

Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica



**Diseño de un primer prototipo de un montaje experimental
para la medición de esfuerzos por compresión sobre el impulsor
de bombas para sangre.**

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en
Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura

Viviana Acebey Arana

Cartago, 23 de noviembre, 2020



Este obra está bajo una [licencia de Creative Commons Reconocimiento-
NoComercial-CompartirIgual 4.0
Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



Viviana Acebey Arana

Cartago, 23 de noviembre de 2020

Céd: 1-1594-0088

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN DEL INFORME FINAL**

El Profesor Asesor del presente trabajo final de graduación, indica que el documento presentado por el estudiante cumple con las normas establecidas por la Carrera de Ingeniería Mecatrónica, como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Viviana María Acebey Arana

Proyecto: Diseño de un primer prototipo de un montaje experimental para la medición de esfuerzos por compresión sobre el impulsor de bombas para sangre.

JAIME ALONSO Digitally signed by
MORA JAIME ALONSO
MELENDEZ MORA MELENDEZ
(FIRMA) (FIRMA)
Date: 2020.10.27
14:40:26 -06'00'

MSc-Ing. Jaime Mora Meléndez
Asesor

Cartago, 02 de noviembre de 2020

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Jurado Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Viviana María Acebey Arana

Proyecto: Diseño de un primer prototipo de un montaje experimental para la medición de esfuerzos por compresión sobre el impulsor de bombas para sangre.

Miembros del Jurado

MARTA EUGENIA
VILCHEZ MONGE
(FIRMA)

Firmado digitalmente por
MARTA EUGENIA VILCHEZ
MONGE (FIRMA)
Fecha: 2020.11.23
13:07:45 -06'00'

MSc. Marta Vílchez Monge

Jurado 1

ARYS INDIRA
CARRASQUILLA
BATISTA (FIRMA)

Firmado digitalmente por ARYS
INDIRA CARRASQUILLA BATISTA
(FIRMA)
Fecha: 2020.11.23 10:15:59 -06'00'

Dr-Ing. Arys Carrasquilla Batista

Jurado 2

CARLOS
ADRIAN
SALAZAR
GARCIA (FIRMA)

Firmado digitalmente
por CARLOS ADRIAN
SALAZAR GARCIA
(FIRMA)
Fecha: 2020.11.23
09:40:16 -06'00'

MSc-Ing. Carlos Salazar García

Jurado 3

Los miembros de este Jurado dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Carrera de Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, 23 de noviembre de 2020

Resumen

Para poder garantizar la integridad del impulsor de bombas para sangre es necesario someterlo a una serie de pruebas físicas. Dentro de las cuales se encuentran las pruebas mecánicas de los materiales. Por medio de una serie de simulaciones se determina que los esfuerzos de compresión son los principales causantes de fallas en los álabes del impulsor. Es por este motivo que en el presente proyecto se plantea un primer diseño electromecánico para poder medir los esfuerzos de compresión en los álabes del impulsor.

El diseño del sistema se dividió en tres partes. Primero se efectuó la parte mecánica, donde se plantearon una serie de análisis para determinar un diseño capaz de aguantar 1591,2 N. Esta fuerza es con la cual se deforman los álabes del impulsor, si se fabrica con manufactura aditiva SLA. Como segunda parte se tiene la eléctrica, conformada por todos los componentes requeridos para poder mover el sistema mecánico y obtener los datos necesarios para realizar un diagrama de esfuerzo vs deformación unitaria. La tercera parte es el desarrollo del algoritmo de control y su implementación, por medio de la cual se controlaron las distintas partes eléctricas del sistema y se obtienen las señales de salida de los respectivos componentes. Para implementar esta parte se utilizó como microcontrolador la teensy 3.2, la cual cuenta con todas las características necesarias para poder llevar a cabo el desarrollo de la prueba.

Una vez finalizada la propuesta del diseño, se procedió a realizar un prototipo físico integral utilizando materiales económicos, como el acrílico. La manufactura del prototipo se hizo por medio de corte láser, lo que también sirvió para reducir los costos. Por medio del prototipo fue posible realizar pruebas que comprobaron las mediciones de las fuerzas aplicadas al objeto de prueba, obtenidas con las celdas de carga, y los valores de deformación unitaria, conseguidos por medio del encoder.

Palabras clave: esfuerzos, compresión, pruebas mecánicas, teensy, impulsor

Abstract

In order to ensure the integrity of the blood pump impeller, it must undergo a series of physical tests. Among which are the mechanical tests of materials. Through a series of simulations, it is determined that compression stresses are the main causes of impeller blade failures. It is for this reason that a first electromechanical design, able to measure compression forces, is proposed in this project.

The system design was divided into three parts. The first part is mechanics, in which a series of analyzes were proposed to determine a design capable of withstanding 1591.2 N. With this force the impeller blades are deformed, if it is made with 3D printing resin. The electrical part is the second, in which all the components required to be able to move the mechanical system and obtain the necessary data to make a stress vs. unit strain diagram are considered. The programmed part is the third, with this part the different electrical devices of the system were controlled and the output signals of the respective components are obtained. In order to implement this part, the teensy 3.2 was used as a micro controller, which has all the necessary characteristics to carry out the development of the test.

Once the design proposal was finalized, a prototype was implemented using inexpensive materials, such as acrylic. The manufacturing of the prototype was done using laser cutting, which also served to reduce costs. Through the prototype it was possible to carry out a series of tests that verified the operation of the load cells, used to measure the forces applied to the test object, and the encoder, used to obtain the deformation values.

Keywords: stress, compression, mechanical tests, teensy, impeller

*Dedicado a la persona que le debo todos mis logros, a mi
mamá*

Agradecimientos

Quiero empezar agradeciéndole a todos los profesores del área académica por sus enseñanzas. Con cada duda, siempre he encontrado a una persona dispuesta a ayudar y darme la guía que necesitaba. Quiero agradecerle especialmente a la profesora Marta Vílchez, porque se ha convertido en un apoyo constante durante mi formación académica. Además, quiero agradecerle a mi asesor de proyecto, Jaime Mora, quien ha tenido una paciencia infinita para asesorarme con cada uno de los problemas que han surgido a lo largo del proyecto.

De igual manera, quiero agradecerle a Sofia Valverde y Francela Oviedo, por siempre darme su apoyo. Durante todo este proceso he podido contar con ambas, no solo como compañeras de laboratorio, si no también como amigas dispuestas a ayudar en todo lo que les ha sido posible.

Asimismo, quiero agradecerle a mi tío Fernando, quien ha estado para mí siempre que lo he necesitado. Le agradezco por siempre estar pendiente del progreso del proyecto y estar siempre dispuesto a proporcionar su ayuda. Su aporte durante este proyecto es invaluable.

Por último, quiero agradecerle a mi mamá, gracias a ella he podido alcanzar todas las metas que me he propuesto. Ha sido gracias a sus enseñanzas que me he convertido en la persona que soy hoy. Es por esto por lo que considero este logro no solo mío, sino también de ella.

Viviana Acebey Arana

Cartago, 29 de noviembre de 2020

Índice general

Índice de figuras	iv
Índice de tablas	vi
Lista de símbolos y abreviaciones	vii
1 Introducción	1
1.1 Entorno del proyecto	1
1.2 Definición del Proyecto	1
1.2.1 Generalidades	1
1.2.2 Síntesis del Problema	2
1.3 Objetivo General	3
1.4 Objetivos Específicos	3
2 Marco teórico	4
2.1 Enfermedades cardiovasculares y sus tratamientos	4
2.1.1 Insuficiencia Cardíaca	4
2.1.2 Dispositivos de Asistencia Ventricular	5
2.1.3 Impulsor	6
2.2 Mecánica de Materiales	7
2.2.1 Esfuerzos	7
2.2.2 Deformación Unitaria	8
2.3 Pruebas de compresión	9
2.3.1 Equipo Comercial	9
2.3.2 Diagrama de esfuerzo vs deformación unitaria	11
2.3.3 Energía de deformación	12
3 Diseño del sistema para medir esfuerzos de compresión sobre el impulsor de bombas para sangre	13
3.1 Obtención de la fuerza teórica	13
3.2 Selección del método de aplicación de esfuerzos	15
3.3 Diseño e implementación de la parte mecánica	16
3.3.1 Cabeza	16
3.3.2 Tornillos Sin Fin	19
3.3.3 Engranajes	20

3.3.4	Soporte del impulsor	22
3.3.5	Placa del impulsor	22
3.3.6	Placa de Soporte	28
3.3.7	Placa Movable	33
3.3.8	Árbol	35
3.3.9	Soporte del cojinete	37
3.3.10	Guías	38
3.3.11	Base	38
3.3.12	Tapa	38
3.3.13	Soporte Mayor	38
3.3.14	Piezas estándar	41
3.4	Diseño e implementación de la parte eléctrica	42
3.4.1	Controlador	42
3.4.2	Motor	43
3.4.3	Sensores de fuerza	46
3.4.4	Sensor de desplazamiento	48
3.5	Diseño e implementación de la parte programada	49
3.5.1	Programación del motor	49
3.5.2	Programación de las celdas de carga	49
3.5.3	Programación del codificador	50
4	Resultados y análisis	53
4.1	Diseño Mecánico	53
4.2	Diseño eléctrico	54
4.3	Programación	54
4.4	Prueba de concepto de las Celdas de Carga	55
4.5	Prueba de concepto del encoder	57
4.6	Análisis económico	59
4.7	Prototipo	61
5	Conclusiones y Recomendaciones	63
5.1	Conclusiones	63
5.2	Recomendaciones	63
	Bibliografía	64
A	Cotización Metalinspec	66
B	Hoja de datos Celdas de Carga	76
C	Hoja de datos Encoder	78
D	Hoja de datos Motor a pasos	81
E	Hoja de datos TB6600	82

F Hoja de datos HX711	85
G Hoja de datos Teensy 3.2	95
H Hoja de datos Resina Transparente	97
I Hoja de datos Acero 1020	101
J Hoja de datos Aluminio 6061-T6	103
A Código Teensy	105
B Código Matlab	107
C Planos	109

Índice de figuras

1.1	Montaje experimental propuesto para la medición del esfuerzo mecánico en el impulsor con eje central [1]	3
2.1	Ranquin de mortalidad según causa de muerte, 2008 y 2017 [2].	5
2.2	Estructura del DAV comercial [3]	6
2.3	Esfuerzo de Tensión y Esfuerzo de Compresión [4]	8
2.4	Configuración de las pruebas de tensión y compresión. [5]	9
2.5	Diagrama Convencional de Esfuerzo-deformación de un material dúctil. [6]	11
3.1	Área normal del álabe del impulsor [Elaboración propia utilizando Solidworks]	13
3.2	Área cortante del álabe del impulsor [Elaboración propia utilizando Solidworks]	14
3.3	Medidas iniciales de la cabeza [Elaboración propia utilizando Inventor]	17
3.4	Medidas completas de la cabeza [Elaboración propia utilizando Inventor]	17
3.5	Diagrama de Cuerpo Libre de la cabeza [Elaboración propia utilizando Inventor]	18
3.6	Diagrama de esfuerzos de la cabeza [Elaboración propia utilizando Inventor]	18
3.7	Medidas del soporte del impulsor [Elaboración propia utilizando Inventor]	22
3.8	Medidas iniciales de la placa del impulsor. Cotas en mm [Elaboración propia utilizando Inventor]	23
3.9	DCL visto de frente de la placa del impulsor (cotas en mm). [Elaboración propia utilizando Invetor]	24
3.10	Corte 1 de la placa del impulsor para el análisis de deflexión (cotas en mm). [Elaboración propia utilizando Invetor]	24
3.11	DCL visto del lado de la placa del impulsor (cotas en mm). [Elaboración propia utilizando Invetor]	26
3.12	Corte 2 de la placa del impulsor para el análisis de deflexión (cotas en mm). [Elaboración propia utilizando Invetor]	26
3.13	Medidas principales de la placa de soporte (cotas en mm). [Elaboración propia utilizando Invetor]	28
3.14	Diagrama Cuerpo Libre de la placa de soporte. [Elaboración propia utilizando Invetor]	29
3.15	Diagrama Cuerpo Libre del caso 1 de la placa de soporte. [Elaboración propia utilizando Invetor]	29

