo V).

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Análisis de riesgos

Es importante durante el desarrollo del sensor de fuerza de seis grados de libertad establecer los riesgos que implican su desarrollo, diseño y construcción del prototipo de calibración, en donde se analizan aquellos factores que pueden perjudicar su aplicación durante todo el proceso de fabricación.

Por lo que a continuación se muestra una tabla en la que se le asigna un código a cada uno de los riesgos sin importar el orden de numeración, además se describe el riesgo encontrado en la elaboración del proyecto. La prioridad en base al impacto y la probabilidad serán calificados de 1-5 (1 representa el menor y 5 representa el mayor) siendo múltiplos ambos para saber qué riesgo tiene mayor impacto.

Por otro lado, se asigna un responsable de estar al tanto de cada riesgo mientras el proyecto se encuentra en desarrollo, así mismo la toma de decisión representa una solución ante la posible ocurrencia del riesgo para mitigar problemas. También se muestra el estatus del riesgo como vigente o finalizado el cual cambia según se esté desarrollando el proyecto.

Finalmente, se tiene las observaciones los cuales son comentarios adicionales para controlar los riesgos o para seguir recomendaciones con el fin de mejorar la seguridad del desarrollo del sensor y prototipo de calibración. Es importante recalcar que los colores de prioridad establecen el nivel de impacto, donde el color rojo presenta alto impacto y el color verde bajo impacto al proyecto.

Tabla 9 Análisis de riesgos

Descripción: Desarrollo de los riesgos encontrados en el proceso de elaboración del sensor de fuerza de seis grados de libertad

Código	Descripción	Impacto x Probabilidad	Prioridad	Responsable	Toma de decisión	Estatus	Observaciones
001	El maquinado de precisión para la base o la plataforma superior del prototipo de calibración no es admisible con las máquinas disponibles en el laboratorio de la Universidad y puede provocar fallas en el sensor	5x5	25	Luis Velasco	Buscar un taller dedicado al corte preciso de metales que asegure calidad	Vigente	En base a los procesos de manufactura y el presupuesto tomar la mejor decisión al elegir el taller responsable
006	Durante el proceso de extracción y aplicación de las galgas extensiométricas, hechar a perder el funcionamiento del sistema	4x4	16	Juan Carlos Ramos	Manipular con mucho cuidado todo el equipo al momento de extraer y colocar las galgas	Vigente	Seguir las indicaciones recomendadas por el proveedor en la extracción y colocación de galgas
005	Tener resultados no deseados en base a lo esperado versus lo obtenido en los cálculos	5x3	15	Christian Rosero	Asegurarse de que los cálculos sean acorde al diseño y construcción deseado	Vigente	Tener en cuenta las simulaciones realizadas durante todo el proceso de diseño y su índice de error, entre lo esperado y lo obtenido
004	Tener costos altos de manufactura	4x3	12	Daniel Flores	Investigar el mercado actual entre varios proveedores y constructores para hacer un análisis económico viable	Vigente	Analizar las opciones en base al presupuesto, ubicación, facilidad y calidad del mercado
002	Realizar una mala calibración de acuerdo a lo solicitado por el cliente y la norma de calibración	5x2	10	Miembros del proyecto	Realizar el prototipo de calibración de manera precisa y eficiente	Vigente	Realizar los cálculos correctos del diseño del prototipo para evitar errores
003	La seguridad de las personas de estudio que van a probar el sensor	5x2	10	Daniel Flores	Asegurarse de tener un correcto diseño de la plataforma superior del sensor para estabilizar el equipo	Vigente	Verificar la sujeción de todos los pernos que conforman el equipo
010	Fallo de la estructura de soporte y la plataforma superior de calibración del equipo	5x2	10	Miembros del proyecto	Verificar mediante las simulaciones y los cálculos que la estructura no fallará	Vigente	Emplear una correcta técnica de soldadura y sujeción de pernos en toda la estructura
009	Mal manejo de los fondos provistos por la Universidad	2x3	6	Daniel Flores	Llevar al día la cuenta de egresos y preparar fondos en caso de ser necesario	Vigente	Tener un registro de todos los gastos al momento y anticiparse a eventos fortuitos
007	Perjudicar el sistema eléctrico por interacción de agua, polvo o factores externos	5x1	5	Miembros del proyecto	Prevenir el contacto del equipo con factores externos que puedan afectar el correcto funcionamiento	Vigente	Al momento de diseñar todo el sistema, tener en cuenta la protección contra agua, polvo o factores externos
008	Al calibrar el equipo, causar accidentes mediante la incorrecta manipulación de discos de pesas	4x1	4	Juan Carlos Ramos	Tener cuidado al manipular cualquier objeto pesado durante la calibración	Vigente	Verificar que el sistema de sujeción a los discos esté armado de manera correcta

Como se puede observar en la tabla anterior, los riesgos encontrados y analizados establecen que hay un gran riesgo en el maquinado de precisión de las placas, uniones empernadas o perfiles que se necesitan para la construcción del equipo correspondiente al sensor como puede ser en la base o plataforma superior del prototipo de calibración, por lo que se requiere contratar profesionales dedicados al corte de precisión con la finalidad de asegurar la calidad del sensor.

También es importante para mitigar los riesgos llevar un correcto flujo de trabajo durante todo el proceso, ya que como se puede observar muchos de los riesgos dependen de la correcta ejecución de los cálculos y simulaciones de las estructuras del equipo, así como la aplicación de estos durante la construcción y ensamble de todas sus partes. Así mismo, es fundamental llevar un correcto manejo de las cuentas con el fin de optimizar costos y elegir la opción que más se ajuste y cumpla las necesidades, teniendo en cuenta el presupuesto otorgado por la Universidad, pero sin dejar de lado la calidad que se busca en el equipo.

3.2 Plan de testeo

Para realizar las pruebas de testeo del prototipo se inicia ensamblando el sensor de fuerza a la mesa de calibración, con el sensor colocado correctamente en la mesa de calibración se cambia la placa superior por la placa de calibración. Con el uso del DAQ se conectan las diferentes salidas de las diferentes fuerzas y momentos a los puertos del DAQ, tomar en consideración que, si la conexión no está correctamente acoplada se muestra valores de señal erróneas, al conectar se procede a realizar el método de calibración mostrado en el manual, en el cual se debe ir por eje probando con distintos pesos para asegurar el funcionamiento.

3.3 Seguridad del diseño

Dentro de la seguridad de la aplicación de este prototipo, se deben establecer puntos de seguridad, en donde mediante el desarrollo del diseño del sensor y la estructura de calibración se determinaron algunos riesgos que pueden ocurrir al momento de usar el sensor y el prototipo de calibración, para de este modo, evitar lesiones y/o accidentes con el uso de este. De esta manera, como puntos a tomar en cuenta se debe asegurar que la plataforma superior del sensor se encuentre bien acoplada y se encuentre estable para que

cuando una persona pise esta placa no se desestabilice. Además, al momento de utilizar el prototipo de calibración, es necesario asegurarse de coger las pesas de manera firme ya que si alguna de estas se cae sobre los pies puede generar lesiones, por lo que, una opción para contrarrestar esto es la posibilidad de utilizar zapatos con punta de acero.

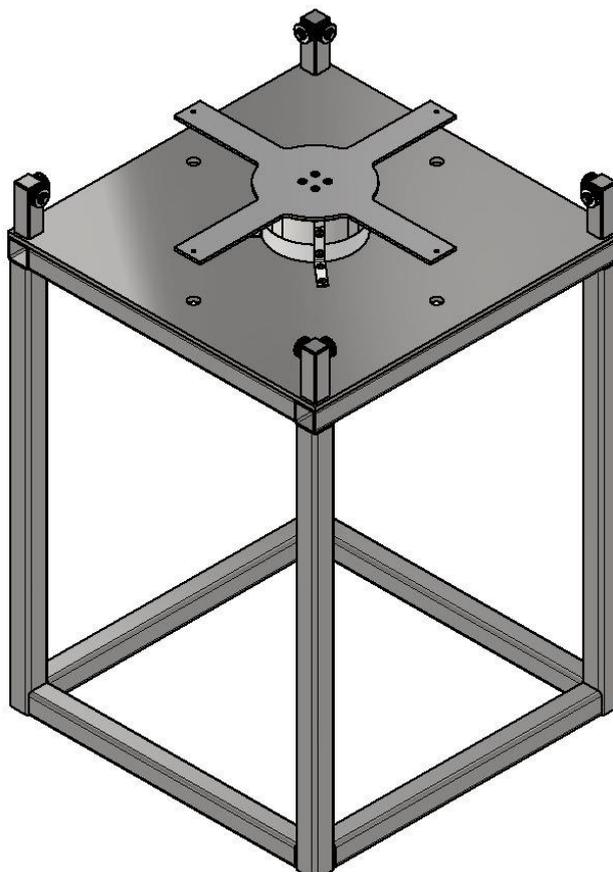
3.4 Manual de mantenimiento y operación

A continuación, se presenta el manual de operación y mantenimiento para el correcto uso y cuidado del sensor de fuerza de 6 grados de libertad junto con su prototipo de calibración, es importante leer este manual antes de manipular el equipo para conocer sus componentes y como hay que operarlos en conjunto para realizar una calibración adecuada.

**IMPORTANTE:
LEER ANTES DE USAR**



Instrucciones de funcionamiento y seguridad



Manual de mantenimiento y operación de un sensor de fuerza/momento de 6 grados de libertad y prototipo de calibración para aplicaciones de Biomecánica

Contactarse para obtener información para el consumidor y ubicaciones de servicio

Daniel Flores

+593 992927733

fdaniel742@gmail.com

Juan Ramos

+593 983350081

jramosr13@outlook.com

Christian Rosero

+593 99 2927733

erian1600@yahoo.com

Luis Velasco

+593 991348592

lfvv00@hotmail.com

Contactarse para obtener información acerca de su uso

Advertencias generales de seguridad para el sensor de fuerza/momento



ADVERTENCIA

Lea todas las advertencias de seguridad y todas las instrucciones. Si las advertencias no se siguen, podrían causar un funcionamiento erróneo o daños permanentes/temporales en el equipo

GUARDAR TODAS LAS ADVERTENCIAS E INSTRUCCIONES PARA REFERENCIA FUTURA

La expresión "sensor" en las advertencias se refiere a un dispositivo sensible alimentado por una red eléctrica

GUARDE ESTAS INSTRUCCIONES

Seguridad del área de trabajo

Mantenga el área de trabajo limpia y bien iluminada. Las áreas desordenadas u oscuras aumentan la probabilidad de que se produzca un perjuicio y/o deterioro del sensor.

No utilice el sensor en presencia de líquidos, gases o polvos inflamables. El polvo puede producir que el sensor se deteriore o su funcionamiento presente cambios en la precisión.

Mantenga alejado el equipo de personas que no estén capacitadas para manejar el sensor. Al manejar el equipo por personas no capacitadas puede provocar fallos en el sensor.

Utilice vestimenta adecuada al momento de realizar las pruebas de calibración, no utilice faldas, pantalones cortos, accesorios o ropa holgada. Los EPP adecuados para esta operación son: botas con punta de acero y mandil. Mantener la ropa y cabello alejados del eje de la máquina. Al trabajar con ropa holgada, cabello largo o accesorios pueden atraparse con las partes móviles de la máquina.

Seguridad mecánica

La masa aplicada en el sensor no debe exceder los 400 kg contando el efecto de la gravedad o fuerzas exteriores.

Seguridad eléctrica

El sensor debe estar excelso de agua o polvo, ya que puede ocasionar daños en los circuitos eléctricos del sensor. Asegúrese de utilizar el sensor en un lugar seco, sin humedad.

No exponga la máquina a la lluvia o escenarios mojados. Esto aumenta la posibilidad de accidentes electrónicos entre los circuitos y el agua.

Seguridad Personal

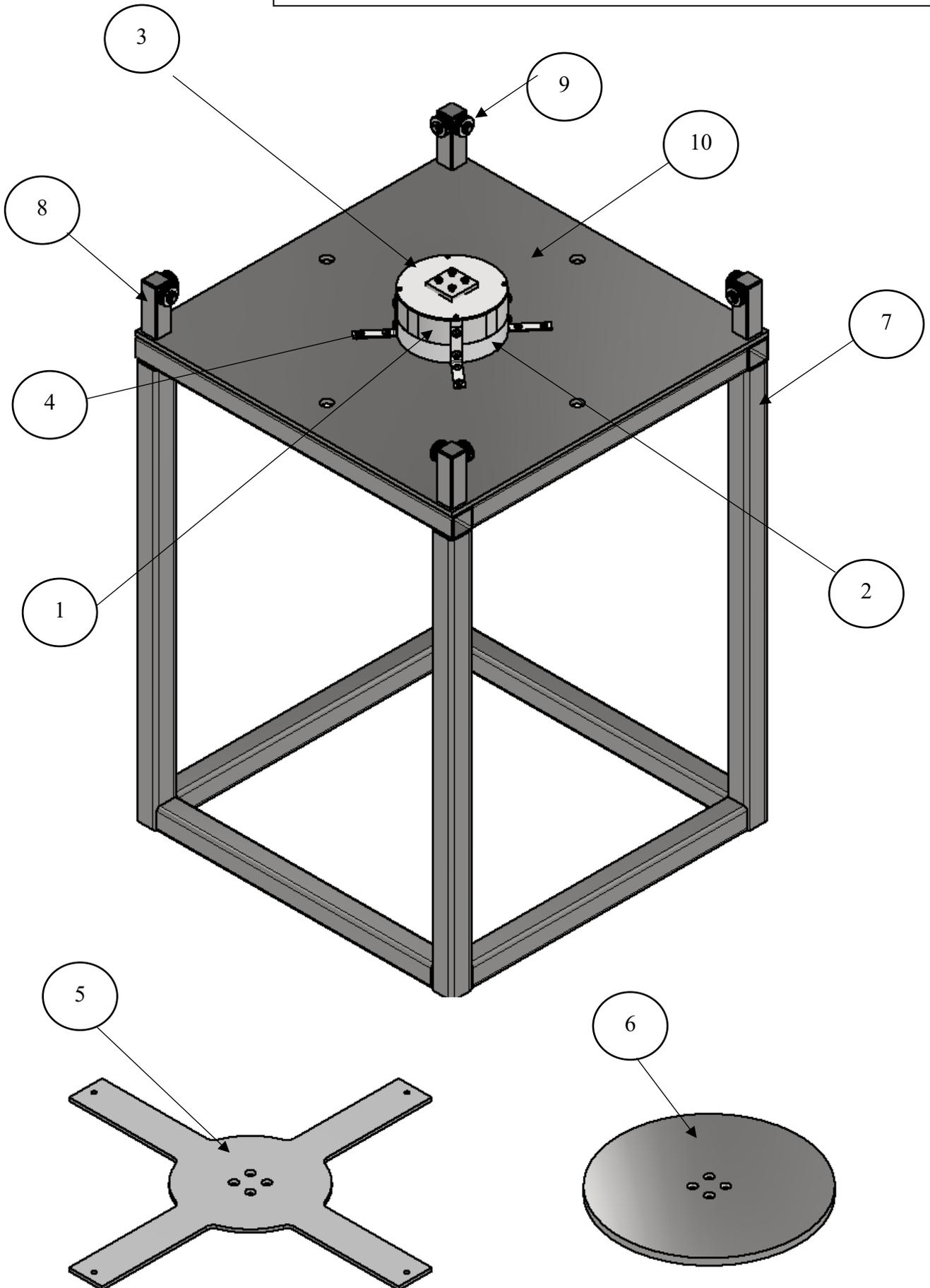
Manténgase en una posición de trabajo cómoda y equilibrada. Asegúrese que el punto de aplicación de la fuerza se encuentre libre de compuestos que puedan desequilibrar o generar una superficie lisa.





ADVERTENCIA

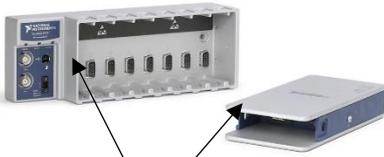
Antes de realizar cualquier ajuste, ensamble o cambio de accesorios verificar que los componentes estén completos y que el equipo este desconectado.





ADVERTENCIA

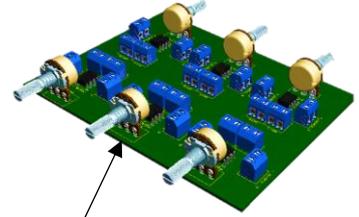
Antes de realizar cualquier ajuste, ensamble o cambio de accesorios verificar que los componentes estén completos y que el equipo este desconectado.