3.16	Corte 1 de la placa de soporte para el análisis de deflexión. [Elaboración propia utilizando Invetor]	30
3.17	Corte 2 de la placa de soporte para el análisis de deflexión. [Elaboración propia utilizando Invetor]	30
3.18	Medidas iniciales de la placa movable. [Elaboración propia utilizando Invetor]	33
3.19	Medidas iniciales de la placa movable (Cotas en mm). [Elaboración propia utilizando Invetor]	34
3.20	Corte 1 de la placa movable. [Elaboración propia utilizando Invetor]	34
3.21	Medidas principales del árbol (cotas en mm). [Elaboración propia utilizando Invetor]	36
3.22	Medidas principales del soporte del cojinete (cotas en mm). [Elaboración propia utilizando Invetor]	37
3.23	Medidas principales de las guías (cotas en mm). [Elaboración propia utilizando Invetor]	38
3.24	Medidas principales dela base (cotas en mm). [Elaboración propia utilizando Invetor]	39
3.25	Medidas principales de la tapa (cotas en mm). [Elaboración propia utilizando Invetor]	39
3.26	Medidas iniciales de los soportes mayores. [Elaboración propia utilizando Invetor]	40
3.27	Diagrama eléctrico del motor a pasos [Elaboración propia utilizando Eagle]	45
3.28	Módulo HX711 de Sparkfun. [7]	48
3.29	Diagrama eléctrico de las celdas de carga. [Elaboración propia utilizando Eagle]	48
3.30	Diagrama eléctrico del Encoder. [Elaboración propia utilizando Eagle]	49
3.31	Diagrama de flujo para controlar el motor [Elaboración propia]	50
3.32	Diagrama de flujo para controlar las celdas de carga [Elaboración propia]	51
3.33	Diagrama de flujo para controlar el codificador [Elaboración propia utilizando visio]	52
4.1	Diseño final mecánico. [Elaboración propia utilizando Invetor]	53
4.2	Diseño final eléctrico. [Elaboración propia utilizando Eagle]	54
4.3	Diagrama de flujo del código final. [Elaboración propia utilizando Visio]	55
4.4	Configuración de la regla como viga [Elaboración propia utilizando Inventor]	57
4.5	Diagrama cuerpo libre de la viga [Elaboración propia utilizando Inventor]	58
4.6	Prototipo. [Elaboración propia]	61

Índice de tablas

1.1	Resultados obtenidos a partir de las simulaciones estructurales.[1]	2
2.1	Métodos experimentales pasa tasas altas de pruebas de compresión.[8]	10
2.2	MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS UH-A.C [9]	10
3.1	Métrica de evaluación. [Elaboración Propia]	15
3.2	Suposiciones de cada uno de los sistemas. [Elaboración Propia]	16
3.3	Comparación de los métodos a aplicar. [Elaboración Propia]	16
3.4	Resultados obtenidos del diseño de engranes. [Elaboración propia utilizando Inventor]	21
3.5	Valores finales de los Engranes. [Elaboración propia utilizando Inventor]	21
3.6	Requerimientos del procesador. [Elaboración Propia]	42
3.7	Comparación de los procesadores. [Elaboración Propia]	43
3.8	Elección del procesador. [Elaboración Propia]	43
3.9	Requerimientos del motor. [Elaboración Propia]	44
3.10	Comparación de distintos motores. [Elaboración Propia]	44
3.11	Elección del motor. [Elaboración Propia]	45
3.12	Comparación de las celdas de carga. [Elaboración Propia]	46
3.13	Requerimientos de las celdas de carga. [Elaboración Propia]	47
3.14	Elección de la celda de carga. [Elaboración Propia]	47
4.1	Mediciones tomadas con las celdas de carga. [Elaboración Propia]	56
4.2	Resultados de la implementación de la regla como viga. [Elaboración Propia]	58
4.3	Costos de la implementación del prototipo. [Elaboración Propia]	59
4.4	Costos para realizar el diseño propuesto. [Elaboración Propia]	60

Lista de símbolos y abreviaciones

Abreviaciones

DCL	Diagrama de Cuerpo Libre
FDA	Food and Drug Administration
FS	Factor de Seguridad
IC	Insuficiencia Cardíaca
SLA	Estereolitografía
VAD	Dispositivos de Asistencia Ventricular

Capítulo 1

Introducción

1.1 Entorno del proyecto

El proyecto planteado se realizó en el laboratorio de investigación del Instituto Tecnológico de Costa Rica Sibila, con el fin de procurar el avance del proyecto de investigación “Dispositivo de Asistencia Ventricular (VAD)”. El proyecto VAD busca realizar un dispositivo con el cual se pueda prolongar la vida de los pacientes en espera de un trasplante de corazón, así como mejorar su calidad de vida durante ese tiempo de espera. Actualmente en el laboratorio se están realizando distintas pruebas para garantizar el funcionamiento correcto de todos los elementos que conformarán el dispositivo en cuestión.

El siguiente paso a seguir en el proceso de investigación es comprobar los máximos esfuerzos que el impulsor de bombas para sangre puede soportar sin deformarse. Esto es de vital importancia ya que si el impulsor de bombas para sangre se deforma pierde su funcionalidad, lo cual afectaría la salud de la persona en la cual opera.

1.2 Definición del Proyecto

1.2.1 Generalidades

En Costa Rica, las enfermedades del sistema circulatorio son la principal causa de muerte, en este momento, al menos cuatro pacientes se encuentran a la espera de un donador[10]. A pesar de ello la posibilidad de recibir un trasplante es escasa, esto se debe a que de cada mil personas que mueren, solamente tres mueren bajo las circunstancias adecuadas para que sus órganos sean aptos para trasplantar [11]. Por este motivo, encontrar un corazón sano para los pacientes no es fácil. El Dispositivo de Asistencia Ventricular (VAD) nace con el propósito de alargar la expectativa de vida del paciente, así como mejorar su calidad de vida durante la espera. Los modelos de VAD actuales aún se encuentran en necesidad de grandes mejoras, lo que produce que se origine la investigación llevada a cabo en el

ITCR.

Una de las partes del proyecto de investigación consta en evaluar los impulsores para bombas de sangre. En el informe escrito por [1] se realiza un análisis por medio de simulaciones computacionales para poder determinar los esfuerzos mecánicos que soportaría el impulsor al estar hecho de distintos materiales. Al realizar esto se obtienen los resultados mostrados en la tabla 1.1.

Tabla 1.1: Resultados obtenidos a partir de las simulaciones estructurales.[1]

Impulsor con eje central y sin vibraciones			
Magnitud física	Material		
	Platino (Pt)	PEEK	PDMS
Desplazamiento máximo (m)	2,05E-8	9,21E-7	3,50E-3
Esfuerzo de von Mises máximo (Pa)	7,82E5	N/A	N/A
Esfuerzo principal máximo (Pa)	N/A	6,40E5	1,71E6
Deformación volumétrica máxima	1,71E-6	7,72E-5	0,13

Para poder obtener resultados similares a los mostrados en la tabla 1.1 por medio de un método experimental es necesario realizar un equipo capaz de adaptarse a la geometría y necesidades del impulsor para bombas de sangre. Los sistemas comerciales utilizados para este tipo de análisis están diseñados para trabajar con probetas estandarizadas, lo cual limitaría la prueba que se pretende implementar. En el informe [1] se muestra una primera propuesta del montaje experimental para poder medir los esfuerzos de compresión en el impulsor. Esta propuesta se puede observar en la figura 1.1.

Se debe tener en consideración que el sistema para implementar la prueba debe realizarse bajo el presupuesto del laboratorio de investigación. El proyecto no contó con financiamiento externo, por lo que fue necesario adecuar la implementación a un presupuesto limitado. Es por este motivo que el costo fue uno de los factores decisivos para la selección de los componentes, materiales y piezas.

1.2.2 Síntesis del Problema

Cualquier fallo mecánico del impulsor de bombas para sangre podría ser fatal para la salud del paciente que lo porte. Para poder asegurar su integridad es necesario que el laboratorio cuente con un sistema de medición de esfuerzos de compresión adaptado al impulsor y su geometría.

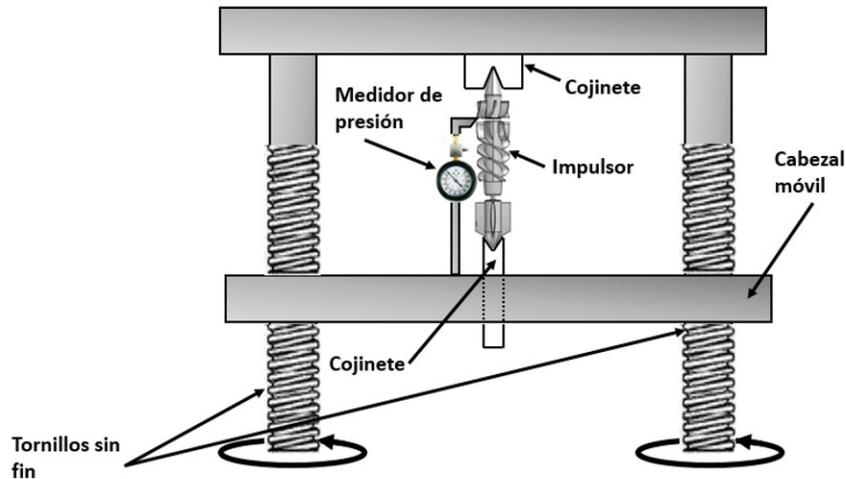


Figura 1.1: Montaje experimental propuesto para la medición del esfuerzo mecánico en el impulsor con eje central [1]

1.3 Objetivo General

Diseñar un sistema para la medición de esfuerzos por compresión y su respuesta en el impulsor de bombas para sangre.

1.4 Objetivos Específicos

Identificar el método más apropiado para aplicar los esfuerzos de compresión en el impulsor de bombas de sangre que garantice la uniformidad de los esfuerzos a lo largo del área transversal de este.

Elaborar un método de recolección de los datos brindados por los sensores, para su posterior análisis e interpretación.

Implementar una primera prueba de concepto del diseño realizado.

Validar la prueba de concepto por medio de los datos teóricos.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Enfermedades cardiovasculares y sus tratamientos

Por medio de la información recolectada por el Ministerio de Salud, se sabe que las enfermedades cardiovasculares son la principal causa de muerte de los costarricenses. En los análisis realizados para el período de 2014-2016 se concluyó que este tipo de enfermedades constituyen el 27.2% de defunciones en el país [12]. Las enfermedades cardiovasculares han sido la primer causa de muertes de los costarricenses desde hace varios años. En la figura 2.1 se observa que tanto en el 2008 como en el 2017 el infarto agudo al miocardio fue la principal causa de muerte, con más de 1400 casos.

2.1.1 Insuficiencia Cardiaca

De acuerdo a The American College of Cardiology / American Heart Association (ACC / AHA) existen distintas clasificaciones para los pacientes con insuficiencia cardiaca (IC) [13]. Estas clasificaciones se categorizan en cuatro niveles, dependiendo del grado de insuficiencia de la persona, los cuales son:

A: Alto riesgo de desarrollar una IC. Esto incluye a personas con hipertensión, diabetes, historia familiar de cardiopatías

B: IC Asintomática. Esto incluye a pacientes con disfunción ventricular izquierda, infartos del miocardio previos.

C: IC Sintomática. En este caso los pacientes presentan enfermedades cardiacas estructurales, disnea y fatiga, entre otras afecciones.

D: IC Avanzada. Al ser la última etapa, los pacientes presentan diversos síntomas que afectan su vida cotidiana, pese a que se encuentran recibiendo diversos tratamientos médicos.



Figura 2.1: Ranquin de mortalidad según causa de muerte, 2008 y 2017 [2].

Para la última etapa de IC, la clasificación tipo D, se recomiendan distintos tratamientos. Estos tratamientos incluyen el trasplante cardíaco, la cirugía de restauración ventricular, la asistencia mecánica circulatoria o la administración de fármacos inotrópicos intravenosos [14]. Sin embargo, este tipo de terapias no siempre son una opción viable o efectiva para el paciente

2.1.2 Dispositivos de Asistencia Ventricular

En el área de la asistencia mecánica circulatoria se pueden encontrar los dispositivos de asistencia ventricular (VAD por sus siglas en inglés). Este tipo de dispositivos nacen

para ayudar a los pacientes en estado crítico a la espera de trasplantes cardíacos o no aptos para recibir este tipo de tratamiento. Comercialmente existen distintos tipos de VAD aprobados por la FDA, como por ejemplo el Abiomed BVS 5000 y Thoratec. Estos dos dispositivos son de tipo extracorpóreos capaces de brindar asistencia biventricular. Por otro lado, Novacor N1000PC, HeartMate Pneumatic y Vented Electric LVADs son dispositivos implantables diseñados para el soporte ventricular izquierdo [15].

El MicroMed DeBakey es uno de los VAD disponibles comercialmente. Este dispositivo de flujo continuo trabaja como una bomba axial con un impulsor giratorio para generar un flujo ininterrumpido de sangre. Además del impulsor, este dispositivo cuenta con un enderezador de flujo y un difusor [16]. Las distintas partes de este dispositivo se pueden observar en la imagen 2.2.

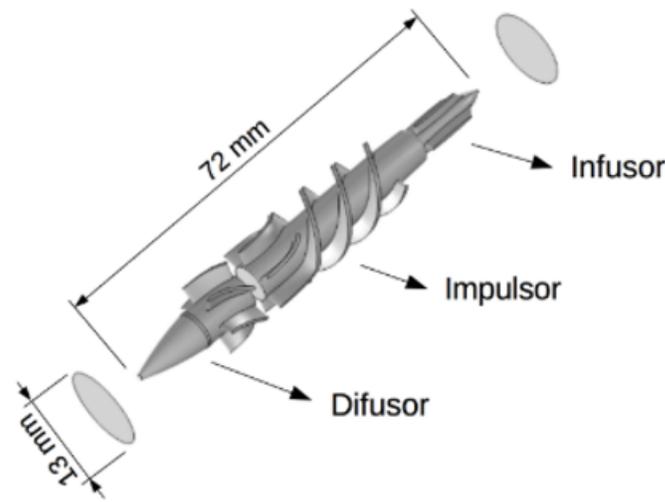


Figura 2.2: Estructura del DAV comercial [3]

2.1.3 Impulsor

El impulsor de bombas de sangre es la única parte móvil de los dispositivos de asistencia ventricular. Esta parte del VAD es capaz de girar a velocidades de entre 7500 y 12500 RPM y generar un flujo de hasta 10 L/min [16]. Para la elaboración de este proyecto se utiliza como punto de partida las tesis realizadas en el laboratorio de investigación con respecto al impulsor, la primera es la realizada por Gabriela Ortiz León en su tesis doctoral [3] y el segundo es la realizada por Carlos Luis Mayorga Espinoza en su tesis de maestría [1].

En la tesis doctoral de Dra. Ortiz León se desarrolla un modelo matemático de un impulsor axial sin eje central. Este modelo se compara con el impulsor con eje central, el cual es el que se utiliza de forma comercial en dispositivos como en la bomba MicroMed DeBakey. Dentro de las conclusiones de esta tesis se determina que el uso del impulsor sin eje central en bombas para sangre es viable y además presenta mejores resultados en

distintas áreas de su funcionamiento [3].

Por otro lado, en la tesis de maestría de Carlos Luis Mayorga se realizan distintos análisis estructurales al impulsor sin eje central, siempre realizando una comparación con su contraparte comercial. En esta tesis se concluye que los elementos que experimentan la mayor concentración de esfuerzos son los álabes del impulsor. Además, se determinan los materiales más apropiados para la futura construcción del impulsor [1].

2.2 Mecánica de Materiales

La mecánica de materiales es una de las disciplinas del área de la mecánica, la cual comprende el estudio de las cargas externas aplicadas a un cuerpo deformable, el estudio de las cargas internas que actúan dentro del cuerpo y el cálculo de las deformaciones del cuerpo [17]. Este tema es de suma importancia ya que el material afecta directamente el tamaño, las deflexiones y la estabilidad de los cuerpos que se quieren analizar.

2.2.1 Esfuerzos

Se conoce como esfuerzo a la intensidad de la fuerza interna de un cuerpo sobre un área específica que pasa por un punto [17]. Existen distintos tipos de esfuerzos, los cuales varían dependiendo de la dirección y el tipo de fuerza aplicada.

Esfuerzo Normal

El esfuerzo normal es aquel en que la fuerza (ΔF) actúa en dirección normal (perpendicular) al área (ΔA). El esfuerzo normal es representado con el símbolo sigma (σ) y se define por medio de la fórmula:

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (2.1)$$

Para facilitar el análisis del esfuerzo normal se puede suponer que el cuerpo se somete a una deformación uniforme constante, con lo cual la ecuación 2.1 se puede simplificar de la siguiente forma:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

El esfuerzo definido por la ecuación 2.4 se conoce como Esfuerzo Normal Promedio.

Si las fuerzas aplicadas al objeto tienden a estirarlo, el esfuerzo resultante se conoce como esfuerzo de tensión. Mientras que si las fuerzas aplicadas tienden a comprimir el objeto, se conoce como esfuerzo de compresión. Ambos tipos de esfuerzos se pueden observar en la imagen 2.3.

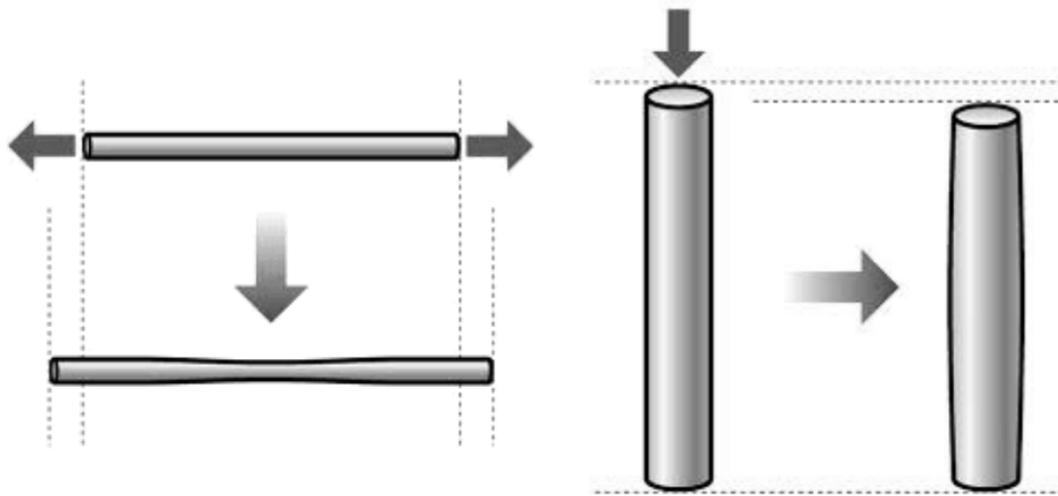


Figura 2.3: Esfuerzo de Tensión y Esfuerzo de Compresión [4]

Esfuerzo Cortante

El esfuerzo cortante se produce cuando la fuerza actúa de forma tangente al área de estudio. Este esfuerzo se representa con el símbolo tau (τ) y se puede definir por medio de la siguiente ecuación:

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (2.3)$$

De igual forma, se puede simplificar la ecuación 2.3 para obtener el esfuerzo cortante promedio. El cual se define de forma matemática en la siguiente fórmula:

$$\tau = \frac{V}{A} \quad (2.4)$$

Donde V va a ser la fuerza cortante interna.

2.2.2 Deformación Unitaria

La deformación unitaria es un concepto utilizado para describir la deformación por cambios de longitud de segmentos de líneas y los cambios en sus ángulos [17]. Es decir, es la relación entre dos longitudes, por lo que las unidades utilizadas para describirla son m/m. Para cada material se puede obtener la deformación unitaria, inherente del mismo, por medio de distintas pruebas experimentales.

Por medio de la deformación unitaria es posible obtener una relación con las cargas y esfuerzos aplicados a un cuerpo. Esto se logra clasificando la deformación unitaria en dos tipos, deformación unitaria normal y deformación unitaria cortante. La deformación unitaria normal se obtiene por medio del alargamiento de una sección del objeto. Por

otro lado, la deformación unitaria cortante se da cuando el ángulo entre dos unidades perpendiculares entre si cambia [17].

2.3 Pruebas de compresión

Por medio de las pruebas de tensión, torsión, fatiga y compresión es posible determinar las propiedades mecánicas de los materiales. Estas pruebas se llevan a cabo por medio de herramientas llamadas máquinas universales en talleres especializados [18]. Las pruebas de tensión y compresión suelen realizarse de manera muy similar, la diferencia entre ellas es la dirección en que se aplica la fuerza. En el caso de las pruebas de tensión la fuerza se aplica de tal forma que el objeto se estira, mientras que en la prueba de compresión el objeto se comprime. La configuración de ambas pruebas se puede observar en la figura 2.4.

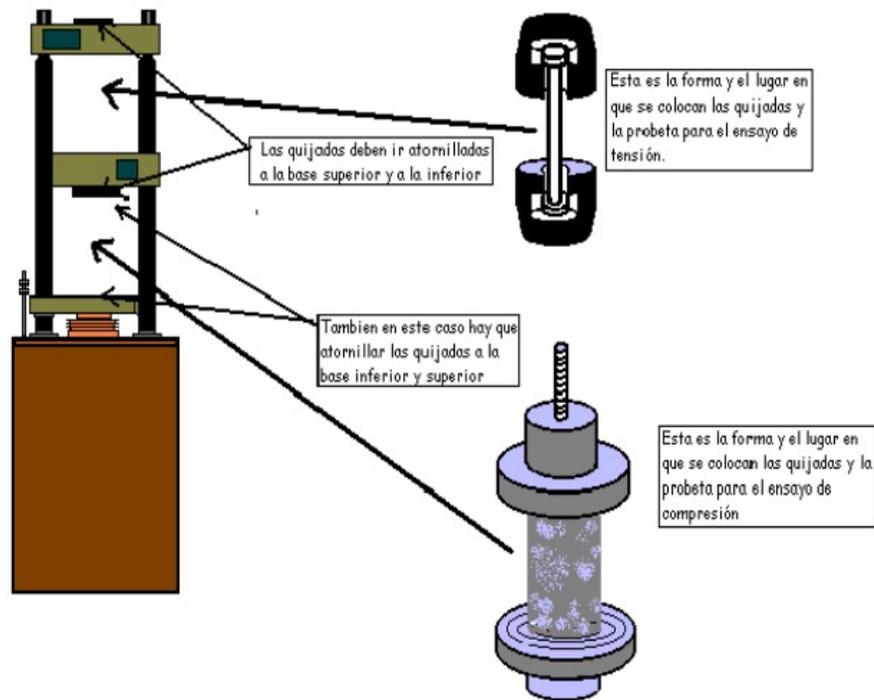


Figura 2.4: Configuración de las pruebas de tensión y compresión. [5]

2.3.1 Equipo Comercial

En cuanto a las pruebas mecánicas de los materiales, la más desarrollada y utilizada es la prueba de tensión. Sin embargo, estas pruebas tienen ciertas limitaciones, ya que no pueden determinar la totalidad de las propiedades mecánicas de los materiales. Las pruebas de compresión pueden ser aplicadas a una gran variedad de materiales; no obstante,

las más comunes son en el metal utilizado en las estructuras de edificios y el concreto utilizado en los soportes de los puentes [19].

Para realizar las pruebas de compresión existen distintos métodos, utilizados de forma comercial. Estos métodos se observan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Métodos experimentales para tasas altas de pruebas de compresión.[8]

Tasa de deformación aplicable (s^{-1})	Técnica de prueba
<0.1	Bastidores de carga convencionales
0.1 - 100	Marcos servohidráulicos especiales
0.1 - 500	Plastómetro de leva y prueba de caída
200 - 10^4	Barra de presión de Hopkinson en compresión
10^4 - 10^5	Prueba de impacto de Taylor

Es común que se utilice una sola máquina universal para realizar distintos tipos de pruebas. Lo cual se logra utilizando distintos tipos de mordazas que sostienen la probeta y se adaptan dependiendo del tipo de prueba que se quiere realizar. Un ejemplo comercial de este equipo es la Máquina Universal de Ensayos UH-A.C.

La máquina UH-A.C es un equipo capaz de realizar ensayos de tracción, compresión y la prueba de flexión de materiales metálicos. Sin embargo, con aditamentos adicionales se pueden realizar pruebas en madera, hormigón, cerámica, caucho, plástico y otros materiales [9]. Las características de este mecanismo se pueden observar en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS UH-A.C [9]

Tipo de característica	Característica	Especificación
Generales	Nombre del equipo	Máquina Universal de Ensayos UH-A.C
	Marca/Fabricante	SHIMADZU
	Tipo de equipo	Universal de Ensayos UH
	Tipo de sistema	Hidráulico
Dimensiones	Frente	2800 mm
	Altura	1800 mm
	Profundidad	850 mm
Eléctricas	Potencia	2.2 kW
	Amperaje	1.81 A
	Voltaje	200-220 V
	Número de fases	3
	Frecuencia	50/60 Hz

2.3.2 Diagrama de esfuerzo vs deformación unitaria

De los ensayos de compresión o tensión se obtienen las propiedades mecánicas de los materiales, entre ellos se obtienen los esfuerzos y la deformación unitaria producidos dentro del objeto en estudio. Al graficar estas dos propiedades se obtiene el diagrama de esfuerzo-deformación unitaria. Aunque existen dos tipos de diagramas de esfuerzo-deformación, a continuación se describe el diagrama convencional de esfuerzo-deformación unitaria, ya que es el que compete a este informe. [17].

Para realizar el diagrama es necesario contar con dos valores, el esfuerzo nominal o de ingeniería y la deformación nominal o de ingeniería. Estos datos se pueden calcular por medio de fórmulas, las cuales se muestran a continuación.

Para determinar el esfuerzo nominal o de ingeniería se utiliza:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2.5)$$

Donde:

P es la carga aplicada el objeto de prueba.

A_0 es el área transversal original del objeto de prueba.

En cuanto a la deformación unitaria nominal o de ingeniería se emplea la fórmula:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_0} \quad (2.6)$$

Donde:

δ es el cambio en la longitud.

L_0 es la longitud original.

Al obtener estos valores durante una prueba ya sea de compresión o tensión se obtiene un diagrama como el que se muestra en la figura 2.5. En esta figura se observa el esfuerzo de ingeniería se coloca como ordenadas, mientras que la deformación de ingeniería se debe colocar en las abscisas.

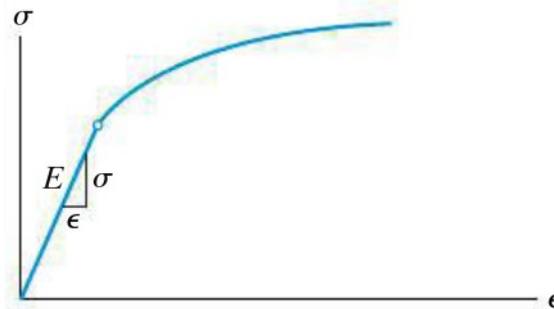


Figura 2.5: Diagrama Convencional de Esfuerzo-deformación de un material dúctil. [6]

2.3.3 Energía de deformación

Al generar esfuerzos de cualquier tipo en un objeto se va a producir energía en su interior como resultado. A esta energía se le conoce como energía de deformación unitaria. Esta energía va a ser igual al trabajo externo producto del desplazamiento producido por la fuerza [17].