11



12



13

No	Lista de Partes	Cantidad
1	Sensor de Fuerza	1
2	Carcasa Inferior	1
3	Placa Protectora	1
4	Platinas de Sujeción	4
5	Plataforma Superior de Calibración	1
6	Plataforma Superior	1
7	Estructura de Calibración	1
8	Estructura Poleas	4
9	Poleas	8
10	Placa Base	1
11	Tarjeta de adquisición de datos	1
12	PCB puente de Wheatstone	1
13	PCB Amplificadores Operacionales	1

NOTA: Verificar el todo el equipo este completo y con sus accesorios. No utilizar el equipo si este se encuentra dañado o en mal estado. Reemplazar las partes o accesorios dañados de ser necesario.

NOTA: Desconectar el DAC y limpiar el equipo y accesorios después de cada uso.

Mantenimiento



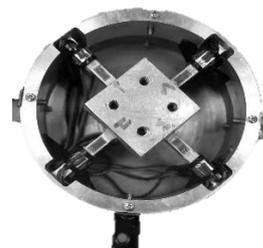
ADVERTENCIA

El mantenimiento interno de este equipo debe realizarse con una periodicidad semestral y el mantenimiento externo cada que sea necesario.

Mantenimiento preventivo

Para el mantenimiento interno:

- Retirar de manera cuidadosa la placa de acrílico, limpiar galgas extensiométricas de partículas de polvo mediante una brocha y reensamblar la placa de acrílico.
- Abrir la caja de acrílico y limpiar los circuitos electrónicos de partículas externas mediante el uso de aire comprimido.



Para el mantenimiento externo:

- En caso de ser necesario, pintar el prototipo de calibración y el sensor con pintura bate piedra.
- Lubricar las poleas de la mesa de calibración cada vez que se requiera calibrar el sensor.
- Limpiar constantemente el exterior del sistema de calibración, así como reajustar todos los pernos.



Mantenimiento predictivo

- Cambiar semestralmente los OPAMs (amplificadores operacionales) AD620



Manual de Operación para calibración de Fuerza/Momento



ADVERTENCIA

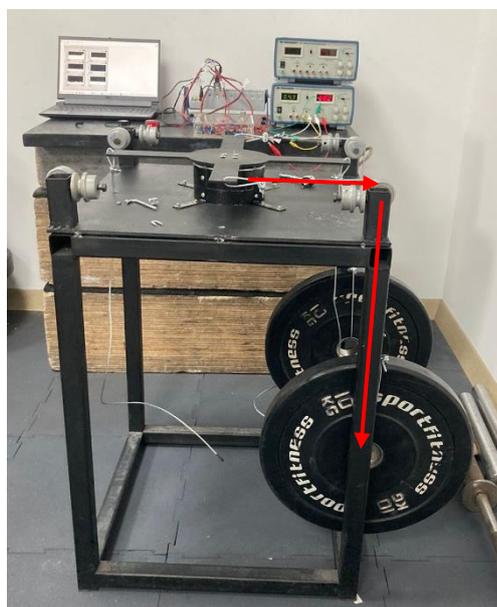
Calibrar la fuente de voltaje a la capacidad necesaria y al amperaje máximo de la fuente. Verificar las conexiones de voltaje positivo, negativo y Tierra.

NOTA: Previo a la calibración de las fuerzas/momentos ensamblar el sensor en el prototipo de calibración.

Calibración Eje X

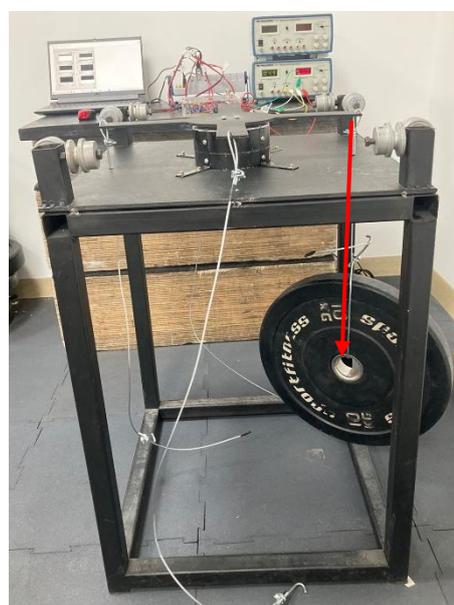
Fuerza X:

- 1) Realizar mediciones del amplificador correspondiente a la fuerza X sin peso.
- 2) Mover el potenciómetro del puente de Wheatstone hasta alcanzar una medición de voltaje cero (*tolerancia máxima: 0.001 V*)
- 3) Realizar mediciones de repetibilidad con una carga de 10 kg para observar errores de medición. (*Montar la carga en la dirección que se muestra en la figura por ambas poleas*)
- 4) Realizar mediciones de cargas progresivas de 0 a 50 kg. (*Montar la carga en la dirección que se muestra en la figura por ambas poleas*)



Momento X:

- 1) Realizar mediciones del amplificador correspondiente al momento X sin peso.
- 2) Mover el potenciómetro del puente de Wheatstone hasta alcanzar una medición de voltaje cero (*tolerancia máxima: 0.001 V*)
- 3) Realizar mediciones de repetibilidad con una carga de 10 kg para observar errores de medición. (*Montar la carga en la dirección que se muestra en la figura*)
- 4) Realizar mediciones de cargas progresivas de 0 a 50 kg. (*Montar la carga en la dirección que se muestra en la figura*)

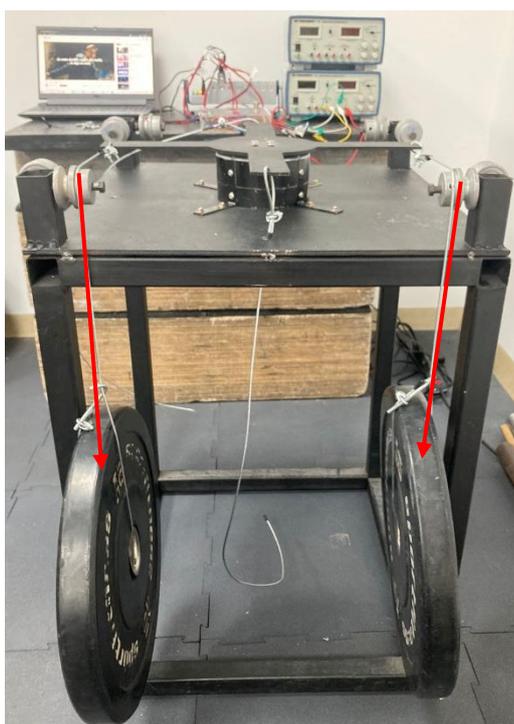


**ADVERTENCIA**

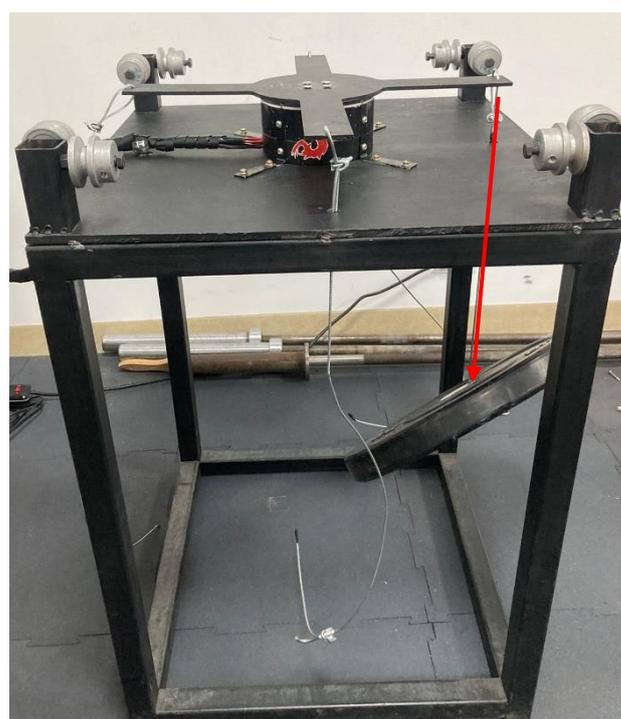
El mantenimiento interno de este equipo debe realizarse con una periodicidad semestral y el mantenimiento externo cada que sea necesario.

Calibración Eje Y**Fuerza Y:**

- 1) Realizar mediciones del amplificador correspondiente a la fuerza Y sin peso.
- 2) Mover el potenciómetro del puente de Wheatstone hasta alcanzar una medición de voltaje cero (*tolerancia máxima: 0.001 V*)
- 3) Realizar mediciones de repetibilidad con una carga de 10 kg para observar errores de medición. (*Montar la carga en la dirección que se muestra en la figura por ambas poleas*)
- 4) Realizar mediciones de cargas progresivas de 0 a 50 kg. (*Montar la carga en la dirección que se muestra en la figura por ambas poleas*)

**Momento X:**

- 1) Realizar mediciones del amplificador correspondiente al momento Y sin peso.
- 2) Mover el potenciómetro del puente de Wheatstone hasta alcanzar una medición de voltaje cero (*tolerancia máxima: 0.001 V*)
- 3) Realizar mediciones de repetibilidad con una carga de 10 kg para observar errores de medición. (*Montar la carga en la dirección que se muestra en la figura*)
- 4) Realizar mediciones de cargas progresivas de 0 a 50 kg. (*Montar la carga en la dirección que se muestra en la figura*)



Manual de Operación para calibración de Fuerza/Momento



ADVERTENCIA

El mantenimiento interno de este equipo debe realizarse con una periodicidad semestral y el mantenimiento externo cada que sea necesario.

Calibración Eje Z

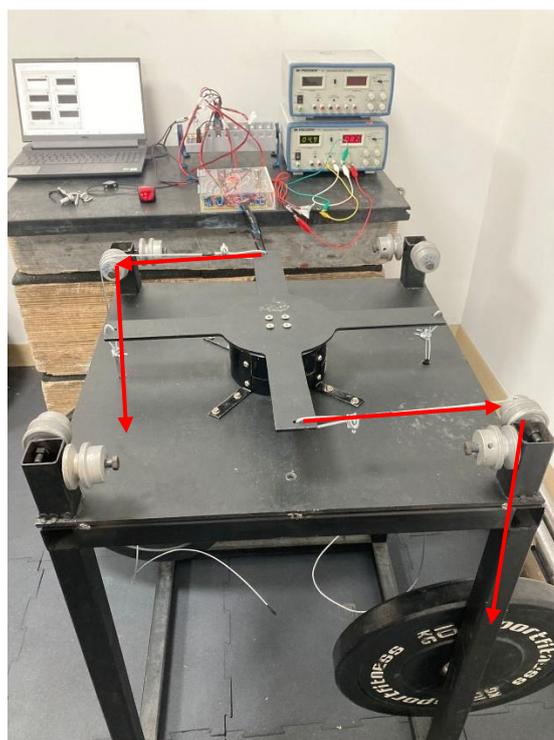
Fuerza Z:

- 1) Realizar mediciones del amplificador correspondiente a la fuerza Z sin peso.
- 2) Mover el potenciómetro del puente de Wheatstone hasta alcanzar una medición de voltaje cero (*tolerancia máxima: 0.001 V*)
- 3) Realizar mediciones de repetibilidad con una carga de 10 kg para observar errores de medición. (*Montar la carga en la dirección que se muestra en la figura por ambas poleas*)
- 4) Realizar mediciones de cargas progresivas de 0 a 50 kg. (*Montar la carga en la dirección que se muestra en la figura por ambas poleas*)



Momento Z:

- 1) Realizar mediciones del amplificador correspondiente al momento Z sin peso.
- 2) Mover el potenciómetro del puente de Wheatstone hasta alcanzar una medición de voltaje cero (*tolerancia máxima: 0.001 V*)
- 3) Realizar mediciones de repetibilidad con una carga de 10 kg para observar errores de medición. (*Montar la carga en la dirección que se muestra en la figura*)
- 4) Realizar mediciones de cargas progresivas de 0 a 50 kg. (*Montar la carga en la dirección que se muestra en la figura*)



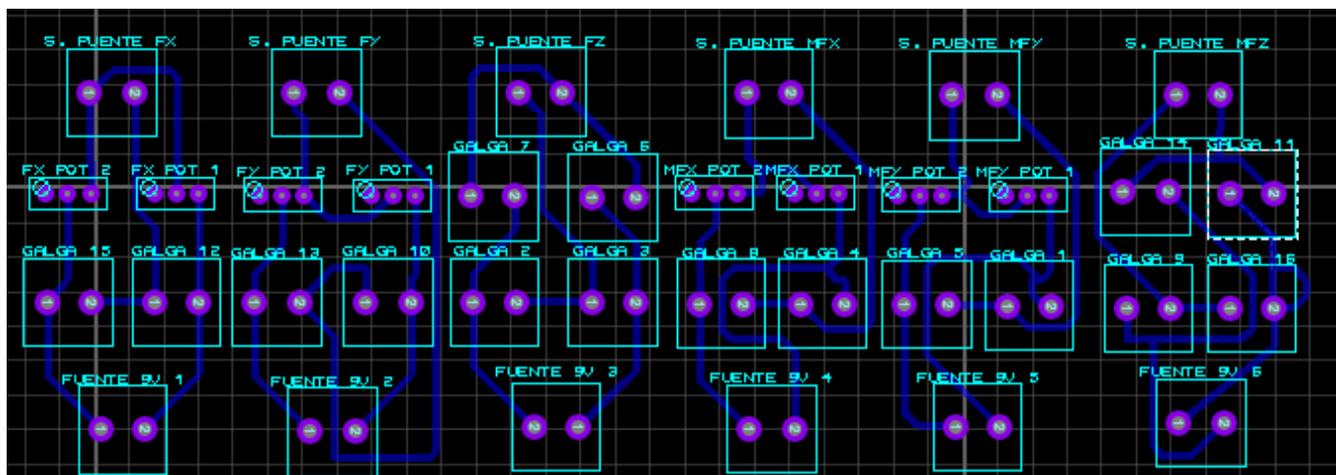
Manual de Operación para calibración de Fuerza/Momento



ADVERTENCIA

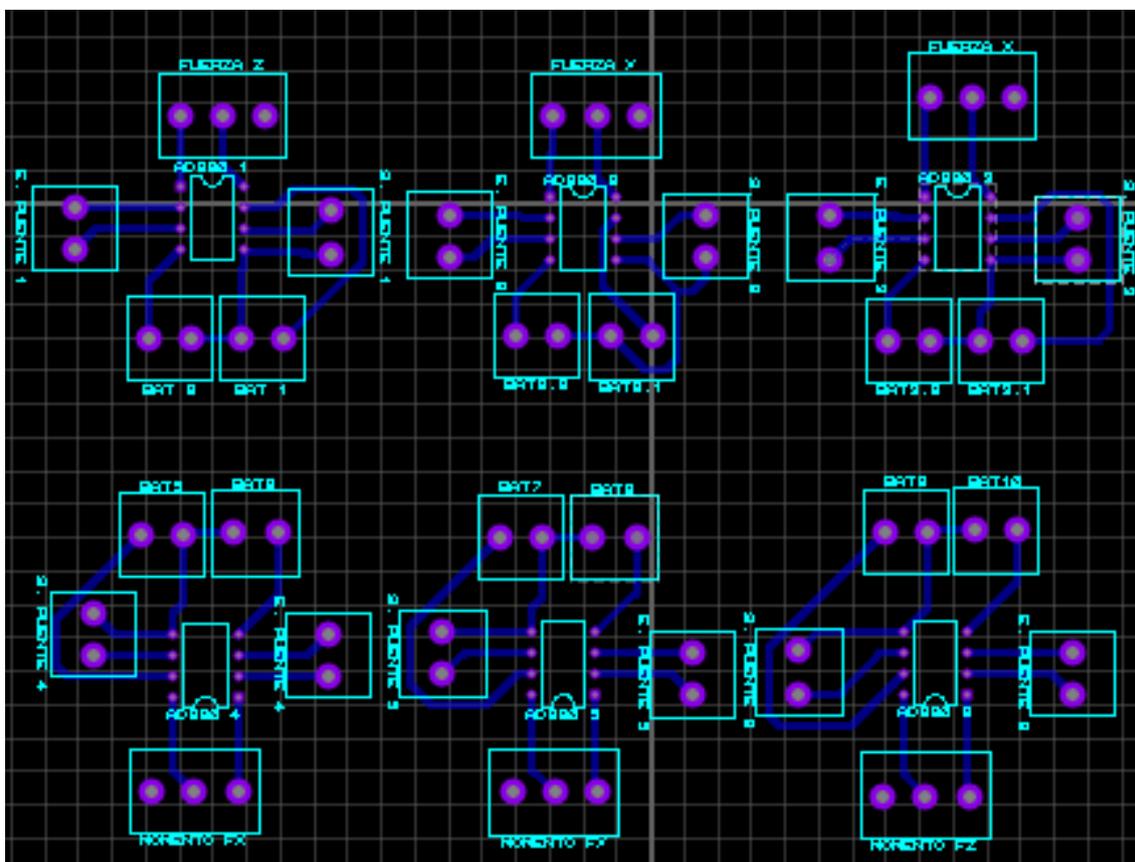
Tomar en cuenta la configuración de los Puentes de Wheatstone y amplificadores operacionales.

Configuración de Puentes de Wheatstone para Fuerzas X, Y, Z y Momentos X, Y, Z.



NOTA: La nomenclatura “S. puente #” representa “salida Puente de Wheatstone #”.

Configuración de Amplificadores Operacionales para Fuerzas X, Y, Z y Momentos X, Y, Z.



3.5 Reporte del diseño

Tabla 10 Lista de componentes y descripción

Descripción: Componentes utilizados para el desarrollo del proyecto

Componente	Descripción
Galga extensiométrica SGD-7/350-LY13 de OMEGA, USA	Se separan 16 galgas extensiométricas, las cuales poseen un material de aluminio con una resistencia nominal de 350 ohmios que se modifica cuando se presenta una deformación del material
Adhesivos para galgas extensiométricas de OMEGA, USA	Fueron adquiridos con el fin de adherir de manera correcta las galgas en la estructura interna del sensor
Bloque principal del sensor	Este bloque fue rectificado mediante un maquinado en CNC dentro del taller mecánico de la universidad, además se realizaron agujeros para implementar una placa de acrílica protectora con la sujeción de pernos
Plataforma superior del sensor	El material de esta plataforma es de acero AISI 1045, esta fue rectificada y se cambió su forma a una circular mediante un corte laser
Platinas de sujeción	Mediante estas platinas se puede enganchar la estructura del sensor con la mesa de calibración
Pernos	Se utilizan pernos de diferentes dimensiones de acero inoxidable con el fin de realizar el ensamblaje de los mecanismos del sensor y su

	estructura de calibración
Tuercas	Estas son empleadas para realizar las uniones mediante los pernos entre los elementos del sensor
Arandelas	Se usan con el fin de estandarizar las uniones mediante los pernos con los componentes del sensor
Cables de conexión tipo "macho - macho"	Cables convencionales de conexión para creación del circuito
Placa electrónica puente de Wheatstone y amplificadores operacionales	Las placas fueron diseñadas en el laboratorio de electrónica de la universidad en donde se soldaron y acoplaron los cables de conexión
Potenciómetros de precisión	Mediante estos potenciómetros establecidos en las placas electrónicas con el fin de mantener una resistencia específica de 350 Ohmios
Cautín y estaño para soldadura	Mediante estos instrumentos se realizó la soldadura de los cables para la conexión con las galgas extensiométricas
DAQ y Tarjeta de Adquisición de Datos de "National Instruments"	Instrumento capaz de adquirir datos con el fin de leer los voltajes de salida en tiempo real de cada puente de Wheatstone mediante el uso de una interfaz
Multímetro	Equipo usado con el fin de corroborar la continuidad en las placas electrónicas
Fuente variable de voltaje y corriente	Fuente de voltaje y corriente con el fin de alimentación el circuito del sensor.

Cinta Aislante - Taipe	Cinta usada con el fin de aislar y unir las uniones de los cables
Calibrador Vernier	Equipo utilizado para medir de manera precisa los elementos utilizados
Cable resistente de tensión	Cable resistente para soportar pesos de discos para colocarlos en la mesa de calibración
Poleas	Estas fueron implementadas en la mesa de calibración con el propósito de que el cable resistente pueda pasar sin ninguna complicación y generar momentos en los ejes
Discos de pesas para carga	Mediante estos discos se realizan las pruebas de funcionamiento de la estructura de calibración
Pernos sujetables	Mediante estos pernos se puede sujetar el cable para que soporte pesos y se adhiera a la placa de calibración superior
Tubo cuadrado estructural 20x20	Este tubo fue implementado con el fin de construir la base de soporte de la mesa
Plancha de acero al carbón 60x60 con 8 mm de espesor	Esta plancha fue utilizada con el fin de soportar el peso del sensor y los componentes de calibración
Plancha de acero al carbón 50x50 con 5 mm de espesor	Mediante esta plancha se realizó el corte laser con el fin de obtener el diseño en forma de "equis" para obtener el momento de cada uno de los ejes
Estructura de calibración	Sirve para colocar el sensor y sus acoples para realizar de manera correcta la calibración

3.6 Resultados Experimentales

A continuación, se muestran los resultados experimentales del testeo del sensor de fuerza conectado al DAQ. En este caso tenemos las respuestas de cambio de voltaje vs carga para cada eje X, Y y Z tanto para la carga de fuerza y momento.

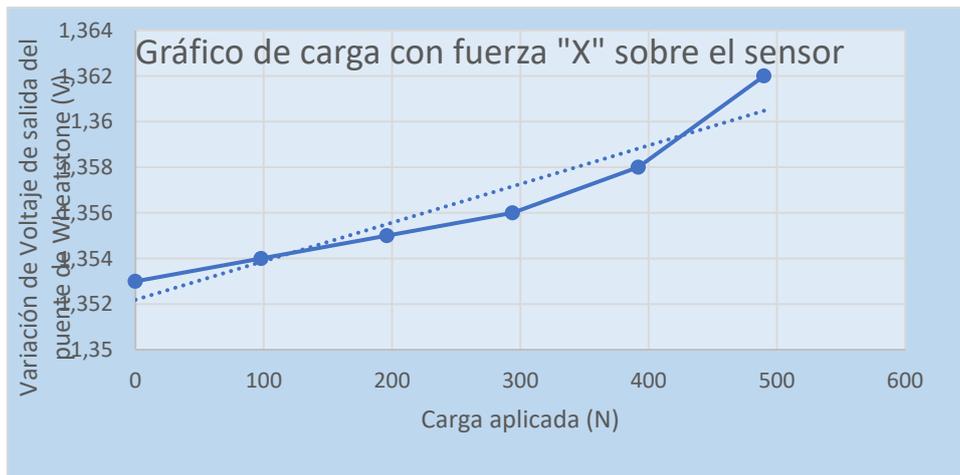


Figura 31 Diferencial de voltaje vs Carga aplicada para Fuerza X

Descripción: Gráfica con línea de tendencia del voltaje con cargas de fuerzas progresivas en el eje X

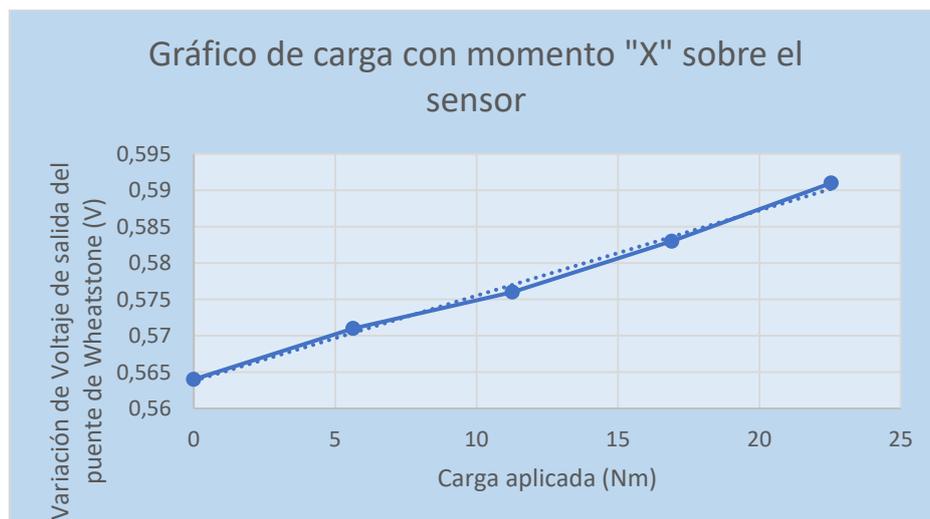


Figura 32 Diferencial de voltaje vs Carga aplicada para Momento X

Descripción: Gráfica con línea de tendencia del voltaje con cargas de momento progresivas en el eje X

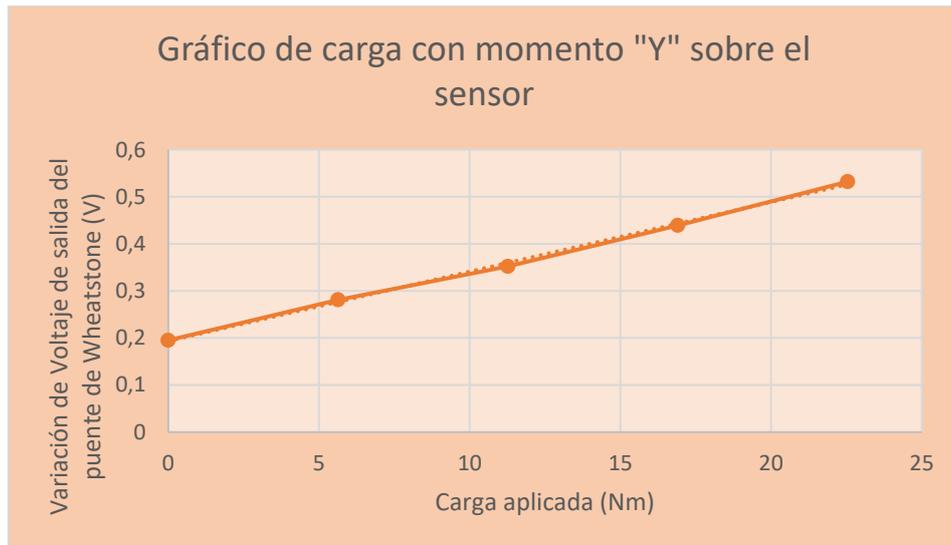


Figura 33 Diferencial de voltaje vs Carga aplicada para Fuerza Y

Descripción: Gráfica con línea de tendencia del voltaje con cargas de fuerzas progresivas en el eje Y

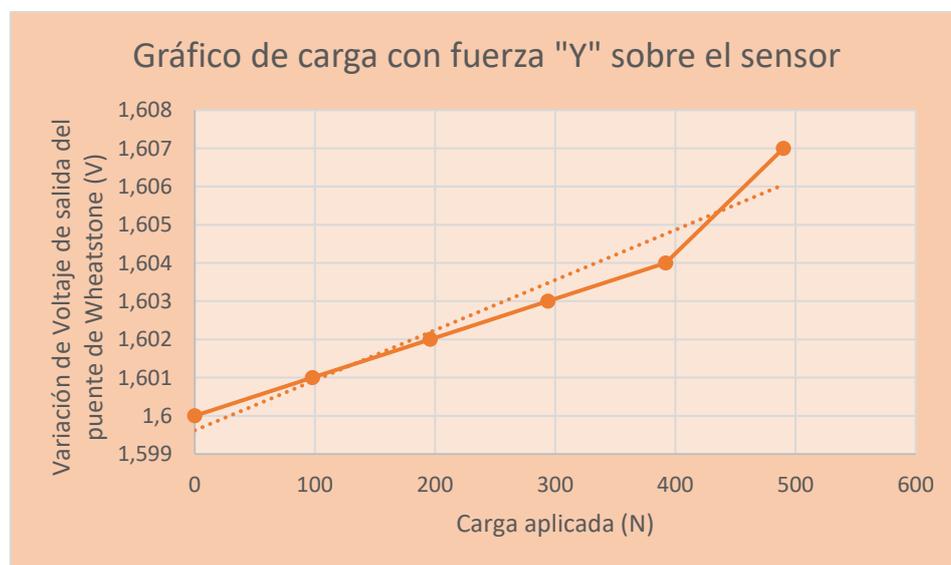


Figura 34 Diferencial de voltaje vs Carga aplicada para Momento Y

Descripción: Gráfica con línea de tendencia del voltaje con cargas de momento progresivas en el eje y



Figura 35 Diferencial de voltaje vs Carga aplicada para Fuerza Z

Descripción: Gráfica con línea de tendencia del voltaje con cargas de fuerzas progresivas en el eje Z

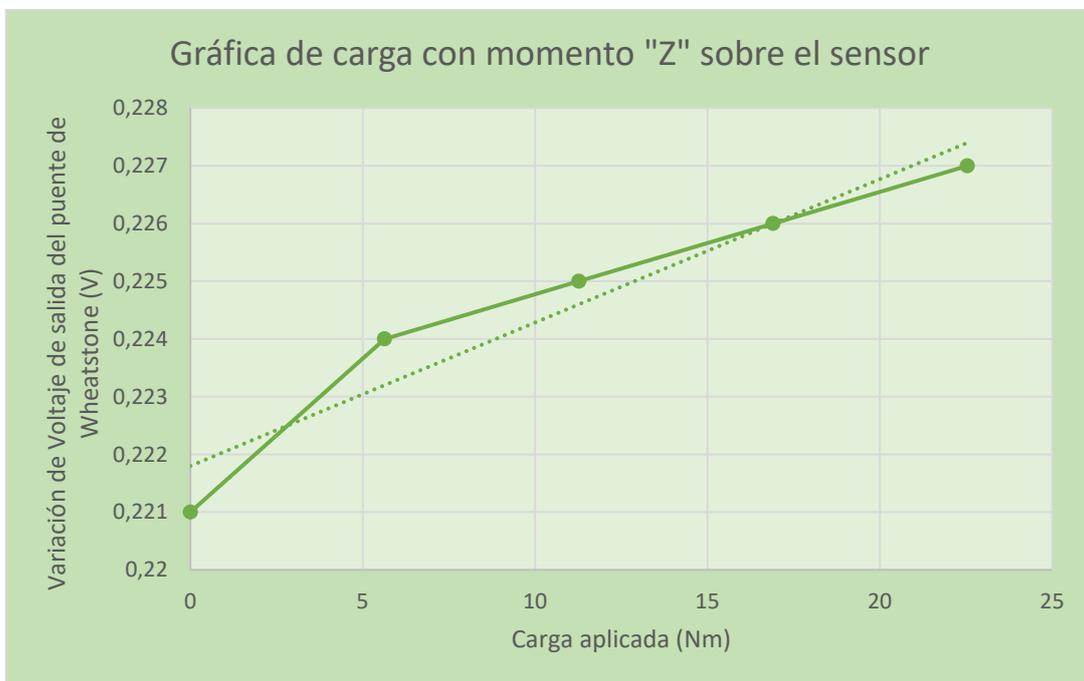


Figura 36 Diferencial de voltaje vs Carga aplicada para Momento Z

Descripción: Gráfica con línea de tendencia del voltaje con cargas de fuerzas progresivas en el eje Z

Con los resultados de las gráficas procedemos a calcular la resolución de cada eje, es importante mencionar que existen ejes rígidos y un eje sensible por lo que la resolución cambiara según el mismo.

Tabla II Resolución para ejes X, Y y Z

Descripción: Resultados obtenidos de resolución para fuerzas y momentos

Fuerza/Momento	Resolución (V/kg)
Fuerza X	0,5225
Fuerza Y	0,0175
Fuerza Z	0,30375
Momento X	0,8425
Momento Y	0,0675
Momento Z	0,0100

3.7 Discusiones

- Con los cálculos y simulaciones previamente realizados se comprobó que la placa circular va a lograr soportar una carga estática de 4500 N cumpliendo uno de los requerimientos especificados por el cliente. Además, realizando el cálculo de fatiga en base a los resultados se puede concluir que la placa se encuentra en vida infinita, lo cual indica que no fallará.
- El tornillo seleccionado M6X1 es el adecuado ya que no fallará por efecto de esfuerzo de cedencia, la unión de la junta o por la carga que produce un esfuerzo cortante. Asimismo, la aplicación del tornillo será más eficiente y económico en comparación de la implementación de pernos ya que inicialmente no se ocuparán elementos de ajuste extra, adicionalmente la implementación del tornillo cabeza plana permitirá obtener una superficie liza, lo cual logrará que la aplicación de fuerza sea más uniforme.