Por otro lado, es importante considerar el volumen del elemento, ya que esto va a influir directamente en la energía producida. Al considerar el volumen se tiene la densidad de energía de deformación unitaria. La cual, siempre y cuando el material se comporte de forma elástica lineal, se calcula por medio de la ecuación:

$$u = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (2.7)$$

Capítulo 3

Diseño del sistema para medir esfuerzos de compresión sobre el impulsor de bombas para sangre

3.1 Obtención de la fuerza teórica

La fuerza teórica se utilizó para realizar el diseño del sistema. Se calcularon dos fuerzas distintas, la normal y la cortante. Para el diseño se utilizó el valor de la fuerza de menor magnitud ya que es la que presenta primero el fallo.

Para poder calcular la fuerza normal es necesario definir dos valores. El primer valor es el área transversal total de los álabes y el segundo es el esfuerzo último del material. Para obtener el dato del área se utilizaron las medidas del impulsor previamente brindadas. En la figura 3.1 se puede observar el valor del área de uno de los álabes del impulsor.

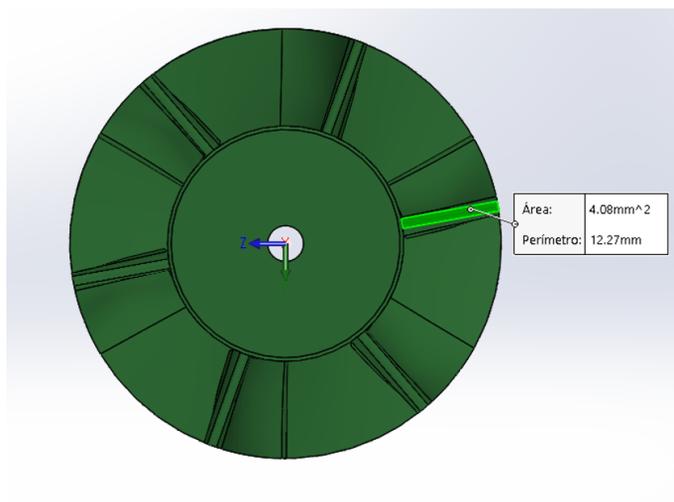


Figura 3.1: Área normal del ábabe del impulsor [Elaboración propia utilizando Solidworks]

El segundo dato se obtiene del material del impulsor, el cual es la resina transparente para

impresión 3D. De la hoja de datos de dicho material se obtuvo el valor del esfuerzo último de tensión, el cual corresponde a 65 MPa. Con ambos valores identificados se calculó la fuerza teórica de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 F_n &= \sigma * A_n * 6 \\
 F_n &= 65MPa * 4.08x10^{-6} * 6 \\
 F_n &= 1591.2N
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Para calcular ambas fuerzas el área se multiplicó por 6, ya que cada impulsor cuenta con seis álabes. Después de calcular la fuerza normal se calculó la fuerza cortante. Para esto se utilizó el área mostrada en la figura 3.2.

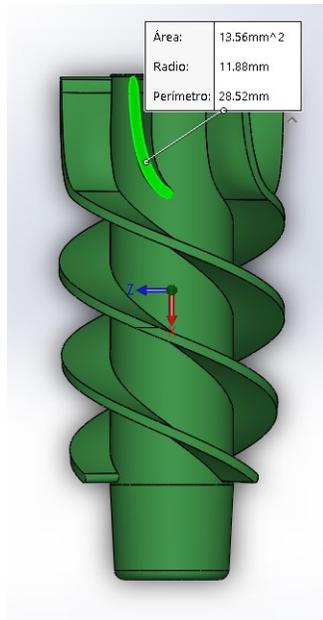


Figura 3.2: Área cortante del álabe del impulsor [Elaboración propia utilizando Solidworks]

Para este cálculo se volvió a utilizar el valor de esfuerzo de tensión último que indica la hoja de datos, ya que no se cuenta con ningún otro valor asociado al material del impulsor. De esta forma, se aplicó la fórmula del esfuerzo:

$$\begin{aligned}
 F_c &= \sigma * A_c * 6 \\
 F_c &= 65MPa * 13.56x10^{-6} * 6 \\
 F_c &= 5288.4N
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

Al comparar ambas fuerzas se determinó que la fuerza menor es la normal, por lo que el fallo de los álabes sucederá primero por esfuerzos normales y no por esfuerzos cortantes. Es por este motivo que la fuerza teórica utilizada para realizar el diseño fue de 1591.2N.

3.2 Selección del método de aplicación de esfuerzos

Para poder diseñar el sistema se consideraron tres posibilidades diferentes, un sistema electromecánico, electrohidráulico o electroneumático. Para poder escoger el método más adecuado se implementó la métrica mostrada en la tabla 3.1. Esta métrica se implementó comparando las características de cada uno de los métodos entre si, teniendo en cuenta los requerimientos planteados para el diseño.

Tabla 3.1: Métrica de evaluación. [Elaboración Propia]

Métrica	Valor
Muy Bueno	5
Bueno	4
Regular	3
Malo	2
Muy Malo	1
No satisface el criterio	0

Esta métrica se aplicó a cada uno de los sistemas, para los cuales se evaluaron distintos parámetros: materiales disponibles en el laboratorio, material disponible en el país, costo del material necesario, facilidad de implementación, magnitud máxima de la fuerza posible a alcanzar y tamaño del equipo. En la tabla 3.2 se observan las consideraciones realizadas para la asignación de la métrica.

Como se observa en la tabla 3.3, el método más adecuado para aplicar es el electromecánico. Esto debido a que no es necesario que el laboratorio adquiera equipo especial, como compresores de aire. Además, su tamaño es más reducido, comparado con las bombas necesarias para poder aplicar los otros dos tipos de sistemas. Aunque la magnitud máxima que se puede alcanzar con un sistema electromecánico es menor, es suficiente para poder realizar la prueba y obtener la deformación de los álabes deseada.

Tabla 3.2: Suposiciones de cada uno de los sistemas. [Elaboración Propia]

Parámetro a evaluar	Electromecánico	Electrohidráulico	Electroneumático
Materiales disponibles en el laboratorio	El laboratorio cuenta con fuentes de corriente directa, multímetros y herramientas como cegetas, limas, entre otros	El laboratorio no cuenta con equipo hidráulico	El laboratorio no cuenta con equipo neumático
Material disponible en el país	Los materiales para la parte mecánica se encuentran disponibles en ferreterías o tiendas especializadas en el país	Existen tiendas especializadas en el país que disponen de equipo hidráulico	Existen tiendas especializadas en el país que disponen de equipo neumático
Costo del material necesario	Ya que los materiales del sistema mecánico son de uso más cotidiano, su costo es menor comparado con los otros dos sistemas	Debido a que es necesario adquirir equipo especializado, el costo del material podría ser elevado	Debido a que es necesario adquirir equipo especializado, el costo del material podría ser elevado
Facilidad de implementación	Para su implementación se utiliza el laboratorio de manufactura en el ITCR	Su implementación se debe realizar en el laboratorio de investigación con el equipo que se tenga disponible	Su implementación se debe realizar en el laboratorio de investigación con el equipo que se tenga disponible
Magnitud máxima de la fuerza posible a alcanzar	El sistema es capaz de alcanzar la fuerza máxima, pero es necesario realizar un diseño robusto	El sistema es capaz de alcanzar la fuerza máxima	El sistema es capaz de alcanzar la fuerza máxima
Tamaño del equipo	Ya que es necesario realizar un diseño robusto, el tamaño del equipo es considerable	Debido a que es necesario utilizar equipo especializado como compresores, el tamaño del equipo es considerable	Debido a que es necesario utilizar equipo especializado como compresores, el tamaño del equipo es considerable

Tabla 3.3: Comparación de los métodos a aplicar. [Elaboración Propia]

Parámetro a evaluar	Electromecánico	Electrohidráulico	Electroneumático
Materiales disponibles en el laboratorio	3	0	0
Material disponible en el país	3	3	3
Costo del material necesario	3	2	2
Facilidad de implementación	4	2	3
Magnitud máxima de la fuerza posible a alcanzar	2	5	5
Tamaño del equipo	3	2	2
Total	18	14	15

3.3 Diseño e implementación de la parte mecánica

3.3.1 Cabeza

La pieza que se denominó "Cabeza" es la encargada de aplicar la fuerza directamente sobre el impulsor de bombas para sangre. Se une al resto del sistema por medio de un

tornillo y cuatro tuercas. Para iniciar con el diseño de la cabeza se utilizaron las medidas definidas por el tamaño del impulsor, estas medidas se muestran en la figura 3.3.

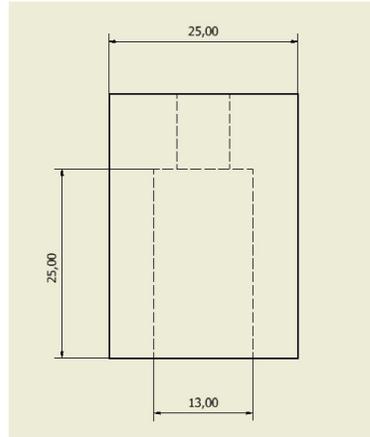


Figura 3.3: Medidas iniciales de la cabeza [Elaboración propia utilizando Inventor]

Al tener estas medidas, se seleccionó un tornillo que se pudiera obtener fácilmente de forma comercial, para definir la medida del agujero pasante. Por último, la altura final de la pieza se seleccionó por conveniencia. Se pueden observar todas las medidas seleccionadas para la cabeza en la imagen 3.4.

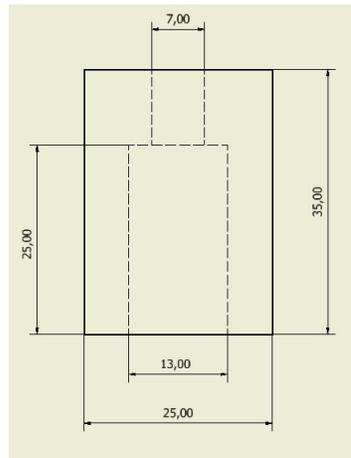


Figura 3.4: Medidas completas de la cabeza [Elaboración propia utilizando Inventor]

La cabeza es sometida a las fuerzas mostradas en la imagen 3.5. En esta imagen se puede observar la fuerza de 1591.2 N (F_{th}) representada en rojo. Las flechas azules representan las reacciones provocadas por los seis álabes del impulsor. Estas reacciones se denominarán F_r , y se calcularon por medio del siguiente método:

$$\begin{aligned}
 \Sigma F &= 0 \\
 -F_{th} + 6 * F_r &= 0 \\
 F_r &= \frac{F_{th}}{6} \\
 F_r &= \frac{1591.2}{6} \\
 F_r &= 265.2N
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

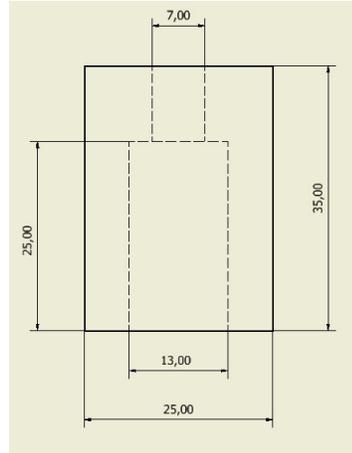


Figura 3.5: Diagrama de Cuerpo Libre de la cabeza [Elaboración propia utilizando Inventor]

Para la implementación de esta pieza se seleccionó el Aluminio 6061-T6, el cual es accesible de forma comercial. Por medio de la ficha técnica del aluminio se sabe que el S_y de este material es de 255 MPa. Con todos estos datos se aplicó los teoremas de Esfuerzo Cortante Máximo y de Energía de Distorsión, para los cuales se necesita el diagrama de esfuerzos mostrado en la imagen 3.6. Este diagrama se obtuvo analizando la pieza en su punto más esforzado, el cual se encuentra en los puntos donde se generan las fuerzas de reacción. Además, el esfuerzo de compresión se calculó de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{F}{A} \\ \sigma &= \frac{265.2N}{4.08 \times 10^{-6}} \\ \sigma &= 65MPa\end{aligned}\tag{3.4}$$

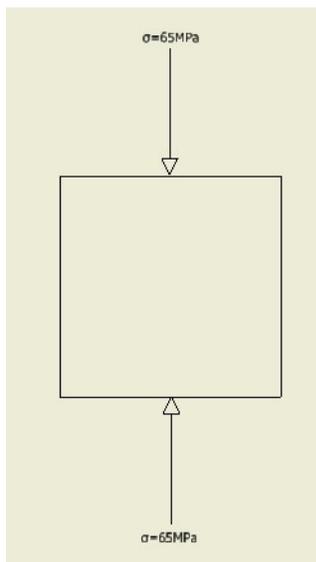


Figura 3.6: Diagrama de esfuerzos de la cabeza [Elaboración propia utilizando Inventor]

Para aplicar los teoremas, previamente mencionados se realizó un programa en matlab. A dicho programa se le introduce un esfuerzo en x igual 0, un esfuerzo en y igual a 65MPa, n esfuerzo cortante igual a 0 y el esfuerzo Sy igual a 255 MPa. Al aplicar los datos en el programa se obtuvo como FS 3.9231 en ambos casos. Por lo que la geometria y el material seleccionados son los adecuados para implementar la pieza.

3.3.2 Tornillos Sin Fin

Se llamaron “Tornillos Sin Fin” a las dos barras roscadas encargadas de convertir el movimiento rotacional del motor en un movimiento lineal, los cuales se unen al resto del sistema por medio de engranes y tuercas. Para iniciar con el análisis se escogió un tornillo UNC 5/8-13 disponible de forma comercial, al cual se le aplicaron las fórmulas de tornillos de potencia y de pandeo para determinar si son capaces de resistir los esfuerzos producidos durante la prueba. Para el cálculo del torque fue necesario determinar la fuerza aplicada a cada uno, lo cual se determina de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \Sigma F &= 0 \\
 F - 2Ft &= 0 \\
 Ft &= \frac{F}{2} \\
 Ft &= \frac{1591.2N}{2} \\
 Ft &= 795.6N
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

Al obtener la fuerza aplicada a cada tornillo fue posible calcular el torque necesario para aplicar esta fuerza por medio de un programa en Matlab. En este programa se utiliza la teoría de tornillos de potencia, y se le introduce una fuerza 795.6 N, el diámetro externo de 15.875mm, un pasod de 1.95385, un coeficiente de fricción de 0.57, un factor alfa de 30 grados y un hilo. Con esto se obtuvo como resultado un torque de subida de 26.187N Y un torque de bajada de 18.759N.

El siguiente análisis realizado para los tornillos Sin Fin fue el de pandeo. Para que esto fuera posible se consideraron los siguientes datos del tornillo:

$$\begin{aligned}
 E &= 200GPa \\
 I &= \frac{\pi}{64} * 13^4 \\
 I &= \frac{\pi}{64} * 13^4 \\
 I &= 1.40198^9 \\
 L &= 612mm
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

con estos valores se pudo aplicar la fórmula:

$$\begin{aligned}
 P_{cr} &= \frac{\pi^2 * E * I}{L^2} \\
 P_{cr} &= \frac{\pi^2 * 200 \text{GPa} * 4.9087 \times 10^{-9}}{(612 \text{mm})^2} \\
 P_{cr} &= 7388.7369 \text{N}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Con la fuerza calculada por medio de pandeo se pudo calcular el factor de seguridad de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 FS &= \frac{P_{cr}}{F_t} \\
 FS &= \frac{7388.7369 \text{N}}{795.6 \text{N}} \\
 FS &= 9.287
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Ya que el factor de seguridad es mayor a 1, se determinó que los tornillos no fallarán durante la realización de la prueba.

3.3.3 Engranés

Para diseñar los engranes se utilizó el torque de mayor valor necesario para poder girar cada tornillo sin fin. Debido a que este valor es elevado, se decidió colocar dos filas de engranes. Ya que cada tornillo sin fin cuenta con dos engranes cada uno, se determinó el siguiente valor de torque aplicado a los engranes (T_g):

$$\begin{aligned}
 \Sigma T &= 0 \\
 -T_t + 2T_g &= 0 \\
 T_g &= \frac{T_t}{2} \\
 T_g &= \frac{26.87 \text{Nm}}{2} \\
 T_g &= 13.435 \text{Nm}
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

El valor del torque del piñón se obtuvo escogiendo el motor a pasos adecuado. Este valor es de 2Nm. Con ambos valores de torque es posible calcular la relación de transferencia por medio de la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned}
 RT &= \frac{T_g}{T_p} \\
 RT &= \frac{13.435 \text{Nm}}{2 \text{Nm}} RT = 6.7175
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

La ASTM indica que la velocidad adecuada para realizar pruebas de compresión en polímeros es de 2mm/min [20]. Con esta velocidad se calcula la velocidad (en RPM) de los tornillos sin fin y por lo tanto la de sus engranes. Este cálculo se realizó de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \omega_g &= \frac{v}{l} \\ \omega_g &= \frac{2}{1.95385} \\ \omega_g &= 1.02362RPM \end{aligned} \tag{3.11}$$

Por medio de la relación de transferencia se pudo calcular la velocidad del piñón, aplicando el siguiente procedimiento:

$$\begin{aligned} \omega_p &= \omega_g * RT \\ \omega_p &= 1.02362 * 6.7175 \\ \omega_p &= 6.876167RPM \end{aligned} \tag{3.12}$$

Para diseñar los engranes se utilizó la herramienta de diseño de engranes brindada en el programa de Inventor. A este programa se le introdujeron los datos previamente calculados y se escogió como material el aluminio para obtener como resultado los valores de factor de seguridad mostrados en la tabla 3.4.

Tabla 3.4: Resultados obtenidos del diseño de engranes. [Elaboración propia utilizando Inventor]

Factor	Símbolo	Engranaje Pequeño	Engranaje Grande
Factor of Safety from Pitting	SH	1,362	1,557
Factor of Safety from Tooth Breakage	SF	31,639	50,732
Static Safety in Contact	SHst	10,249	11,962
Static Safety in Bending	SFst	66,150	103,117

Debido a que todos los FS son mayores a 1.5, los engranes se consideran adecuados para utilizar en el sistema. En la tabla 3.5 se observan los valores finales de estas piezas.

Tabla 3.5: Valores finales de los Engranes. [Elaboración propia utilizando Inventor]

	Simbolo	Piñón	Engranaje
Número de dientes	N	17	116
Diametro externo	De	42,743mm	266,25mm
Diametro de raíz	Dr	32,625mm	256,13mm
Flanco	F	35mm	35mm

3.3.4 Soporte del impulsor

El soporte del impulsor es el encargado de sostener el impulsor durante la prueba, sus medidas se obtuvieron directamente del impulsor y debido a que no es sometido a ningún esfuerzo no se realizó ningún tipo de análisis a esta pieza. Sus medidas finales se muestran en la imagen 3.7.

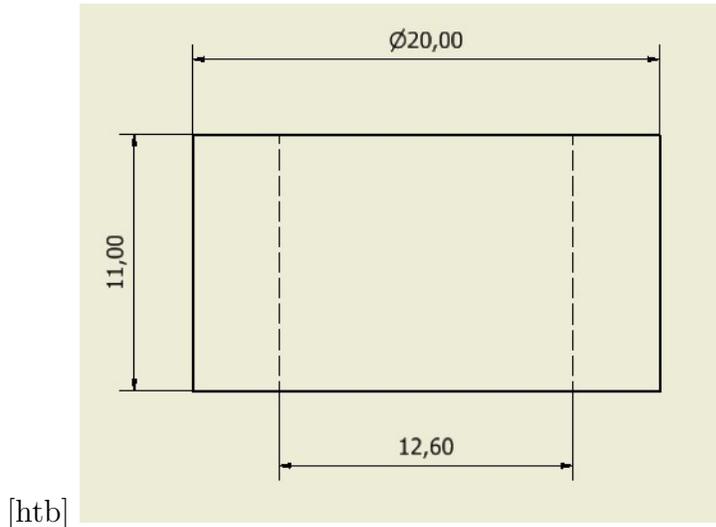


Figura 3.7: Medidas del soporte del impulsor [Elaboración propia utilizando Inventor]

3.3.5 Placa del impulsor

Se nombró como placa de impulsor a la pieza ubicada sobre las celdas de carga, que sostiene al impulsor el cual se somete a prueba. Para iniciar el diseño se definen las medidas principales de la pieza, las cuales se pueden observar en la figura 3.8

Primero se analizó el espacio del medio donde se colocaría el soporte. El área donde se coloca el impulsor tiene un valor de 124.690 mm². Por lo que el esfuerzo de compresión de esta parte se calculó de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{F}{A} \\ \sigma &= \frac{1591.2N}{124.69mm^2} \\ \sigma &= 12.76MPa\end{aligned}\quad (3.13)$$

Por otro lado, esta sección también presenta un esfuerzo cortante. Este esfuerzo se ubica en el área cortante ubicada en el anillo del soporte del impulsor, esta área se calculó de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}A &= 2 * \pi * r * h \\ A &= 2 * \pi * \frac{12.6mm}{2} * 19.05mm \\ A &= 754.0765mm^2\end{aligned}\quad (3.14)$$

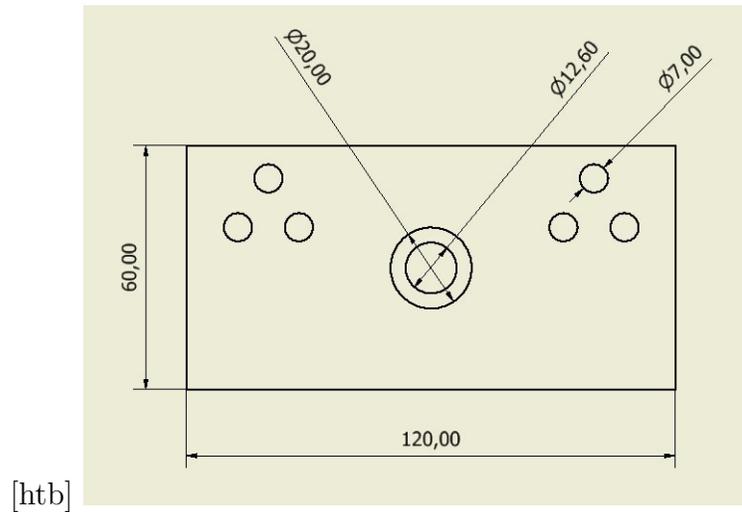


Figura 3.8: Medidas iniciales de la placa del impulsor. Cotas en mm [Elaboración propia utilizando Inventor]

Al determinar el área, se determinó el valor del esfuerzo cortante:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{F}{A} \\ \tau &= \frac{1591.2N}{754.0765mm^2} \\ \tau &= 2.110131MPa \end{aligned} \tag{3.15}$$

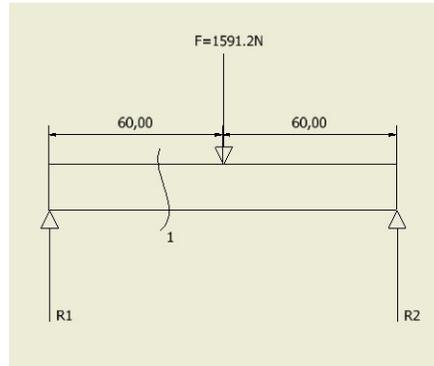
Para determinar si la placa es capaz de soportar tanto el esfuerzo de compresión como el cortante se utilizaron los teoremas de Esfuerzo Cortante Máximo y de Energía de Distorsión. Estos teoremas se aplicaron por medio de un programa realizado en Matlab. A este programa se le introdujo un valor en y de 12.76 Mpa, un esfuerzo cortante de 2.11 MPa y un esfuerzo S_y de 105 MPa. Con estos valores se obtienen FS de 7.8126 y 7.9107, al ser ambos mayores a 1 se determina que la pieza no va a fallar por estos esfuerzos.

Por último, se realizó un análisis de deflexión, en ambas caras de la placa. Para la primera cara se realizó el diagrama de cuerpo libre mostrado en la imagen 3.9. Para este DCL se aplicó un análisis estático para determinar las reacciones R_1 y R_2 . Este análisis se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \Sigma F &= 0 \\ -F + R_1 + R_2 &= 0 \end{aligned} \tag{3.16}$$

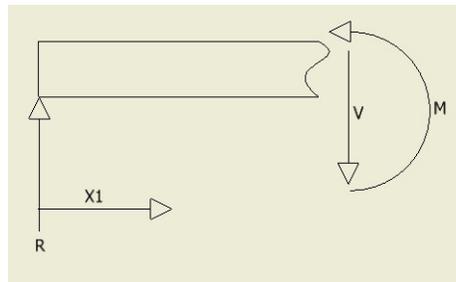
ya que existe simetría $R_1=R_2=R$, por lo que se tiene:

$$\begin{aligned}
 F &= 2R \\
 R &= \frac{F}{2} \\
 R &= \frac{1591.2N}{2} \\
 R &= 795.6N
 \end{aligned}
 \tag{3.17}$$



[htb]

Figura 3.9: DCL visto de frente de la placa del impulsor (cotas en mm). [Elaboración propia utilizando Invetor]



[htb]

Figura 3.10: Corte 1 de la placa del impulsor para el análisis de deflexión (cotas en mm). [Elaboración propia utilizando Invetor]

En la imagen 3.9 también se marca el lugar donde se realizó el corte para aplicar el análisis por deflexión. Este corte se observa en la imagen 3.10 y se utilizó para calcular la función del momento con respecto “X”. Esta ecuación se determinó por medio de estática de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 \Sigma M &= 0 \\
 M - R * X1 &= 0 \\
 M &= R * X1 \\
 M &= 795.6X1
 \end{aligned}
 \tag{3.18}$$