- En cuanto al análisis por cargas dinámicas de la plataforma superior del sensor se obtuvo que el factor de seguridad es 1.52 lo cual indica que los esfuerzos sometidos están en vida infinita y que el sensor no fallará por carga repetida al límite.
- Al realizar las simulaciones entre la placa circular y cuadrada se puede comparar que existe un error porcentual del 35% en el factor de seguridad en el punto 4 como se puede observar en la tabla 2, esto indica que en este punto es el más crítico a la falla. No obstante, en base a la simulación se puede observar que el factor de seguridad continúa siendo mayor a 1 y de igual manera no baja del valor de 1.2, del factor de seguridad asumido como mínimo para los cálculos de diseño. Además, podemos mencionar que la aproximación de áreas para el cálculo de los esfuerzos nos permite conocer que la estructura no fallará en cualquiera de las geometrías.
- Con las simulaciones realizadas de la plataforma superior se obtuvo que el error obtenido es del 11.26% el cual es una aproximación muy cercana porque el análisis de este fue mediante una geometría de áreas aproximadas en este caso de circular a rectangular. Es importante mencionar que los resultados supera el factor de seguridad de diseño de 1.5 además de que superar o acercarse a la carga máxima solicitada por el cliente va a ser muy difícil de alcanzar.
- Mediante el diseño del prototipo de calibración, se determina que este cumple con la resistencia de la carga aplicada, sin sufrir deformación. Además, se puede observar que al aplicar la carga completamente axial los puntos de soldadura no van a sufrir esfuerzo ya que todo se transmite hasta el punto de apoyo. Se puede mencionar que el prototipo de calibración tiene la solidez y rigidez requerida para realizar las pruebas de calibración.

- La frecuencia obtenida en los resultados entre el valor referencial y cero fue identificada debido al conexionado al DAQ debido a que este no posee un acople óptimo en el cableado que existe entre el amplificador operacional y el DAQ. Por lo que a consecuencia de esto la interpretación de datos al observar las gráficas de voltaje vs tiempo en LabView no son óptimas por la frecuencia existente antes mencionada, lo que a su vez no permite encontrar la gráfica de voltaje vs fuerza en tiempo real para las aplicaciones en biomecánica deseadas.
- En cuanto a la resolución, para que este se aumente se requiere cambiar el valor de los potenciómetros que forman parte de la placa del amplificador, por lo que al aumentar la ganancia del potenciómetro aumenta el valor de voltaje nominal que se requiere que resista la fuente con la finalidad de que no se saturen los amplificadores AD620. La limitación presente en el proyecto se da debido a que, si se quiere aumentar la resolución, la fuente de voltaje tiene un valor nominal de 5 Voltios.
- Al momento de diseñar el sistema de calibración es necesario tener el plan de manufactura detallado con los costos, obtención de materiales y la manera en la que este va a operar, además de realizar los cálculos y simulaciones respectivos de diseño mecánico para así tener una visión clara de los recursos que se necesitan para la construcción del prototipo
- Dentro de la parte constructiva y de manufactura del sensor, las galgas extensiométricas al ser importadas de Estados Unidos no cumplen con el objetivo de ser fabricados con material local aquí en Ecuador, por lo que las galgas son componentes muy delicados del proyecto los cuales tienen que ser tratados con cuidado, además de ser elementos que de por sí necesitan extremo cuidado por su fragilidad y facilidad de dañarse por manipulación incorrecta.

- Los resultados obtenidos al aplicar varias cargas al sensor con el uso del prototipo de calibración fueron los siguientes: En el eje X tenemos los resultados tanto fuerza y momento donde se puede observar un comportamiento con tendencia lineal de la respuesta del diferencial de voltaje con respecto a la carga aplicada. En la primera gráfica realizamos pruebas de 0 a 400 N, mientras que en el momento realizamos pruebas de 0 a 22.5 Nm.
- Del mismo modo tenemos los resultados en el eje Y, pero cambiando el valor de la etapa de amplificación para obtener un diferencial de voltaje más alto para que de esta manera el DAQ pueda leer estos datos. Un punto importante en las gráficas de fuerza X y Y es el muestreo del último valor tomado. Podemos ver que claramente existe una variación mayor entre el último punto y la tendencia de la línea. Esto se debe principalmente a la acumulación de valores no medibles en la etapa de amplificación.
- Por último, en los resultados de fuerzas y momentos tenemos al eje Z donde realizamos un muestreo mayor debido a la sensibilidad de este eje, ya que es más propenso a deformarse las galgas extensiométricas. En este caso aplicamos fuerzas de 0 a 1000 N con su respectivo método de calibración.
- La resolución del sensor se calculó con los resultados de las gráficas para cada fuerza y momento. En los ejes más sensibles tenemos una variación de 0.30 V/kg para cada 2.5 kg y en los ejes más rígidos utilizamos una variación de 0.01 V/kg y 0.5 V/kg para cada 10kg.

3.8 Presupuesto

Dentro del presupuesto, se realiza un análisis de costos del proyecto y el presupuesto otorgado, en donde se establece parámetros como el producto, la cantidad, el precio unitario y el precio total. Dentro de estos gastos, se proyectan procesos de manufactura, en donde, en algunos casos se contrató de un servicio externo para obtener el producto final. Dentro de este análisis, no se contó con el precio de la mano de obra propia que se ejecutó en el prototipo. Asimismo, en el costo de las placas electrónicas se determinaron costos asumiendo el costo de los elementos electrónicos empleados dentro de dichas placas.

Tabla 12 Costos del prototipo

Descripción: Costos para la manufactura del proyecto

Costos Prototipo				
#	Producto	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
1	Galgas extensiométricas lineales	20	\$12.60	\$252.00
2	Adhesivo de galga extensiométrica	2	\$13.30	\$26.60
3	Placa protectora del sensor	1	\$4.00	\$4.00
4	Platinas de sujeción	4	\$0.50	\$4.00
5	Plataforma superior de calibración	1	\$44.00	\$44.00
6	Plataforma superior apoyo del sensor	1	\$10.00	\$10.00
7	Estructura de calibración Perfil cuadrado 40x40x2 6 metros	2	\$57.52	\$57.52
8	Poleas	8	\$2.50	\$20.00
9	Placa base de estructura de calibración	1	\$54.00	\$54.00
10	Tarjeta de adquisición de datos (DAQ)	1	\$0.00	\$0.00
11	PCB puente de Wheatstone	1	\$21.00	\$21.00
12	PCB amplificadores operacionales	1	\$71.56	\$71.56
13	Pernos	20	\$0.25	\$5
Precio Total del Prototipo				\$ 564.68

A continuación, se muestra el presupuesto del prototipo, en donde el precio total del prototipo resulta en \$564.68. De manera inicial, se estableció un costo de \$400, de esta manera se encontró un déficit de \$164.68 como se puede observar en la tabla 13.

Tabla 13 Presupuesto del prototipo
Descripción: Resumen de costos con déficit

Costo	Valor (\$)
Costo total	564.68
Presupuesto	400
Déficit	-164.68

3.9 Conclusiones

En conclusión para mejores resultados se debería realizar un rediseño de la estructura del sensor para utilizar la forma optima de un sensor que es conformado por 3 partes: carcasa superior, carcasa inferior y un cuerpo elástico, En nuestro caso solo se tiene una carcasa inferior y carcasa superior, teniendo una combinación entre la carcasa superior y el cuerpo elástico lo cual hace que limite la deformación del cuerpo de aluminio, teniendo como consecuencia la necesidad de poner cargas más elevadas al sensor para que este se deforme y por tanto las galgas también.

Además, cabe mencionar que también es necesario utilizar una fuente externa con alto amperaje ya que el suministro para el puente, amplificadores y galgas extensiométricas es elevado.

Un requerimiento que no se cumplió fue el del presupuesto, debido al alto costo de los componentes para desarrollar el sensor y la base de calibración, esto sin tomar en cuenta la mano de obra propia, teniendo así una gran limitante para la implementación de

mejoras al sensor debido a que los componentes que mejoran notablemente la eficacia del proyecto son demasiado costosos.

Podemos mencionar que las gráficas de diferencia de voltaje vs carga aplicada no se lograron diseñar a tiempo real debido al acople del DAQ al computador, el cual tenía muchos errores por la frecuencia que botaba debido al mal cableado, por lo que fue necesario exportar los datos a Excel para obtener dichas gráficas, pero en forma estática, siendo un resultado poco óptimo de acuerdo al alcance propuesto para el proyecto.

3.10 Trabajo futuro

A continuación, se presentan una serie de ideas a manera de recomendaciones para implementar como parte del trabajo futuro para el proyecto en busca del objetivo de tener el sensor en óptimas condiciones para las aplicaciones de biomecánica:

- Se recomienda encontrar un acople directo al DAQ 9206 ya que sin este accesorio el proyecto se limita mucho al momento de realizar la toma de datos en LabView debido a la frecuencia que arroja el software por el conexionado incorrecto de los cables en este equipo, o a su vez es recomendable adquirir un DAQ más actualizado el cual no requiera del chasis y además tenga unas conexiones más óptimas.
- También se requiere estudiar diseños para la estructura del sensor ya que este modelo de geometría del sensor no es el mejor debido a que la estructura elástica hecha de una aleación de aluminio forma parte de la estructura superior del sensor y se recomienda que este sea independiente, teniendo tres secciones/partes principales que son: cuerpo elástico, carcasa superior e inferior, y placa protectora de ser necesario. Esto con la finalidad de obtener mejores resultados con el cuerpo elástico más fácil de deformar.

- Otro punto clave es buscar la manera de reducir el tamaño de las conexiones y componentes externos al sensor para lograr una visualización más profesional enfocada en sensores que son manufacturados a gran escala por empresas dedicadas a ello.
- Finalmente, se busca que el sensor logre medir a tiempo real el punto de aplicación exacto en la placa superior con la finalidad de obtener vectores de fuerza/momento combinadas al instante mediante la configuración de LabView o softwares similares.

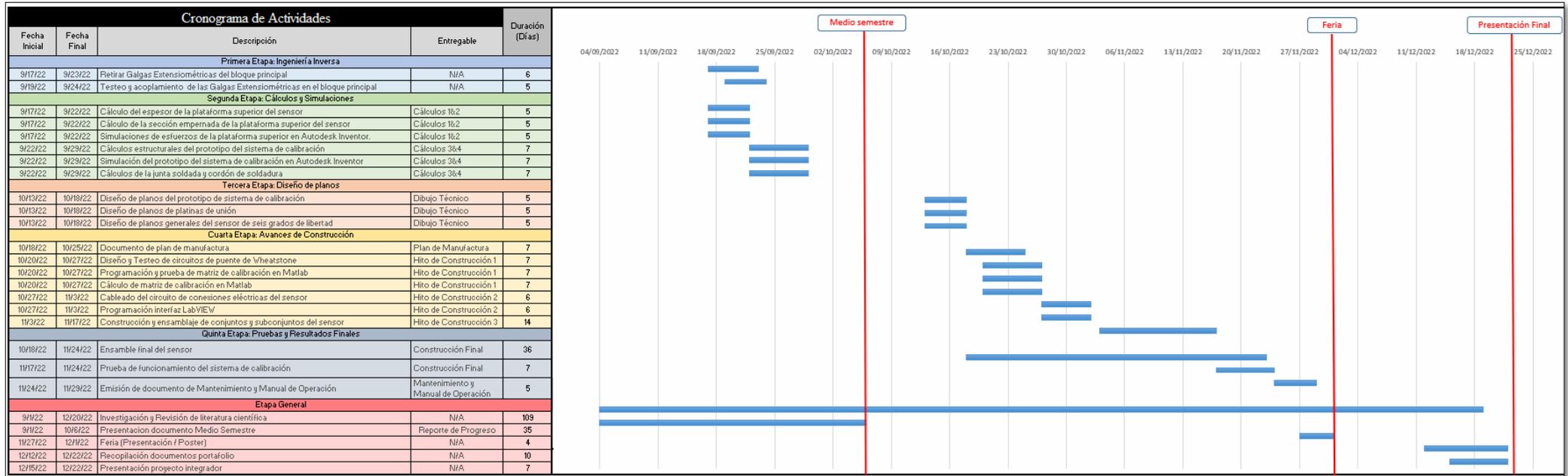
4. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aguirre, X., Oswin, C., & David, M. (2020). *Diseño y Desarrollo de un Sensor de Fuerza de Seis Grados de Libertad*. Quito: UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ Colegio de Ciencias e Ingenierías.
- Anton , A., Terrence, W., & Chyi-Yeu , L. (2021). *A Comprehensive Design of Six-Axis Force/Moment Sensor*. Obtenido de <https://doi.org/10.3390/s21134498>
- Arauz, P. (2022). *Diseño y desarrollo de un sensor de fuerza de seis grados de libertad*. Quito: Universidad San Francisco de Quito.
- AZO Materials. (13 de Junio de 2013). *AZO Materials*. Obtenido de AISI 1045 Carbon Steel (UNS G10450): <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9153>
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2015). *Shigleys Mechanical Engineering Design*. New York: McGraw-Hill Education.
- Dismetel. (2022). *Dismetel Metales para la industria y construcción*. Obtenido de PLANCHAS DE ACERO 1220 x 2440: <https://dismetel.ec/productos/planchas/laminadas-en-caliente/1220-x-2440>
- ISO. (2013). *Road vehicles - Degrees of protection (IP code) - Protection of electrical equipment against foreign objects, water and acces*. Suiza: Organization for Standarization.
- Metal Supermarkets. (17 de Noviembre de 2017). *Metal Supermarkets*. Obtenido de Grade Guide: A36 Steel: <https://www.metalsupermarkets.com/grade-guide-a36-steel/>

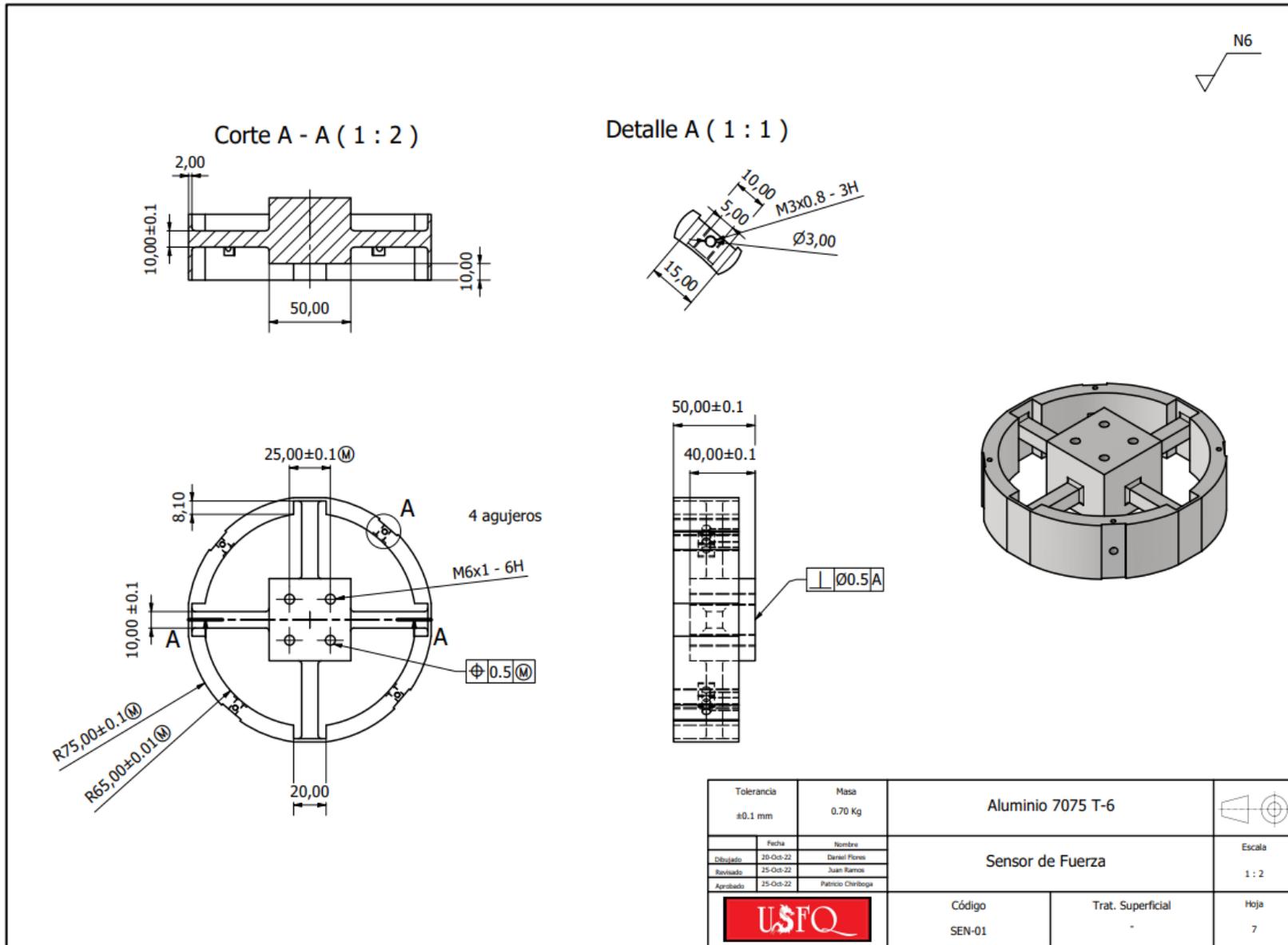
Ochoa, J., Pulla, A., Suarez, B., & Mejía, Y. (2022). *Diseño y manufactura de un sensor de fuerza/momento de 6 grados de libertad para aplicaciones de Biomecánica.*

Qutio: Universidad San Francisco de Quito.

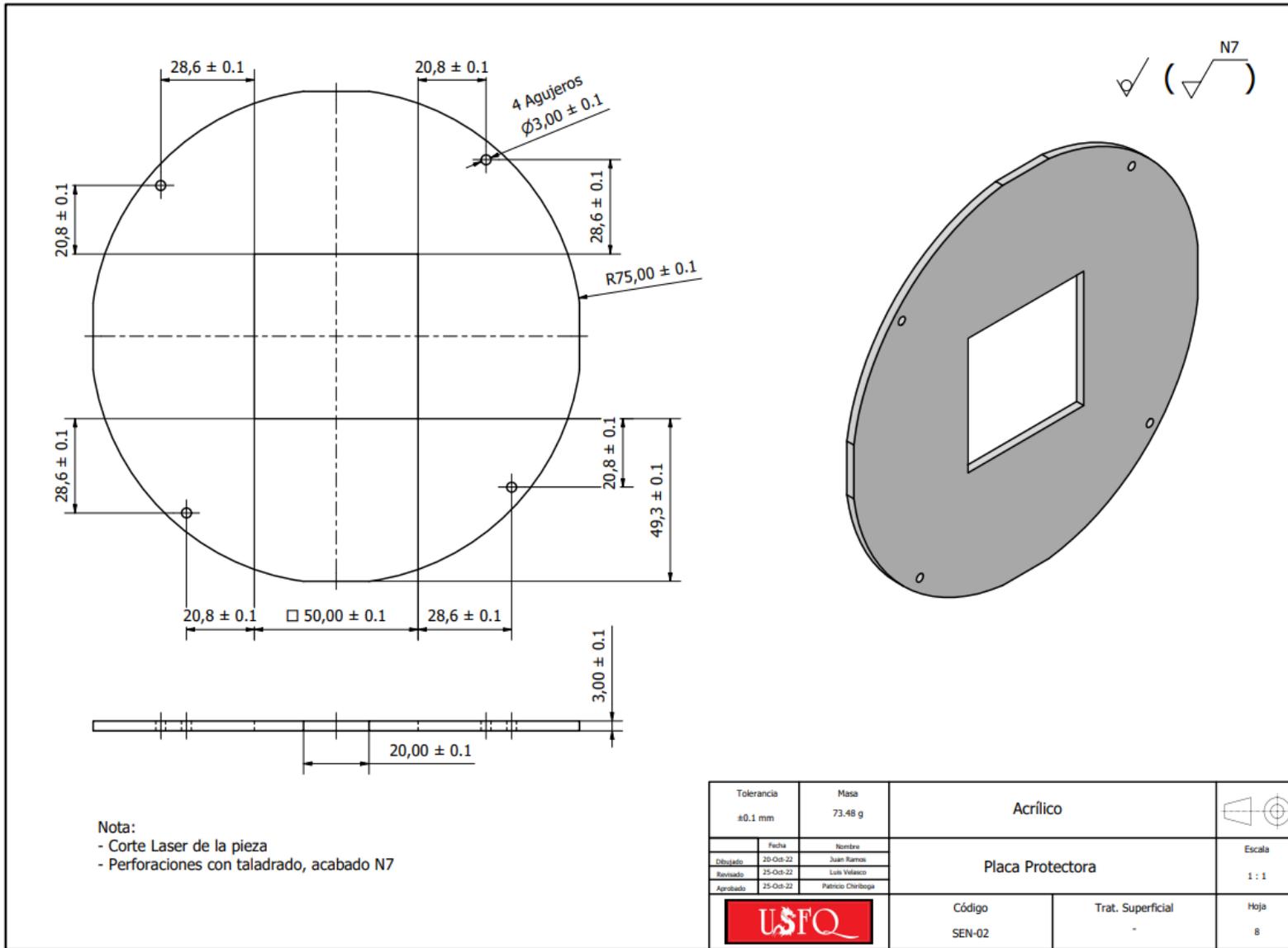
ANEXO A: Diagrama de Grant para el desarrollo del sensor y prototipo de calibración.