Al determinar esta ecuación se aplicaron las fórmulas de deflexión de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 EI \frac{d^2V}{dX1^2} &= M(X1) \\
 EI \frac{d^2V}{dX1^2} &= 795.6X1
 \end{aligned}
 \tag{3.19}$$

$$\begin{aligned} \int EI \frac{d^2V}{dX1^2} &= \int M(X1) \\ EI \frac{dV}{dX1} &= 795.6 \frac{X1^2}{2} + C1 \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} \int EI \frac{dV}{dx} &= \int (795.6 \frac{X1^2}{2} + C1) \\ EIV &= 795.6 \frac{X1^3}{6} + C1 * X1 + C2 \end{aligned} \quad (3.21)$$

Del material escogido se tiene como dato que E=69GPa, además el valor del momento de inercia (I) se estimó por medio de la fórmula:

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{12} b * h^3 \\ I &= \frac{1}{12} (60mm) * (19.05mm)^3 \\ I &= 3.4566x10^{-8}m^4 \end{aligned} \quad (3.22)$$

Con los valores de las constantes E e I se procede a determinar las constantes C1 y C2. Esto fue posible por medio de las condiciones de frontera. La primer condición de frontera se da en X1=0, donde V=0. Con estos valores determinó C2 introduciendo los valores en la ecuación 3.3.5. El valor de C2 se obtuvo de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} EIV &= 795.6 \frac{X1^3}{6} + C1 * X1 + C2 \\ 0 &= 795.6 \frac{0}{6} + C1 * 0 + C2 \\ C2 &= 0 \end{aligned} \quad (3.23)$$

La segunda condición de frontera se estimó sabiendo que en X1=60mm la pendiente es 0. Con estos valores fue posible determinar C1 por medio de la ecuación 3.3.5, de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} EI \frac{dV}{dX1} &= 795.6 \frac{X1^2}{2} + C1 \\ 71GPa * 3.4566x10^{-8}m^4 * 0 &= 795.6 \frac{(60mm)^2}{2} + C1 \\ C1 &= -1.43208 \end{aligned} \quad (3.24)$$

Con todas las constantes calculadas se determinó la fórmula de la deflexión. De esta forma fue factible calcular la deflexión en X1=60mm. Esto se efectuó de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} EIV &= 795.6 \frac{X1^3}{6} - 1.43208 * X1 \\ 71GPa * 3.4566x10^{-8}m^4 * V &= 795.6 \frac{(60mm)^3}{6} - 1.43208 * 60mm \\ V &= (795.6 \frac{(60mm)^3}{6} - 1.43208 * 60mm) / (71GPa * 3.4566x10^{-8}m^4) \\ V &= 0.02334mm \downarrow \end{aligned} \quad (3.25)$$

El valor de deflexión resultante es menor a 0.5mm por lo que se considera despreciable para las dimensiones del sistema.

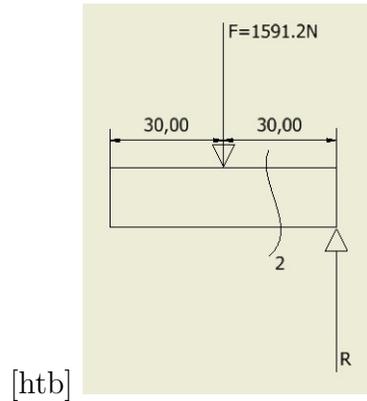


Figura 3.11: DCL visto del lado de la placa del impulsor (cotas en mm). [Elaboración propia utilizando Invetor]

El segundo análisis de deflexión realizado se planteó en la otra cara de la pieza. El DCL de esta pieza se muestra en la imagen 3.11, donde el valor de R es el mismo calculado previamente por medio del análisis estático, realizado en 3.3.5. En la imagen 3.11 también se observa el lugar donde se aplicó el corte 2 para realizar el análisis de deflexión. Este corte se puede observar en la imagen 3.12.

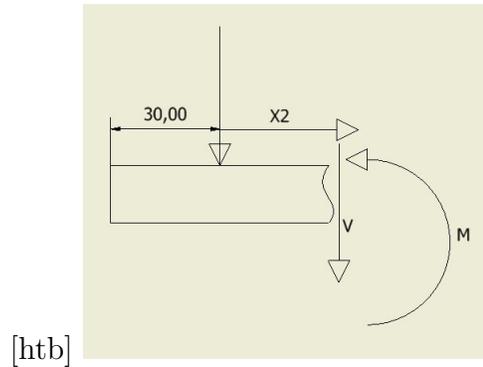


Figura 3.12: Corte 2 de la placa del impulsor para el análisis de deflexión (cotas en mm). [Elaboración propia utilizando Invetor]

El corte 2 se utilizó para determinar la función del momento con respecto “X2”. Lo cual se hizo por medio de un análisis estático mostrado a continuación:

$$\begin{aligned}
 \Sigma M &= 0 \\
 M + F * X2 &= 0 \\
 M &= -F * X2 \\
 M &= -1591X2
 \end{aligned}
 \tag{3.26}$$

Al determinar esta ecuación se aplicó las fórmulas de deflexión de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} EI \frac{d^2V}{dX1^2} &= M(X1) \\ EI \frac{d^2V}{dX1^2} &= -1591.2X2 \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} \int EI \frac{d^2V}{dX1^2} &= \int M(X1) \\ EI \frac{dV}{dX1} &= -1591.2 \frac{X2^2}{2} + C3 \end{aligned} \quad (3.28)$$

$$\begin{aligned} \int EI \frac{dV}{dx} &= \int (-1591.2 \frac{X2^2}{2} + C3) \\ EIV &= -1591.2 \frac{X2^3}{6} + C3 * X2 + C4 \end{aligned} \quad (3.29)$$

Del material escogido se tiene como dato que E=71GPa, además el valor del momento de inercia (I) se estimó por medio de la fórmula:

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{12} b * h^3 \\ I &= \frac{1}{12} (120mm) * (19.05mm)^3 \\ I &= 6.9133x10^{-8}m^4 \end{aligned} \quad (3.30)$$

Con los valores de las constantes E e I fue posible determinar las constantes C3 y C4 resultantes de las integrales. Esto fue factible por medio de las condiciones de frontera. La primer condición de frontera se da en X2=30mm, donde la pendiente es 0. Con estos valores se determinó C3 introduciendo los valores en la ecuación 3.3.5. El valor de C3 se obtuvo de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} EI \frac{dV}{dX1} &= -1591.2 \frac{X2^2}{2} + C3 \\ EI * 0 &= -1591.2 \frac{(30mm)^2}{2} + C3 \\ C3 &= 0.71604 \end{aligned} \quad (3.31)$$

La segunda condición de frontera se calculó sabiendo que en X2=30mm, V=0. Con estos valores se determina C4 por medio de la ecuación 3.3.5, de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} EIV &= -1591.2 \frac{X2^3}{6} + 0.71604 * X2 + C4 \\ EI * 0 &= -1591.2 \frac{(30mm)^3}{6} + 0.71604 * X2 + C4 \\ C4 &= -0.01432 \end{aligned} \quad (3.32)$$

Con todas las constantes calculadas se obtuvo la fórmula de la deflexión. De esta forma fue posible determinar la deflexión en X2=0. Esto se llevó a cabo de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} 71GPa * 6.9133x10^{-8}m^4 * V &= -1591.2 \frac{(X2)^3}{6} + 0.71604 * X2 - 0.01432 \\ 71GPa * 6.9133x10^{-8}m^4 * V &= -1591.2 \frac{(0)^3}{6} + 0.71604 * 0 - 0.01432 \\ V &= 0.002917mm \downarrow \end{aligned} \quad (3.33)$$

Debido a que este resultado es menor a 0.5mm se considera como un valor despreciable considerando la magnitud del sistema.

3.3.6 Placa de Soporte

La pieza conocida como “placa de soporte” es la encargada en sostener las celdas de carga. Su tamaño es definido por el tren de engranes, mientras que el agujero del medio es definido por la placa del impulsor. Sus medidas se observan en la imagen 3.13.

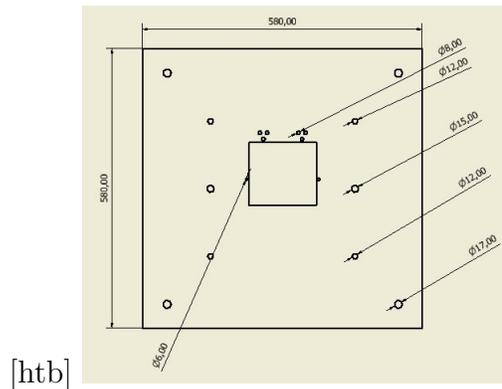


Figura 3.13: Medidas principales de la placa de soporte (cotas en mm). [Elaboración propia utilizando Invetor]

Para determinar si esta pieza es capaz de soportar los esfuerzos a los que es sometida se realizó un análisis por el método de deflexión. Lo primero en llevarse a cabo fue un análisis estático de la pieza, para lo que se planteó el DCL mostrado en la imagen 3.14. Por medio del DCL fue posible determinar los valores de las reacciones generadas por los soportes de la pieza. Las reacciones se calcularon de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\Sigma F &= 0 \\ -2F + R1 + R2 + R3 + R4 &= 0\end{aligned}\tag{3.34}$$

ya que existe simetría $R1=R2=R3=R4=R$, por lo que se tiene:

$$\begin{aligned}\Sigma F &= 0 \\ -2F + 4R &= 0 \\ R &= \frac{2F}{4} \\ R &= \frac{2*795.6N}{4} \\ R &= 397.8N\end{aligned}\tag{3.35}$$

Con los valores de las reacciones determinadas se procedió a aplicar el análisis por deflexión. Este análisis se empleó únicamente a la cara con valores más críticos, ya que son los que muestran una mayor deformación. El DCL de este caso se muestra en la imagen 3.15, donde además se identifican los lugares donde se realizaron los cortes 1 y 2.

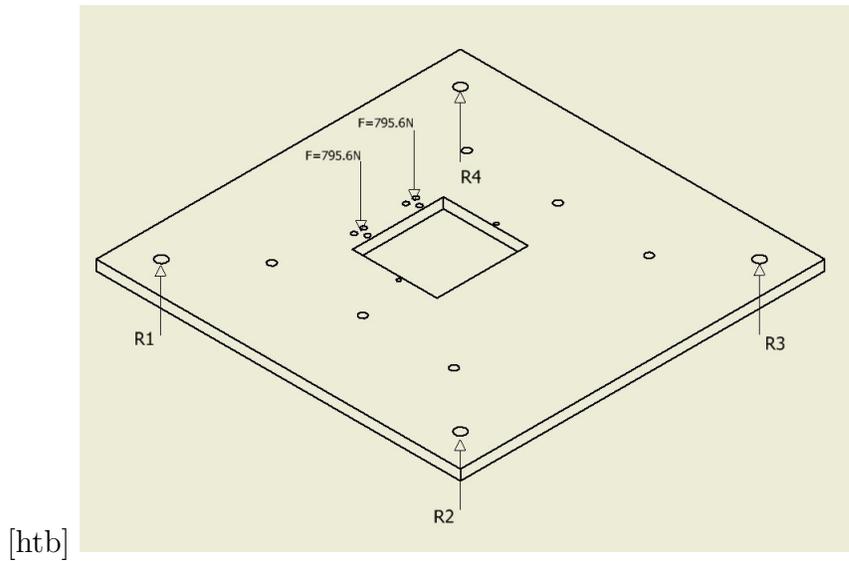


Figura 3.14: Diagrama Cuerpo Libre de la placa de soporte. [Elaboración propia utilizando Inventor]

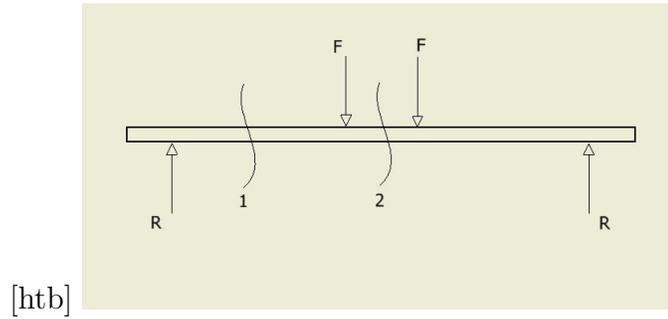


Figura 3.15: Diagrama Cuerpo Libre del caso 1 de la placa de soporte. [Elaboración propia utilizando Inventor]

Para el corte 1 se definió como $E=69\text{GPa}$. Además, el valor del momento de inercia se calculó por medio de la fórmula:

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{1}{12}b * h^3 \\
 I &= \frac{1}{12}(184\text{mm}) * (19.05\text{mm})^3 \\
 I &= 106.004x10^{-9}\text{m}^4
 \end{aligned}
 \tag{3.36}$$

Para definir la función $M(X1)$ se planteó el DCL mostrado en la imagen 3.16

Al realizar el análisis de momentos en el corte 1 se obtuvo la siguiente función:

$$\begin{aligned}
 \Sigma M &= 0 \\
 M - R * X1 &= 0 \\
 M &= R * X1 \\
 M &= 397.8X1
 \end{aligned}
 \tag{3.37}$$

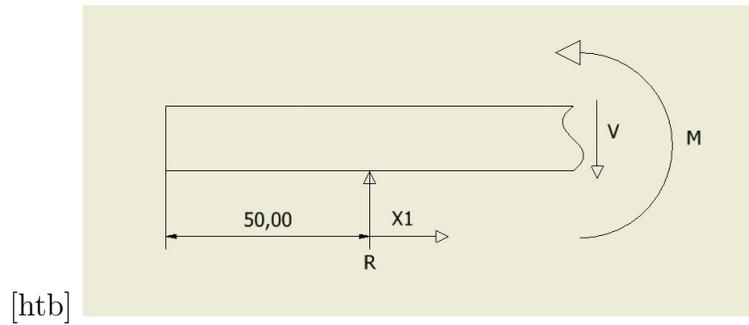


Figura 3.16: Corte 1 de la placa de soporte para el análisis de deflexión. [Elaboración propia utilizando Invetor]

Al determinar $M(X1)$ se aplicó las fórmulas de deflexión de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} EI \frac{d^2V}{dX1^2} &= M(X1) \\ EI \frac{d^2V}{dX1^2} &= 397.8X1 \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} \int EI \frac{d^2V}{dX1^2} &= \int M(X1) \\ EI \frac{dV}{dX1} &= 397.8 \frac{X1^2}{2} + C1 \end{aligned} \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} \int EI \frac{dV}{dx} &= \int (795.6 \frac{X1^2}{2} + C1) \\ EIV &= 397.8 \frac{X1^3}{6} + C1 * X1 + C2 \end{aligned} \quad (3.40)$$

Para poder definir las constantes $C1$ y $C2$ fue necesario plantear el corte 2. Este corte se puede observar en la imagen 3.17.