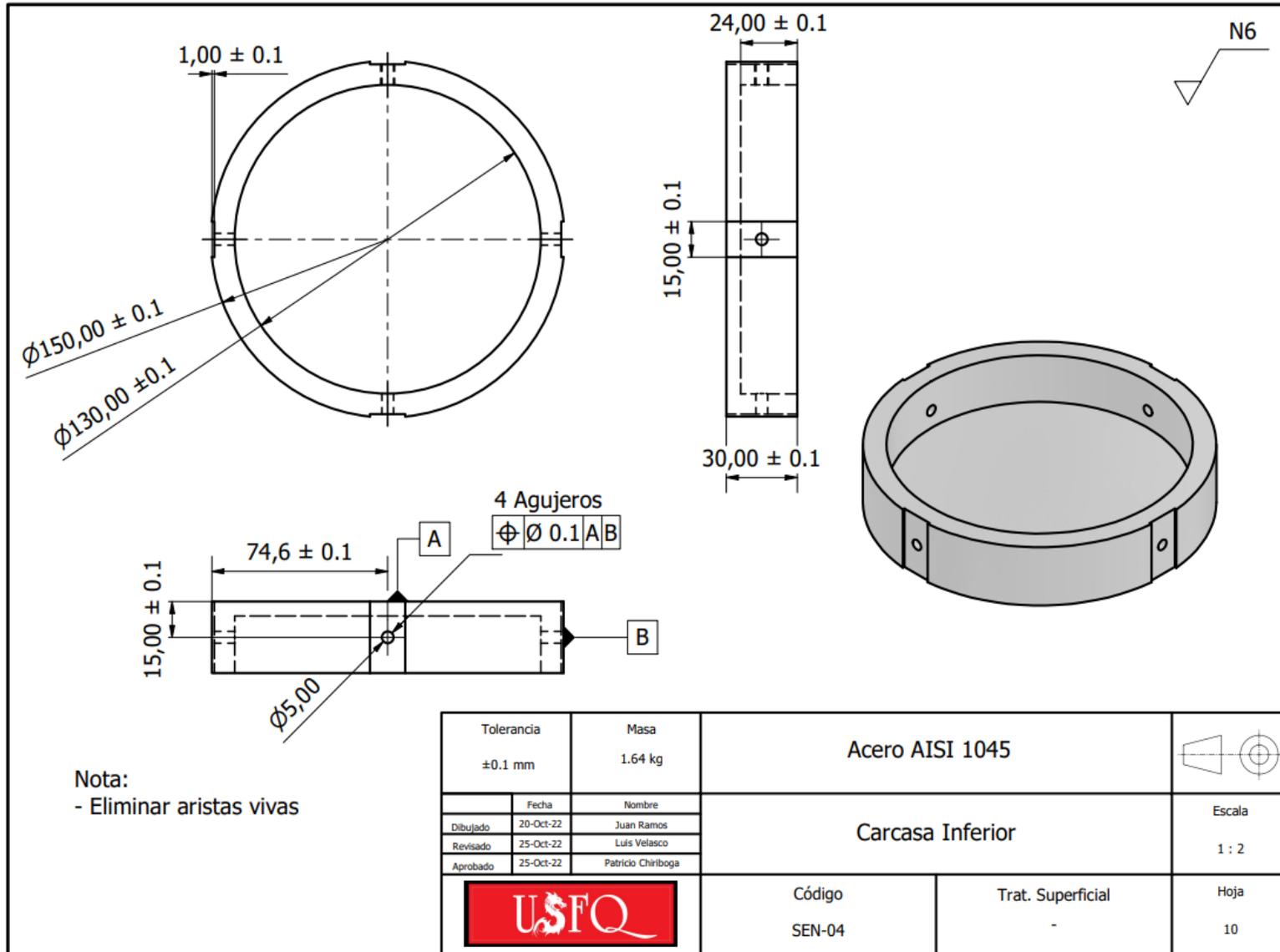
ANEXO B: Plano del sensor de fuerza



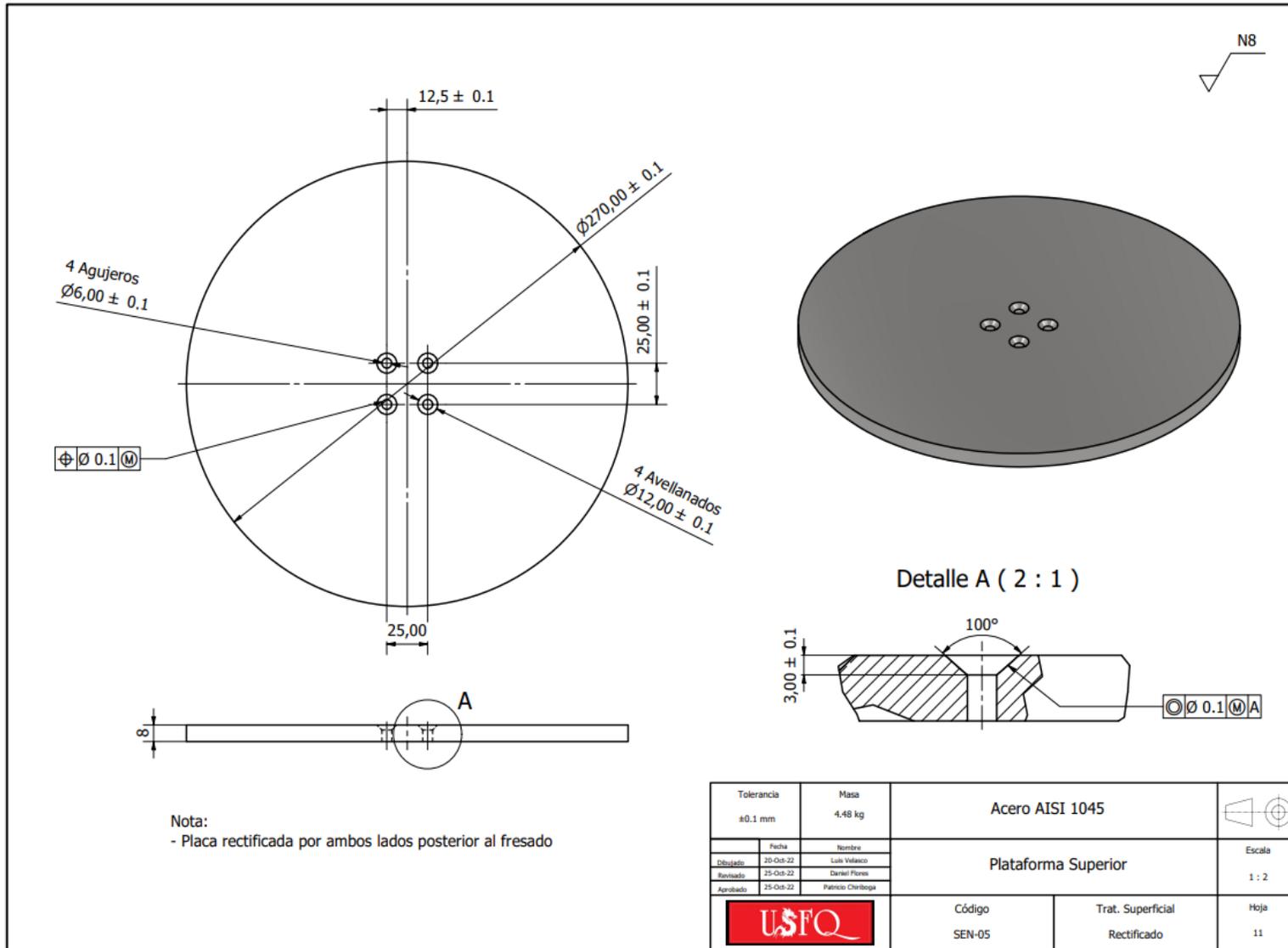
ANEXO C: Plano de placa protectora



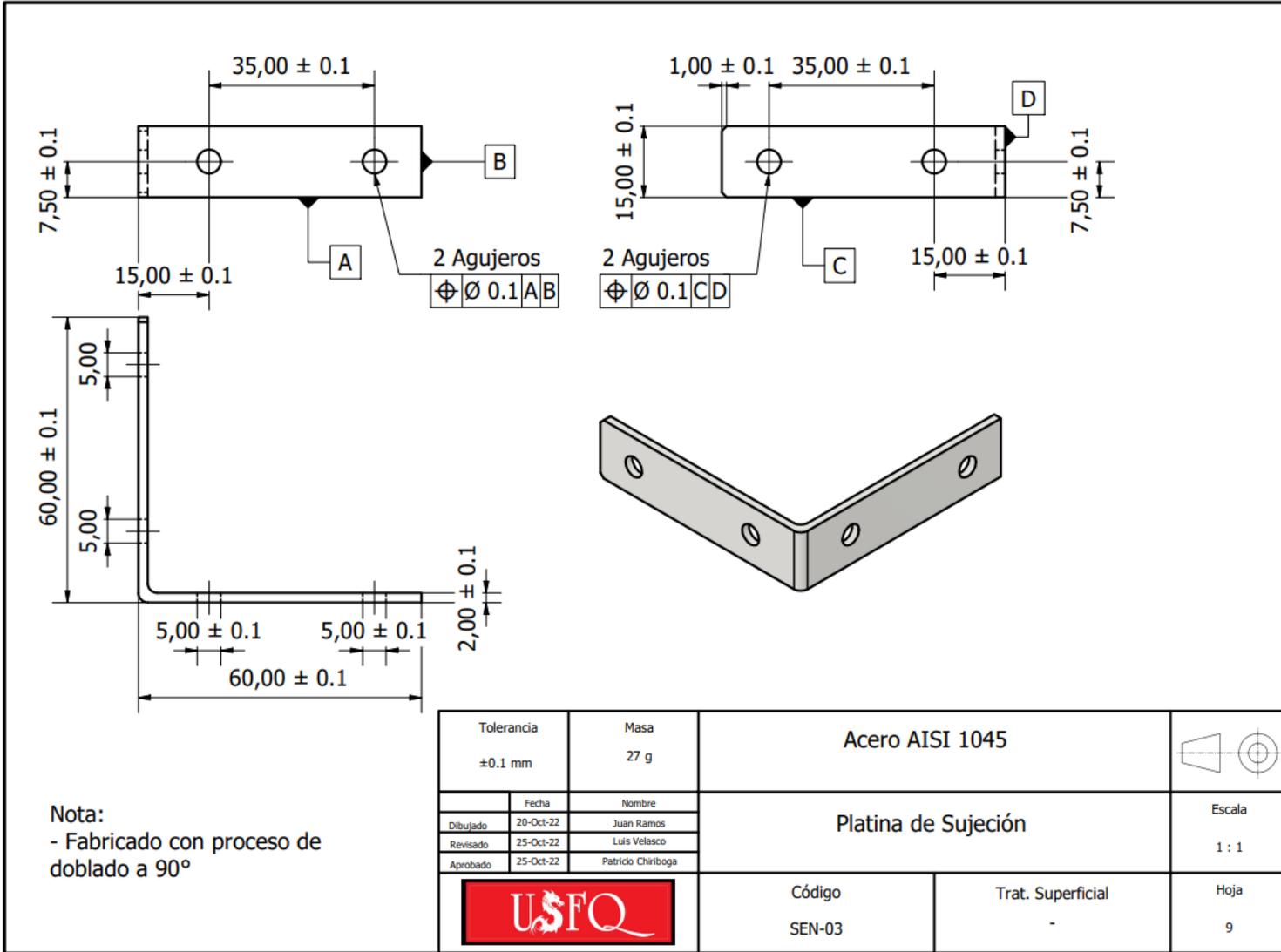
ANEXO D: Plano de la carcasa inferior



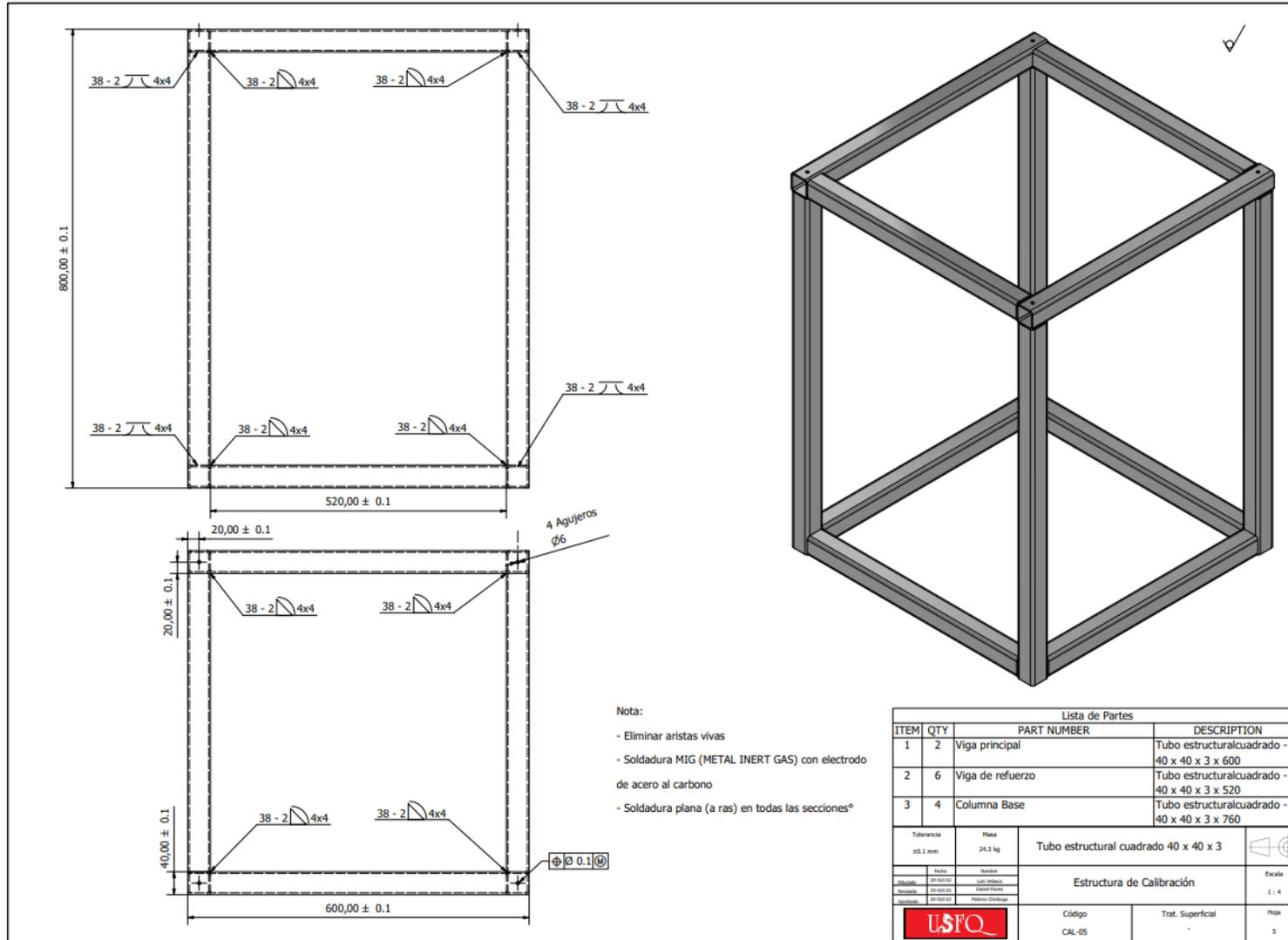
ANEXO E: Plano de la plataforma superior



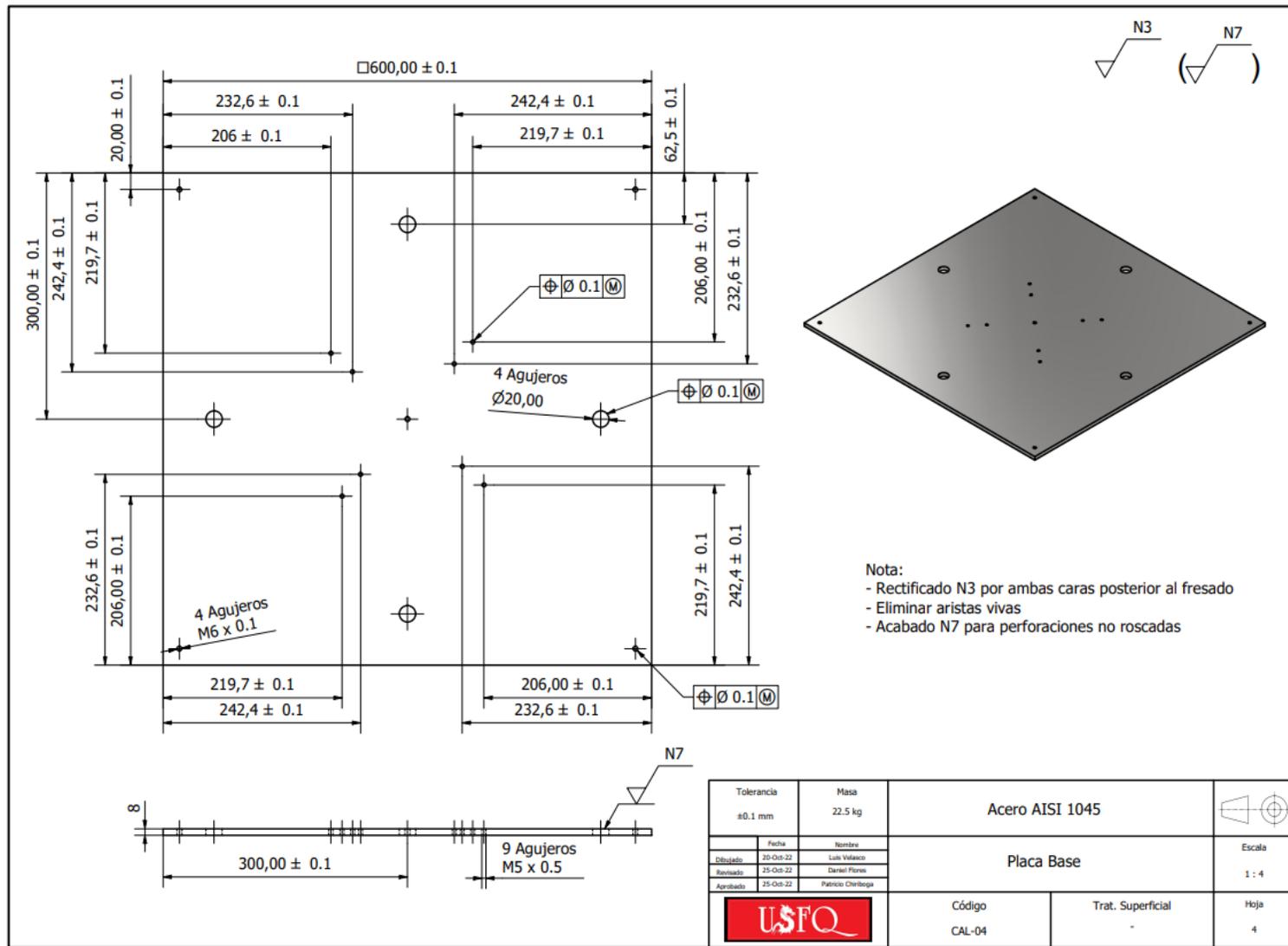
ANEXO F: Plano de platina de sujeción



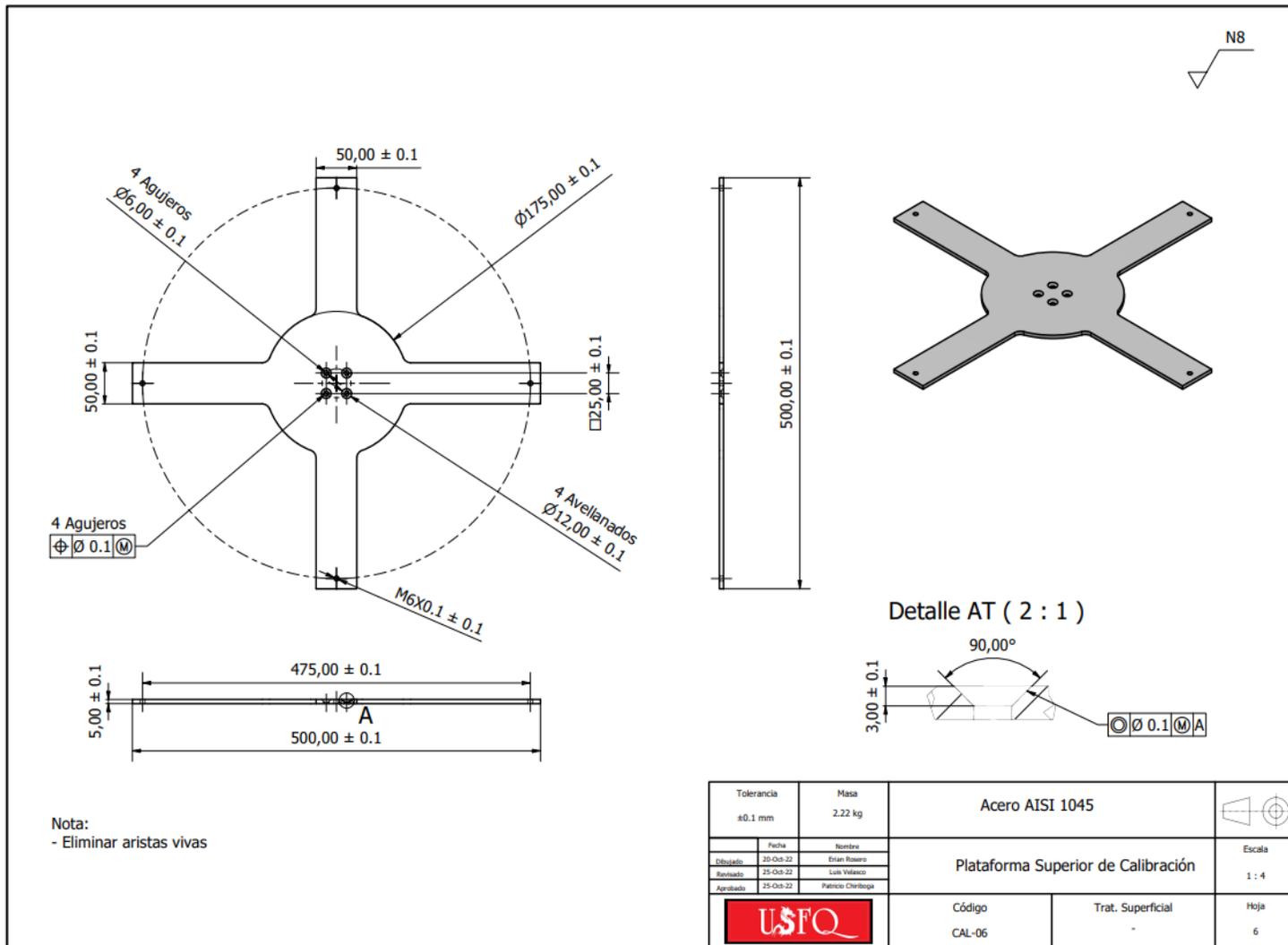
ANEXO G: Plano de la estructura de calibración



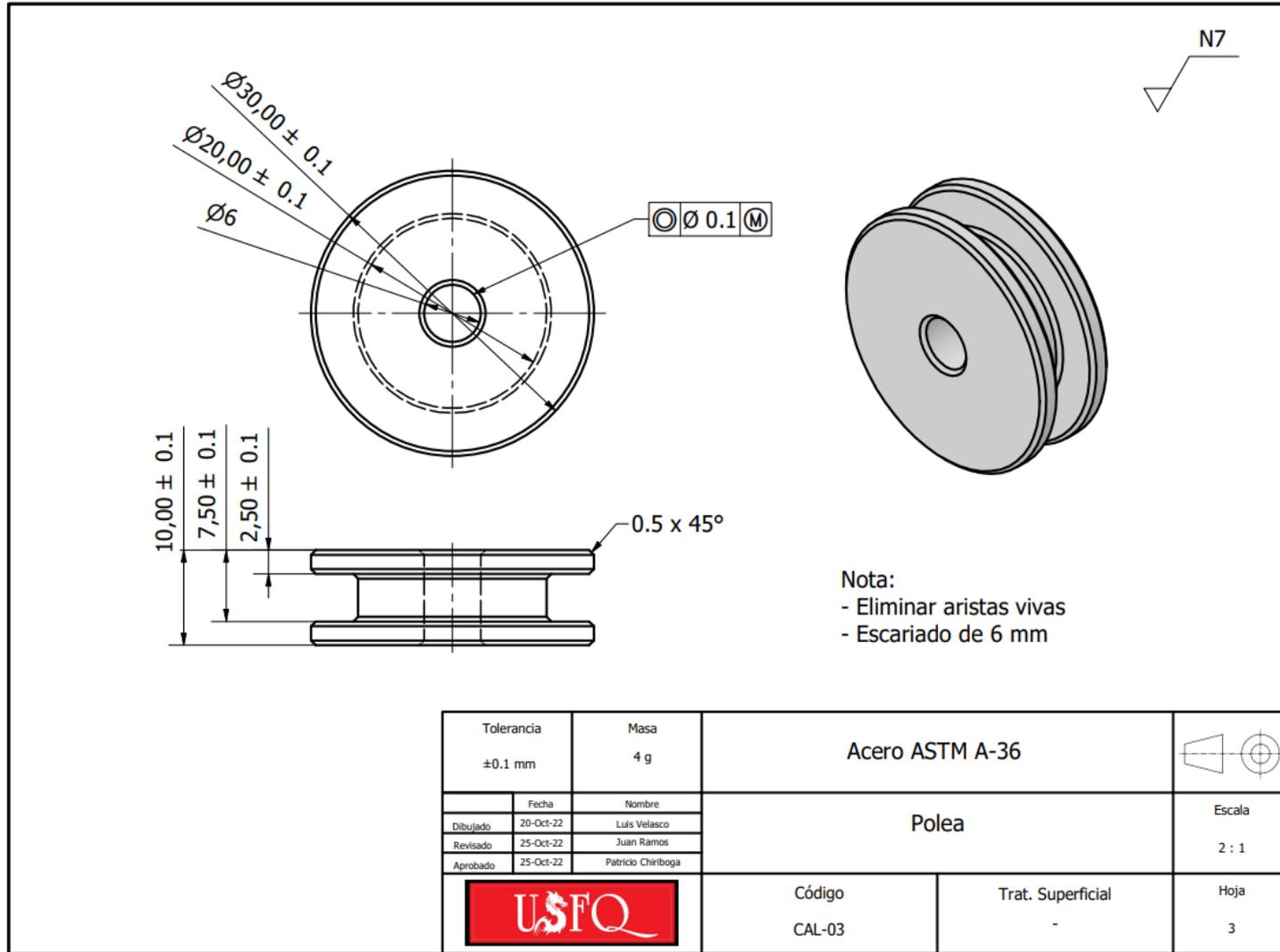
ANEXO H: Plano de placa base



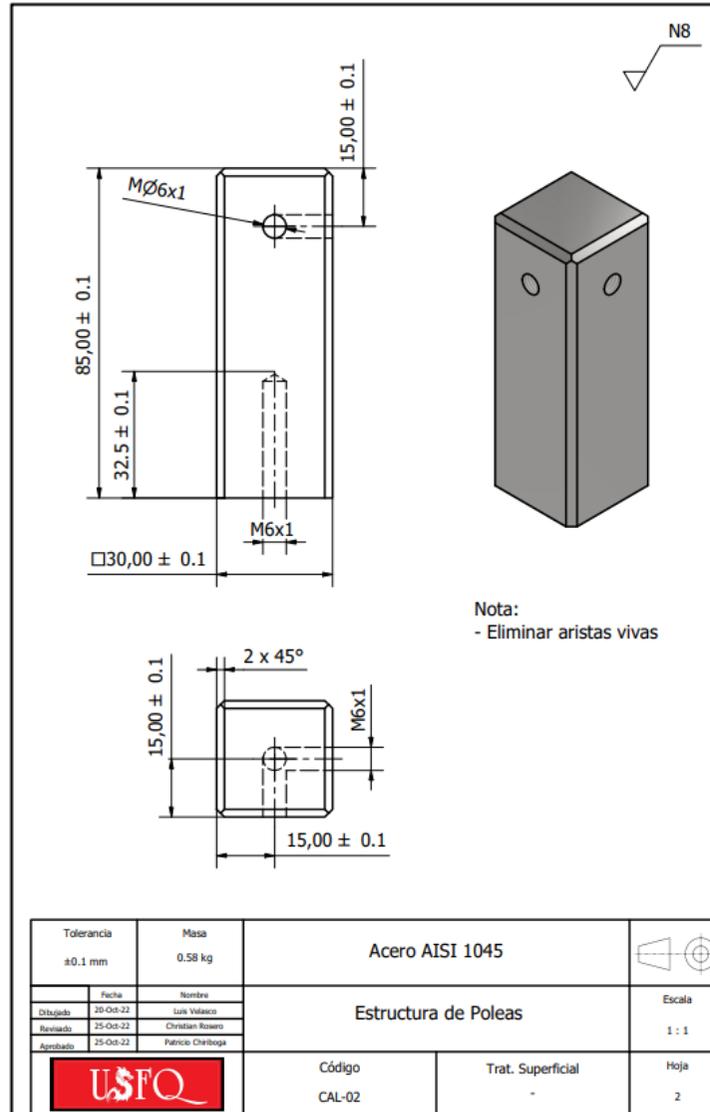
ANEXO I: Plano de plataforma superior de calibración



ANEXO J: Plano de polea



ANEXO K: Plano de estructura de polea



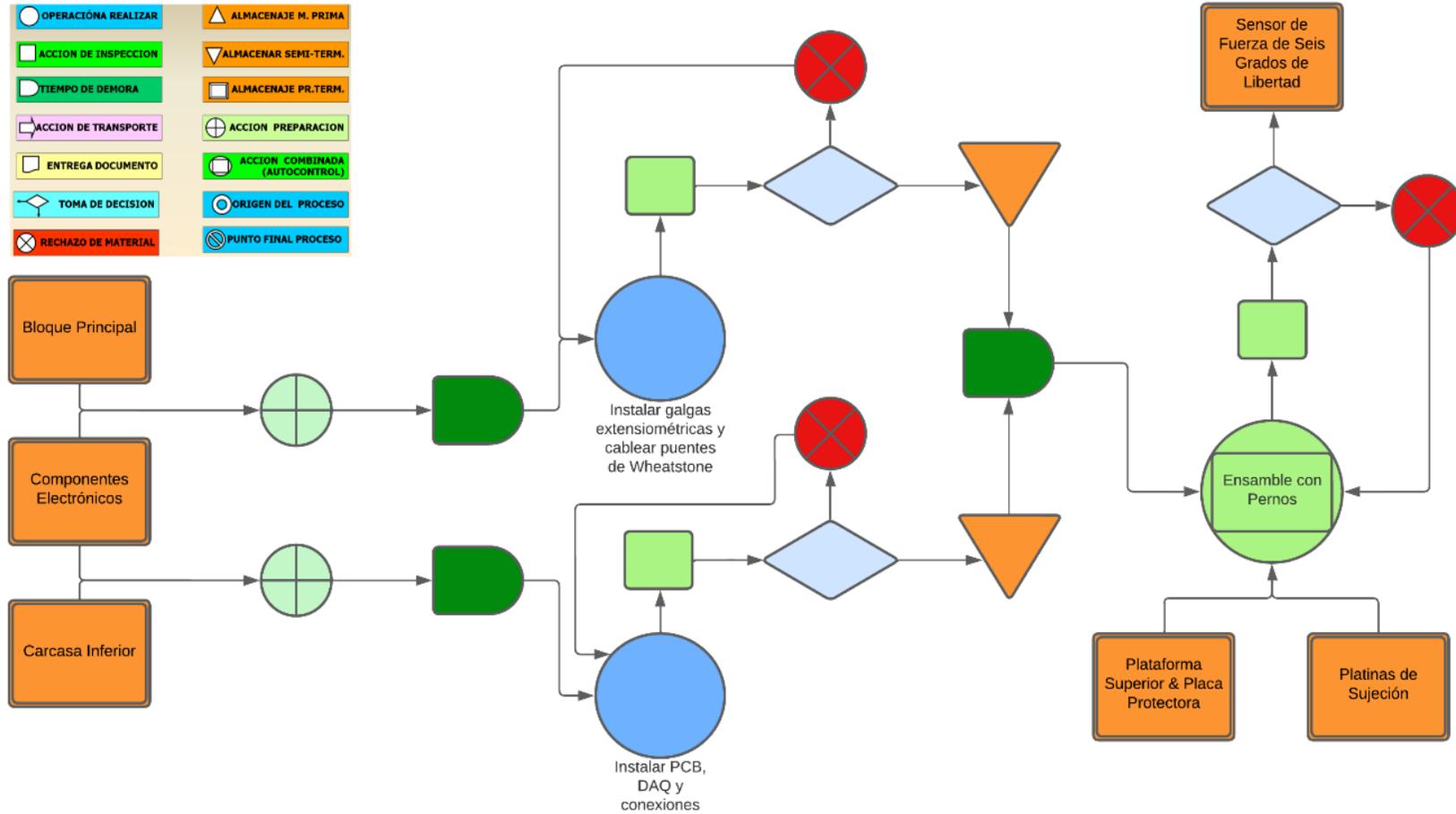
ANEXO L: Plano de conjunto de base de calibración

Lista de Partes

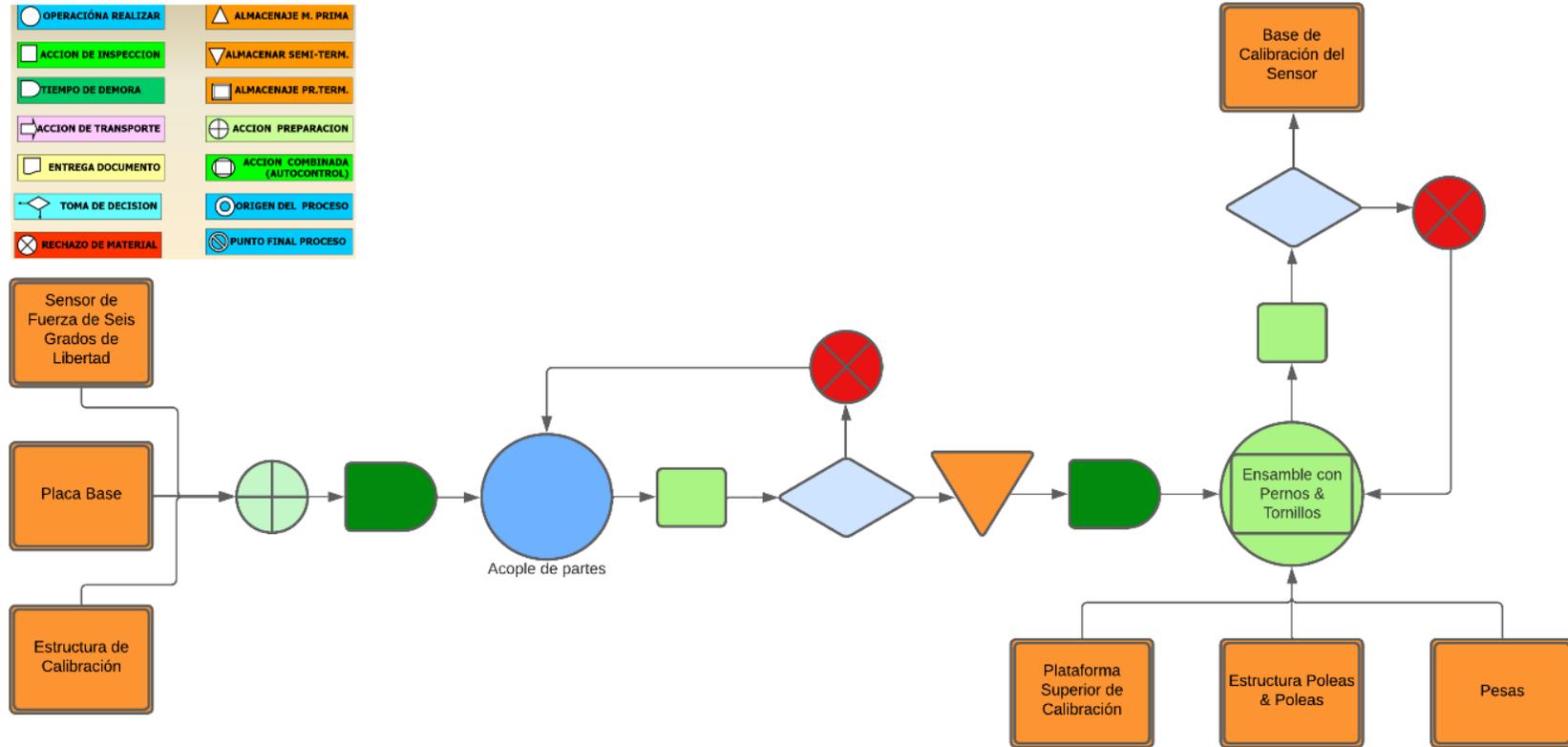
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Placa Base	Placa 60 x 60 x 5 (mm)
2	4	Estructura de poleas	Bloque 30 x 30 x 85 (mm)
3	8	Polea	Ø 30 x 10 (mm)
4	20	Arandela - M6	Arandela Plana- M6
5	12	Perno - M6	Perno cabeza Hexagonal M6 x 1 x 30
6	2	Viga principal	Tubo estructural cuadrado - 40 x 40 x 3 x 600
7	6	Viga de refuerzo	Tubo estructural cuadrado - 40 x 40 x 3 x 520
8	4	Columna Base	Tubo estructural cuadrado - 40 x 40 x 3 x 760
9	4	Platinas de Sujeción	
10	1	Carcasa Inferior	
11	9	Tornillo - M5	Tornillo cabeza redonda M5 x 0.5 x 20
12	12	Tornillo - M6	Tornillo cabeza plana M6 x 1 x 20
13	2	Sensor	
14	4	Tornillo - M3	Tornillo cabeza redonda- M3 x 0.5 x 20
15	1	Plataforma superior de calibración	
16	8	Arandela - M5	
17	8	Tuerca - M5	Tuerca - M5 x 0.5
18	1	Placa Protectora	Ø 150 x 3 (mm)

Tolerancia ±0.1 mm	Placa 54.2 kg	Maquinaria requerida para desmontaje : Si	
Fecha: 20/02/22	Nombre: Luis Velasco	Base de Calibración	
Revisión: 20/02/22	Elaborado: Luis Velasco		
Revisión: 20/02/22	Aprobado: Federico Cruz	Código: CAL-01	Trat. Superficial: -
		Escala: 1 : 4	
		Hoja: 1	

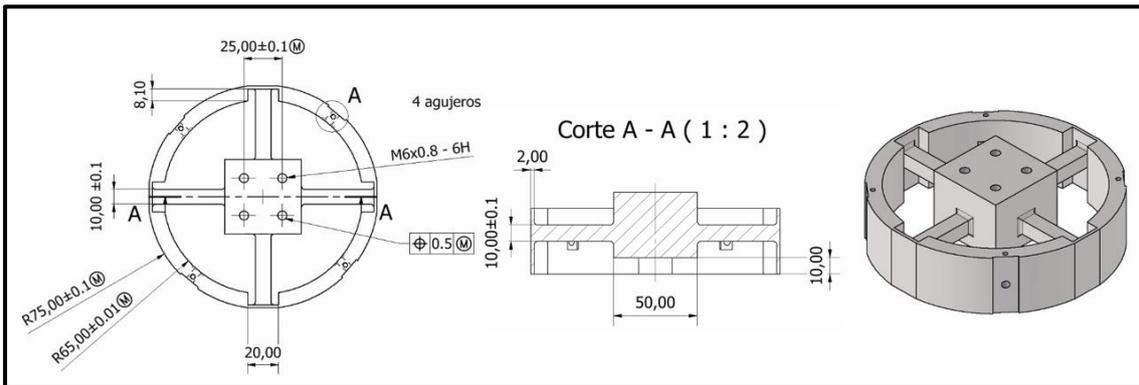
ANEXO M: Diagrama de procesos del ensamblaje del sensor de fuerza



ANEXO N: Diagrama de procesos del ensamble del sistema de calibración del sensor

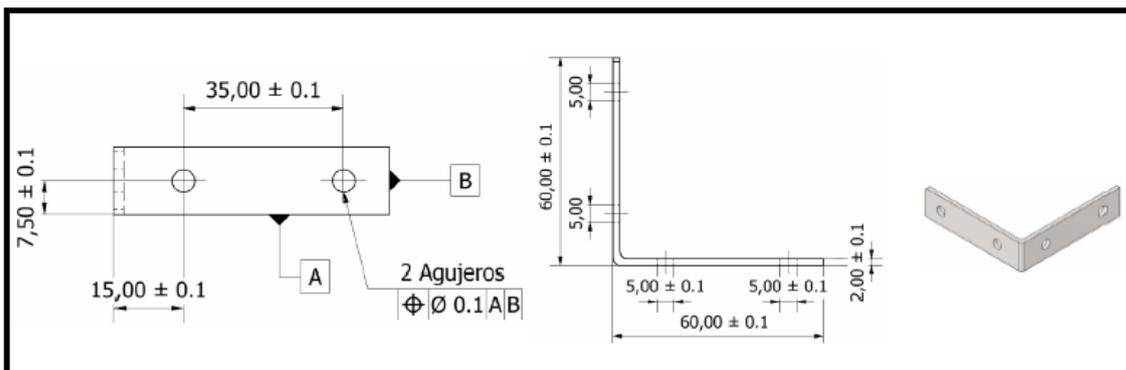


ANEXO O: Hoja de Proceso del Sensor de fuerza



HOJA DE PROCESO							
Código Pieza:	SEN-01	Descripción:	Sensor de Fuerza	Plano N°:	7	Cantidad:	1
Material:	Aluminio 7075 T-6	Responsable:	Daniel Flores				
Tareas	Máquinas & Herramientas	Observaciones	Tiempo (minutos)				
Taladrado: Perforaciones tornillos M6x1	Taladro de banco. Broca 5.5 mm. Mordaza.	Proceso manual por arranque de viruta. 4 perforaciones pasantes con broca de 5.5 mm. Velocidad de corte sin restricción.	60				
Taladrado: Perforaciones tornillos M3x0.5	Taladro de banco. Broca 2 mm. Mordaza.	Proceso manual por arranque de viruta. 4 perforaciones de 20 mm de profundidad con broca de 2 mm. Velocidad de corte sin restricción.	30				
Roscado: tornillos M6X1	Palanca para machuelo Machuelo M6X1 Aceite de tipo lubricante	Proceso manual. 4 roscados a 20 mm de profundidad. Lubricar machuelo cada 5 mm.	30				
Roscado: tornillos M3X0.5	Palanca para machuelo Machuelo M3X0.5 Aceite de tipo lubricante	Proceso manual. 4 roscados a 20 mm de profundidad. Lubricar machuelo cada 5 mm.	15				
Lijado	Lija de agua 220	Lijar vigas del sensor eliminando residuos de pegamento.	30				
Proceso de pintado	Pintura color negro mate en spray	Aplicar 3 capas de pintura.	90				