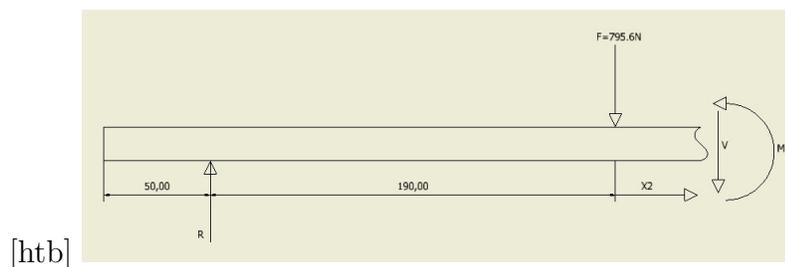


Figura 3.17: Corte 2 de la placa de soporte para el análisis de deflexión. [Elaboración propia utilizando Invetor]

Al realizar el análisis de momentos en el corte 2 se obtuvo la función $M(X2)$, lo cual se muestra a continuación:

$$\begin{aligned}\Sigma M &= 0 \\ M + 795.6X2 - R(190mm + X2) &= 0 \\ M &= R(190mm + X2) - 795.6X2 \\ M &= 75.582 - 397.8X2\end{aligned}\tag{3.41}$$

Al determinar $M(X2)$ se pudo aplicar las fórmulas de deflexión de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}EI \frac{d^2V}{dX2^2} &= M(X) \\ EI \frac{d^2V}{dX2^2} &= 75.582 - 397.8X2\end{aligned}\tag{3.42}$$

$$\begin{aligned}\int EI \frac{d^2V}{dX2^2} &= \int M(X2) \\ EI \frac{dV}{dX1} &= 75.582X2 - 397.8\frac{X2^2}{2} + C3\end{aligned}\tag{3.43}$$

$$\begin{aligned}\int EI \frac{dV}{dx} &= \int (75.582X2 - 397.8\frac{X2^2}{2}) \\ EIV &= 75.582\frac{X2^2}{2} - 397.8\frac{X2^3}{6} + C3X2 + C4\end{aligned}\tag{3.44}$$

Para definir las constantes se plantearon distintas condiciones de frontera. La primera condición de frontera se aplicó a la ecuación 3.3.6, con lo que se tiene:

$$\begin{aligned}EnX1 &= 0, V = 0 \\ EIV &= 397.8\frac{X1^3}{6} + C1 * X1 + C2 \\ EI * 0 &= 397.8\frac{0^3}{6} + C1 * 0 + C2 \\ C2 &= 0\end{aligned}\tag{3.45}$$

La siguiente condición de frontera se aplicó a la ecuación 3.3.6. Para esta ecuación se planteó la siguiente condición de frontera:

$$\begin{aligned}EnX2 &= 40mm, \frac{dV}{dX2} = 0 \\ EI \frac{dV}{dX2} &= 75.582X2 - 397.8\frac{X2^2}{2} + C3 \\ EI * 0 &= 75.582(40mm) - 397.8\frac{(40mm)^2}{2} + C3 \\ C3 &= -2.70504\end{aligned}\tag{3.46}$$

Al obtener las constantes por medio de 3.3.6 y 3.3.6 se obtuvo el valor de la pendiente para seguir aplicando condiciones de frontera. Esto se logró aplicando el siguiente análisis a la ecuación 3.3.6:

$$\begin{aligned}
EnX2 &= 0 \\
EI \frac{dV}{dX2} &= 75.582X2 - 397.8 \frac{X2^2}{2} - 2.70504 \\
\frac{dV}{dX2} &= (75.582(0) - 397.8 \frac{(0)^2}{2} - 2.70504)EI \\
\frac{dV}{dX2} &= (0 - 0 - 2.70504)7526.27 \\
\frac{dV}{dX2} &= -0.3601x10^{-3}
\end{aligned} \tag{3.47}$$

Con este valor calculado se determinó la constante C1, utilizando la ecuación 3.3.6, aplicando la siguiente condición de frontera:

$$\begin{aligned}
EnX1 &= 190mm, \frac{dV}{dX1} = -0.3601x10^{-3} \\
EI \frac{dV}{dX1} &= 397.8 \frac{X1^2}{2} + C1 \\
EI * -0.3601x10^{-3} &= 397.8 \frac{(190mm)^2}{2} + C1 \\
C1 &= -9.8908
\end{aligned} \tag{3.48}$$

Con el valor de C1 calculado se definió el valor de la deflexión, utilizando la ecuación 3.3.6 de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
EnX2 &= 190mm \\
EIV &= 397.8 \frac{X1^3}{6} - 9.8908 * X1 \\
V &= (397.8 \frac{X1^3}{6} - 9.8908 * X1) / EI \\
V &= (397.8 \frac{(190mm)^3}{6} - 9.8908 * 190mm) / 7526.27 \\
V &= 0.1893mm \downarrow
\end{aligned} \tag{3.49}$$

Con el valor de V en X2=190mm fue posible aplicar la última condición de frontera. Esto se llevó a cabo en la ecuación 3.3.6, de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
EnX2 &= 0, V = -0.1893mm \\
EIV &= 75.582 \frac{X2^2}{2} - 397.8 \frac{X2^3}{6} - 2.70504X2 + C4 \\
EI * -0.1893mm &= 75.582 \frac{0^2}{2} - 397.8 \frac{0^3}{6} - 2.70504 * 0 + C4 \\
7526.27 * -0.1893mm &= C4 \\
C4 &= -1.4245
\end{aligned} \tag{3.50}$$

Con todas las constantes calculadas se determinó la deflexión en el punto más crítico de la pieza. Este punto es el central, por lo que se utilizó la ecuación 3.3.6 de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
EnX2 &= 40mm \\
EIV &= 75.582 \frac{X2^2}{2} - 397.8 \frac{X2^3}{6} - 2.70504X2 - 1.4245 \\
V &= (75.582 \frac{X2^2}{2} - 397.8 \frac{X2^3}{6} - 2.70504X2 - 1.4245) / EI \\
V &= (75.582 \frac{(40mm)^2}{2} - 397.8 \frac{(40mm)^3}{6} - 2.70504 * 40mm - 1.4245) / 7526.27 \\
V &= 0.1962mm \downarrow
\end{aligned} \tag{3.51}$$

Ya que el valor en el punto más crítico es menor a 0.5mm se considera despreciable con respecto a la magnitud de todo el sistema. Por este motivo se determinó que el diseño de la pieza a implementar en acero T6-6061 es viable.

3.3.7 Placa Movable

La pieza conocida como “Placa Movable” es la encargada en sostener y mover la cabeza en forma vertical. Esta placa debe estar unida a las tuercas de los tornillos sin fin. Sus dimensiones iniciales se muestran en la figura 3.18.

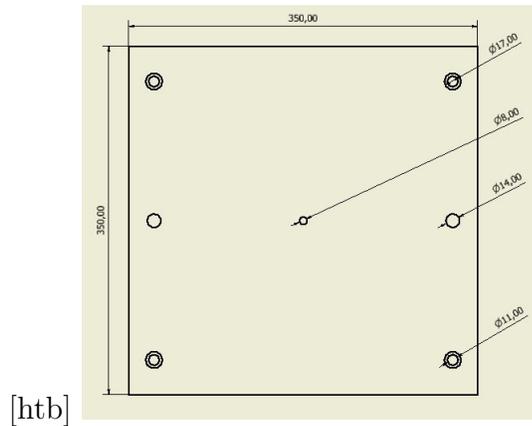


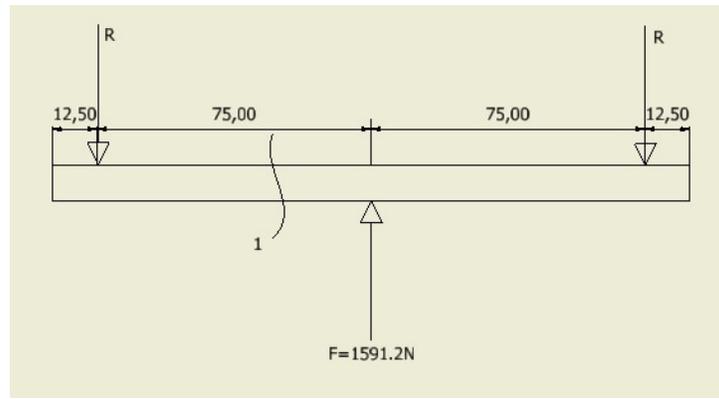
Figura 3.18: Medidas iniciales de la placa movable. [Elaboración propia utilizando Invetor]

Lo primero que se realizó con esta placa es un análisis estático. Para este análisis se planteó el DCL mostrado en la figura 3.19. En este DCL se observa que existe simetría, por lo que las dos reacciones tienen el mismo valor. Para determinar el valor de las reacciones se planteó la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 \Sigma F &= 0 \\
 -2R + F &= 0 \\
 R &= \frac{F}{2} \\
 R &= 795.6N
 \end{aligned}
 \tag{3.52}$$

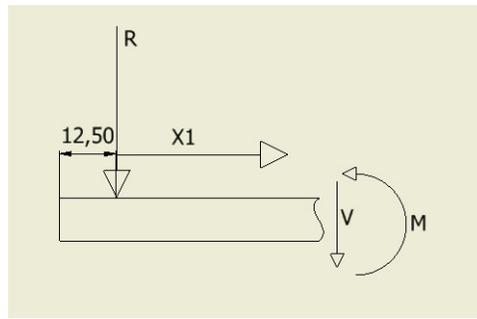
De igual forma, en la figura 3.19 se observa donde se realizó el corte 1. Este corte se utilizó para poder determinar la deflexión en el punto más crítico de la pieza, el cual es en el centro. El corte 1 se observa en la imagen 3.20.

Al aplicar un análisis estático al corte 1 se obtuvo la función $M(X1)$. Esto se logró planteando la siguiente ecuación:



[htb]

Figura 3.19: Medidas iniciales de la placa móvil (Cotas en mm). [Elaboración propia utilizando Invetor]



[htb]

Figura 3.20: Corte 1 de la placa móvil. [Elaboración propia utilizando Invetor]

$$\begin{aligned}
 \Sigma M &= 0 \\
 M + RX_1 &= 0 \\
 M &= -RX_1 \\
 M &= -795,6X_1
 \end{aligned}
 \tag{3.53}$$

Al determinar \$M(X_1)\$ se aplicó las fórmulas de deflexión de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 EI \frac{d^2V}{dX_1^2} &= M(X_1) \\
 EI \frac{d^2V}{dX_1^2} &= -795,6X_1
 \end{aligned}
 \tag{3.54}$$

$$\begin{aligned}
 \int EI \frac{d^2V}{dX_1^2} &= \int M(X_1) \\
 EI \frac{dV}{dX_1} &= -795,6 \frac{X_1^2}{2} + C_1
 \end{aligned}
 \tag{3.55}$$

$$\begin{aligned}
 \int EI \frac{dV}{dX_1} &= \int (-795,6 \frac{X_1^2}{2} + C_1) \\
 EIV &= -795,6 \frac{X_1^3}{6} + C_1X_1 + C_2
 \end{aligned}
 \tag{3.56}$$

Para poder realizar los cálculos de las constantes C1 y C2, se definieron los valores de E y de I de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 E &= 71GPa \\
 I &= \frac{1}{12} * b * h^3 \\
 I &= \frac{1}{12} * 350mm * (31.75mm)^3 \\
 I &= 933.5079x10^(-9)m^4
 \end{aligned}
 \tag{3.57}$$

Con los valores de E e I fue posible plantear las condiciones de frontera necesarias para calcular C1 y C2. La primera condición de frontera se aplicó a la ecuación 3.3.7, donde en X1=0, V=0. Con esto se obtiene:

$$\begin{aligned}
 EIV &= -795.6\frac{X1^3}{6} + C1X1 + C2 \\
 EI * 0 &= -795.6\frac{0^3}{6} + C1 * 0 + C2 \\
 C2 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{3.58}$$

La segunda condición de frontera se planteó para la ecuación 3.3.7, donde para X1=150mm la pendiente va a ser cero. Con esto se obtuvo:

$$\begin{aligned}
 EI \frac{dV}{dX1} &= -795.6\frac{X1^2}{2} + C1 \\
 EI * 0 &= -795.6\frac{(150mm)^2}{2} + C1 \\
 C1 &= 8.9505
 \end{aligned}
 \tag{3.59}$$

Con las constantes C1 y C2 calculadas, fue posible determinar la deflexión en el punto más crítico. Esto se logró utilizando la ecuación 3.3.7 de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 X1 &= 150mm \\
 EIV &= -795.6\frac{X1^3}{6} + 8.9505X1 \\
 V &= (-795.6\frac{X1^3}{6} + 8.9505X1)/EI \\
 V &= (-795.6\frac{(150mm)^3}{6} + 8.9505 * 150mm)/66279.0593 \\
 V &= 0.0135mm \uparrow
 \end{aligned}
 \tag{3.60}$$

Debido a que la deflexión calculada es menor a 0.5mm se considera que el material y el diseño de la placa son los correctos.