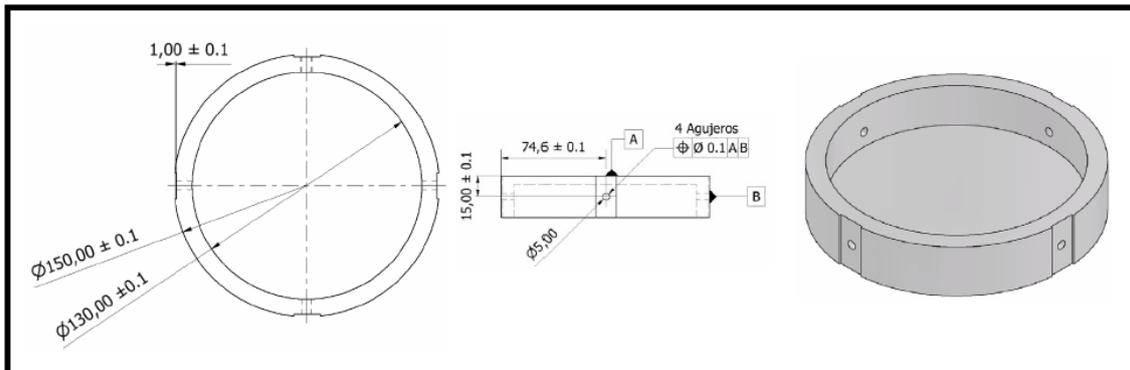
ANEXO P: Hoja de Proceso de las Platinas de sujeción



HOJA DE PROCESO

Código Pieza:	SEN-03	Descripción:	Platinas de sujeción	Plano N°:	9	Cantidad:	4
Material:	Acero AISI 1045	Responsable:	Juan Carlos Ramos				
Tareas	Máquinas & Herramientas	Observaciones	Tiempo (minutos)				
Soldadura	Máquina de soldar MIG (Metal Inert Gas) / TIG (Tungsten Inert Gas)	Dependiendo la disponibilidad de la máquina, de preferencia soldar con TIG rellenando los agujeros de la platina comercial.	30				
Esmerilado	Esmeril. Disco de desbaste. Entenalla.	Desbastar los laterales de la platina hasta llegar a un ancho de 15 mm. Desbastar las superficies soldadas hasta conseguir un acabado liso.	30				
Taladrado:	Taladro de banco. Broca de 5 mm.	Proceso manual por arranque de viruta. 8 perforaciones pasantes con broca de 5 mm. Velocidad de corte sin restricción.	20				
Proceso de pintado	Pintura color negro mate en spray	Aplicar 3 capas de pintura.	90				

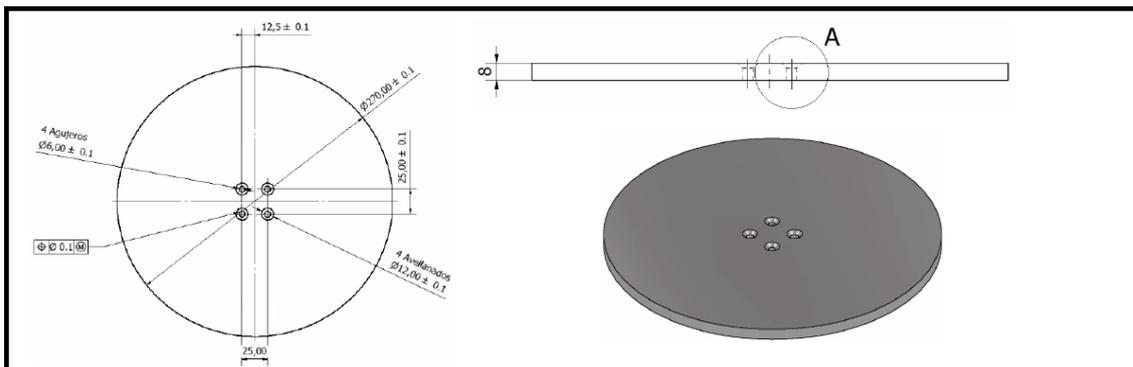
ANEXO Q: Hoja de Proceso de la Carcasa Inferior



HOJA DE PROCESO

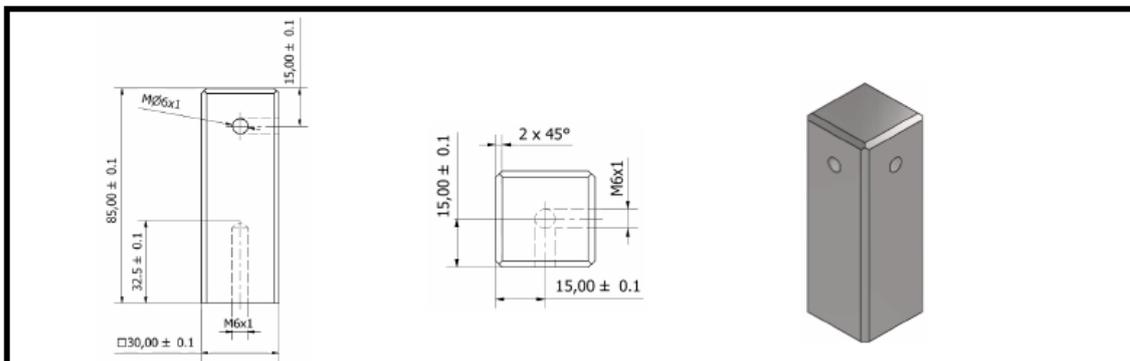
Código Pieza:	SEN-04	Descripción:	Carcasa Inferior	Plano N°:	10	Cantidad:	1
Material:	Acero AISI 1045	Responsable:	Juan Carlos Ramos				
Tareas	Máquinas & Herramientas	Observaciones	Tiempo (minutos)				
Fresado	Fresa de ranurar de 15 mm. Fresadora. Mordaza.	Proceso por arranque de viruta. Ranurar los canales de acople con las platinas de sujeción a 15 mm de espesor y una profundidad de 1 mm.	90				
Torneado	Cuchilla de refrentar. Torno.	Proceso por arranque de viruta. Rectificar la cara exterior e interior del cuerpo de la pieza.	45				
Proceso de pintado	Pintura color negro mate en spray	Aplicar 3 capas de pintura.	90				

ANEXO R: Hoja de Proceso de la Plataforma Superior



HOJA DE PROCESO							
Código Pieza:	SEN-05	Descripción:	Plataforma Superior	Plano N°:	11	Cantidad:	1
Material:	Acero AISI 1045		Responsable:	Luis Velasco			
Tareas	Máquinas & Herramientas		Observaciones	Tiempo (minutos)			
Lijado	Amoladora. Disco de desbaste.		Lijar la pintura de la superficie de la pieza	20			
Rectificado	Rectificadora		Rectificar ambas caras de la pieza	180			
Fresado	Fresa de ranurar de 15 mm. Fresadora. Mordaza.		Proceso por arranque de viruta. Ranurar una geometría circular de la pieza cuadrangular de 270x270x10 mm. Ranurar la superficie de la pieza hasta alcanzar un espesor de 8 mm.	180			
Taladrado: Perforaciones de ajuste mecánico	Taladro de banco. Broca 6 mm. Mordaza.		Proceso manual por arranque de viruta. 4 perforaciones pasantes con broca de 6 mm. Velocidad de corte sin restricción.	30			
Avellanado	Taladro de banco. Avellanador HSS90° 15.4x56 mm. Mordaza.		Proceso manual por arranque de viruta. 4 avellanados con profundidad de 3 mm. Velocidad de corte sin restricción.	15			
Proceso de pintado	Pintura color negro mate en spray		Aplicar 3 capas de pintura.	90			

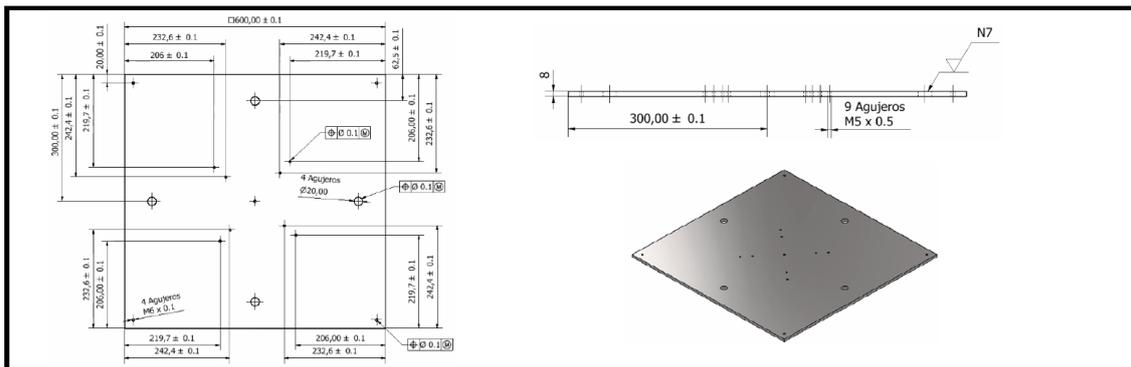
ANEXO S: Hoja de Proceso de Estructura Poleas



HOJA DE PROCESO

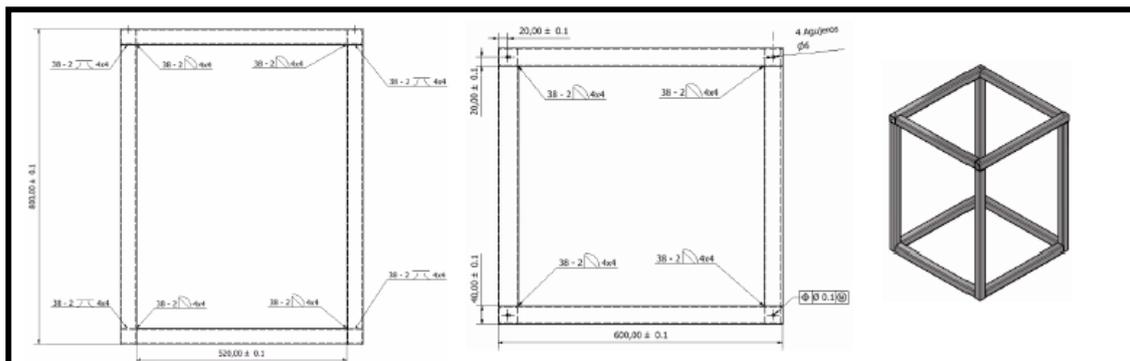
Código Pieza:	CAL-02	Descripción:	Estructura Poleas	Plano N°:	2	Cantidad:	4
Material:	Acero AISI 1045	Responsable:	Luis Velasco				
Tareas	Máquinas & Herramientas	Observaciones	Tiempo (minutos)				
Fresado	Plato de widia. Fresadora. Mordaza.	Proceso por arranque de viruta. Mecanizar la geometría asignada de 85X30X30 mm.	120				
Taladrado: Perforaciones tornillos M6x1	Taladro de banco. Broca 5.5 mm. Mordaza.	Proceso manual por arranque de viruta. 2 perforaciones con una profundidad de 15 mm con broca de 5.5 mm. 1 perforación con una profundidad de 32.5 mm con broca de 5.5 mm. Velocidad de corte sin restricción.	30				
Roscado: tornillos M6X1	Palanca para machuelo. Machuelo M6X1. Aceite de tipo lubricante.	Proceso manual. 2 roscados a 13 mm de profundidad. 1 roscado a 30 mm de profundidad. Lubricar machuelo cada 5 mm.	30				
Proceso de pintado	Pintura color negro mate en spray	Aplicar 3 capas de pintura.	90				

ANEXO T: Hoja de Proceso de la Placa Base



HOJA DE PROCESO							
Código Pieza:	CAL-04	Descripción:	Place Base	Plano N°:	4	Cantidad:	1
Material:	Acero AISI 1045	Responsable:	Luis Velasco				
Tareas		Máquinas & Herramientas		Observaciones		Tiempo (minutos)	
Fresado		Fresa de ranurar de 15 mm. Fresadora. Mordaza.		Proceso por arranque de viruta. Mecanizar una placa de 60x60x8 mm.		180	
Taladrado: Perforaciones de ajuste mecánico, tornillos M6x1 & M5x0.5		Taladro de banco. Broca de centros. Broca de 4 mm. Broca de 5.5 mm. Broca de 10 mm. Broca de 15 mm. Broca de 20 mm. Mordaza.		Proceso manual por arranque de viruta. 4 perforaciones pasantes con broca de 5.5 mm. 9 perforaciones pasantes con broca de 4 mm. 4 perforaciones pasantes con brocas de 5.5 & 10 & 15 & 20 mm. Velocidad de corte sin restricción.		150	
Roscado: tornillos M6X1 & M5X0.5		Palanca para machuelo. Machuelo M6X1. Machuelo M5X0.5 Aceite de tipo lubricante.		Proceso manual. 4 roscados M6X1. 9 roscados M5X0.5 Lubricar machuelo cada 5 mm.		45	
Proceso de pintado		Pintura color negro mate en spray		Aplicar 3 capas de pintura.		90	

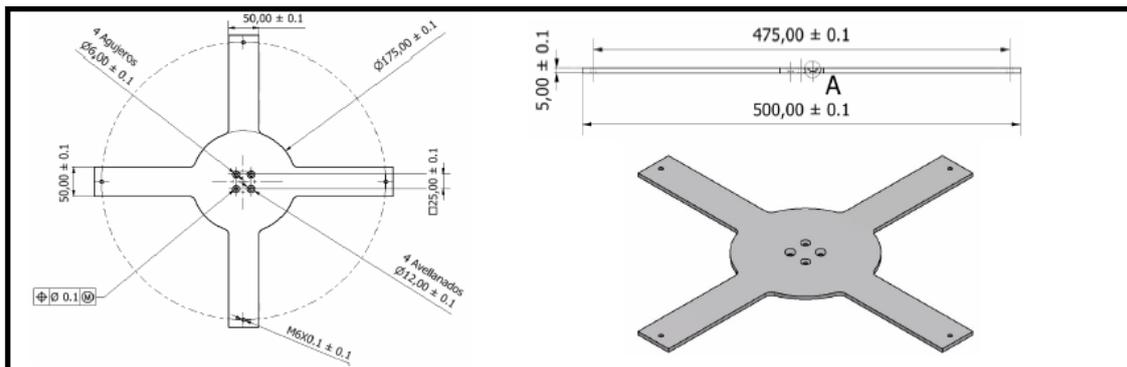
ANEXO U: Hoja de Proceso de la Estructura de Calibración



HOJA DE PROCESO

Código Pieza:	CAL-05	Descripción:	Estructura de Calibración	Plano N°:	5	Cantidad:	1
Material:	Acero ASTM A36		Responsable:	Luis Velasco			
Tareas		Máquinas & Herramientas		Observaciones		Tiempo (minutos)	
Corte		Sierra circular. Disco de corte. Mordaza.		Corte de 2 tubos de 40x40x3x600 mm. Corte de 6 tubos de 40x40x3x520 mm. Corte de 4 tubos de 40x40x3x760 mm.		80	
Taladrado: Perforaciones tornillos M6x1		Taladro de banco. Broca 6 mm. Mordaza.		Proceso manual por arranque de viruta. 4 perforaciones pasantes con broca de 6 mm. Velocidad de corte sin restricción.		30	
Soldadura		Máquina de soldar MIG (Metal Inert Gas)		Dependiendo la sección realizar la unión de los tubos mediante soldadura.		90	
Pulido		Amoladora. Disco de desbaste. Entenalla.		De requerirse pulir las uniones de soldadura.		30	
Proceso de pintado		Pintura color negro mate en spray		Aplicar 3 capas de pintura.		90	

ANEXO V: Hoja de Proceso de la Plataforma Superior de Calibración



HOJA DE PROCESO

Código Pieza:	CAL-06	Descripción:	Plataforma Superior de Calibración	Plano N°:	6	Cantidad:	1
Material:	Acero AISI 1045	Responsable:	Christian Rosero				
Tareas		Máquinas & Herramientas		Observaciones		Tiempo (minutos)	
Corte Laser		Cortadora laser para metal.		Placa de acero de 50x50x5 mm. Corte laser del perfil de la geometría.		60	
Taladrado: Perforaciones de ajuste mecánico		Taladro de banco. Broca 6 mm. Mordaza.		Proceso manual por arranque de viruta. 8 perforaciones pasantes con broca de 6 mm. Velocidad de corte sin restricción.		30	
Avellanado		Taladro de banco. Avellanador HSS90° 15.4x56 mm. Mordaza.		Proceso manual por arranque de viruta. 4 avellanados con profundidad de 3 mm. Velocidad de corte sin restricción.		15	
Proceso de pintado		Pintura color negro mate en spray		Aplicar 3 capas de pintura.		90	