3.3.8 Árbol

El árbol es el encargado de transmitir el movimiento del motor a los dos engranajes pequeños, se une al motor por medio de un acople disponible de forma comercial y se sostiene de forma vertical por medio de un cojinete. Además, se le diseñó una ranura

para unir los engranajes por medio de un prisionero. Las medidas principales del árbol se pueden observar en la figura 3.21.

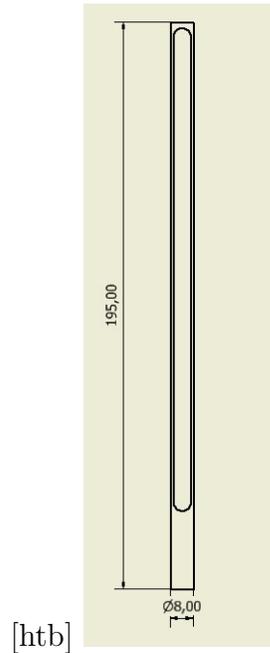


Figura 3.21: Medidas principales del árbol (cotas en mm). [Elaboración propia utilizando Inventor]

Debido a que esta pieza es sometida a distintos esfuerzos se planteó utilizar acero AISI-1020, ya que es económico y resistente. El primer análisis que se le aplicó a esta pieza es el de pandeo. Para aplicarlo se utilizaron los siguientes valores:

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{\pi}{64}d^4 \\
 I &= \frac{\pi}{64}(8mm)^4 \\
 I &= 2.0106 \times 10^{-10} m^4 \\
 E &= 205 GPa \\
 L &= 195 mm
 \end{aligned} \tag{3.61}$$

Al definir los datos fue posible aplicar la fórmula de pandeo de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 P_{cr} &= \frac{\pi^2 EI}{L^2} \\
 P_{cr} &= \frac{\pi^2 205 GPa * 2.0106 \times 10^{-10} m^4}{(195 mm)^2} \\
 P_{cr} &= 10.698 kN
 \end{aligned} \tag{3.62}$$

Debido a que el valor de P_{cr} es mayor a 1591.2N se concluye que no va a existir pandeo.

El siguiente análisis que se le aplicó a esta pieza es el de esfuerzos. Para aplicar este análisis es necesario conocer los siguientes datos de la pieza y del material:

$$\begin{aligned}
 T &= 8Nm \\
 d &= 8mm \\
 S_y &= 294.8MPa
 \end{aligned}
 \tag{3.63}$$

Con estos datos se calculó el FS del eje de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 \tau &= \frac{16T}{\pi d^3} \\
 \tau &= \frac{16 \cdot 8}{\pi \cdot (8mm)^3} \\
 \tau &= 79.58MPa
 \end{aligned}
 \tag{3.64}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \sqrt{3} * \tau \\
 \sigma &= \sqrt{3} * 79.58MPa \\
 \sigma &= 137.83MPa
 \end{aligned}
 \tag{3.65}$$

$$\begin{aligned}
 FS &= \frac{S_y}{\sigma} \\
 FS &= \frac{294.8MPa}{137.83MPa} \\
 FS &= 2.1387
 \end{aligned}
 \tag{3.66}$$

Ya que el factor de seguridad es mayor a 1, el árbol no fallará al ser sometido a los esfuerzos del sistema.

3.3.9 Soporte del cojinete

El soporte del cojinete es el encargado de unir el cojinete del eje del motor al resto del sistema. Sus medidas se obtuvieron del cojinete disponible comercialmente y las medidas de la placa de soporte. Su diseño se realizó utilizando la lámina de aluminio de 3/4 de pulgada. Las medidas de esta pieza se pueden observar en la figura 3.22.

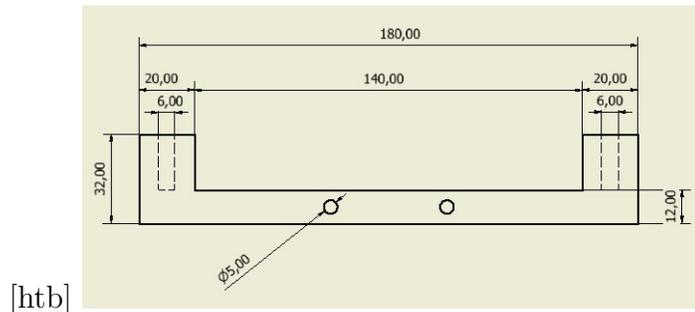


Figura 3.22: Medidas principales del soporte del cojinete (cotas en mm). [Elaboración propia utilizando Invetor]

3.3.10 Guías

Las piezas conocidas como “Guías” son las encargadas de mantener la placa movable horizontal durante la prueba. Estas piezas no soportan ningún tipo de esfuerzo, por lo que no se les aplicó ningún análisis en específico. Las dimensiones principales de las guías se observan en la imagen 3.23.

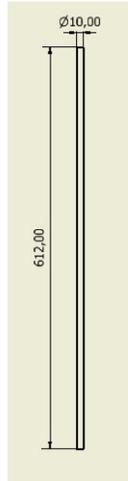


Figura 3.23: Medidas principales de las guías (cotas en mm). [Elaboración propia utilizando Inventor]

3.3.11 Base

La Base es la placa inferior del sistema, encargada de mantener las demás piezas en lugar. Para la implementación de esta pieza se propone una placa de aluminio MIC6, de 3/4 de pulgadas de grosor. Debido a que esta pieza no experimenta ningún esfuerzo provocado por el sistema no se le aplica ningún análisis de diseño.

3.3.12 Tapa

La parte conocida como “Tapa” es la placa superior del sistema. Esta pieza no deberá soportar ningún tipo de esfuerzo, por lo que no se le aplicará ningún análisis en específico. Las medidas principales de la tapa se observan en la figura 3.25.

3.3.13 Soporte Mayor

Las piezas conocidas como “Soporte Mayor” serán las encargadas de unir y dar soporte a todo el sistema. En total se cuenta con cuatro soportes mayores, uno en cada esquina. Las medidas principales de esta pieza se observan en la figura 3.26. Debido a que estas

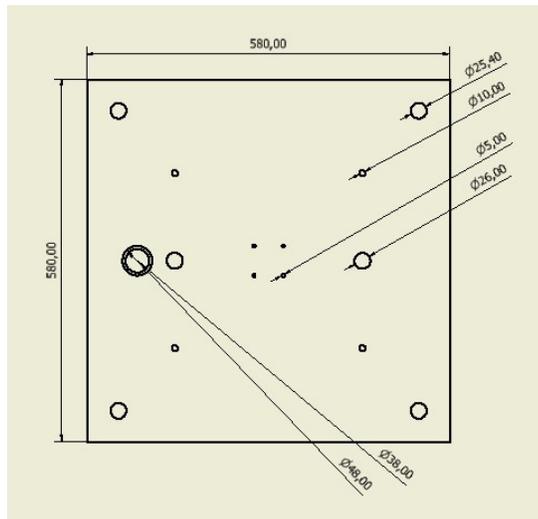
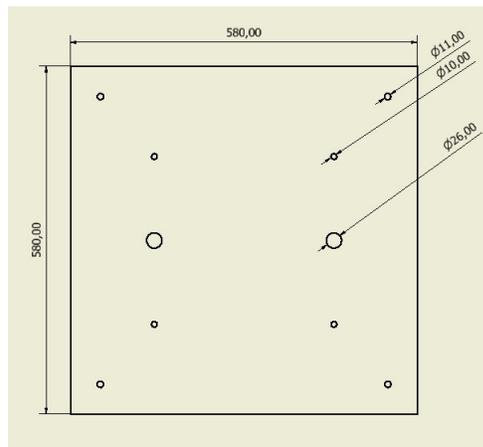


Figura 3.24: Medidas principales dela base (cotas en mm). [Elaboración propia utilizando Inveter]



[htb]

Figura 3.25: Medidas principales de la tapa (cotas en mm). [Elaboración propia utilizando Inveter]

piezas son las que soportan todo el esfuerzo del sistema se diseñan en barras de acero AISI-1020 de una pulgada de diámetro.

Para definir si las columnas son capaces de resistir el esfuerzo al que son sometidas se realizó un análisis de pandeo. Para este análisis fue necesario conocer los siguientes valores:

$$\begin{aligned}
 E &= 205GPa \\
 I &= \frac{\pi}{64}d^4 = \frac{\pi}{64}(25.4mm)^4 \\
 I &= 2.04317 \times 10^{-8}m^4 \\
 L &= 352mm
 \end{aligned}
 \tag{3.67}$$

Con estos datos definidos se procedió a calcular la fuerza máxima que resiste la columna antes de empezar a pandearse. Esto se realizó aplicando la fórmula:

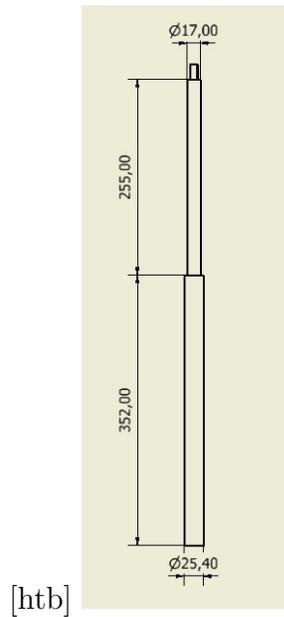


Figura 3.26: Medidas iniciales de los soportes mayores. [Elaboración propia utilizando Inventor]

$$\begin{aligned}
 P_{cr} &= \frac{\pi^2 * E * I}{L^2} \\
 P_{cr} &= \frac{\pi^2 * 205 \text{ GPa} * 2.04317 \times 10^{-8}}{(352 \text{ mm})^2} \\
 P_{cr} &= 33.36 \times 10^9 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{3.68}$$

Ya que el valor de P_{cr} es mayor a 1591N se sabe que no existirá pandeo en esta sección del soporte mayor. Por último se aplicó el análisis de pandeo suponiendo que todo el soporte cuenta con diámetro de 17mm. Si no existe pandeo con este diámetro, el soporte será capaz de soportar los esfuerzos. Para realizar esto se definieron los siguientes valores:

$$\begin{aligned}
 E &= 205 \text{ GPa} \\
 I &= \frac{\pi}{64} d^4 = \frac{\pi}{64} (17 \text{ mm})^4 \\
 I &= 4.0998 \times 10^{-9} \text{ m}^4 \\
 L &= 607 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{3.69}$$

Con estos datos definidos se prosiguió a calcular la fuerza máxima que resiste el soporte antes de empezar a pandearse. Esto se efectuó aplicando la fórmula:

$$\begin{aligned}
 P_{cr} &= \frac{\pi^2 * E * I}{L^2} \\
 P_{cr} &= \frac{\pi^2 * 205 \text{ GPa} * 4.0998 \times 10^{-9}}{(607 \text{ mm})^2} \\
 P_{cr} &= 22513.28 \text{ N}
 \end{aligned} \tag{3.70}$$

Para terminar el análisis se determinó el FS del soporte mayor. Esto se realizó utilizando la fuerza de 1591.2N de valor de carga, con lo que se aplicó la fórmula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}FS &= \frac{Fu}{Fc} \\FS &= \frac{22513.28}{1591.2} \\FS &= 14.15\end{aligned}\tag{3.71}$$

Ya que el valor del FS es mayor a 2, los soportes mayores no se pandearán al ser sometidos a la fuerza máxima. Por lo que el diseño y el material seleccionado se consideran apropiados.

3.3.14 Piezas estándar

Las piezas estándar son todas aquellas que se pueden adquirir de forma comercial, sin necesidad de maquinarlas. El sistema cuenta con un total de 12 piezas estándar, las cuales se mencionan a continuación:

- Cojinete. El cojinete brinda soporte y mantiene en su lugar al eje del motor. Debido al diámetro del eje del motor se seleccionó el cojinete P08, que posee un diámetro interno de 8mm.
- Acople motor. El acople del motor es el encargado de unir el eje de 9.5mm del motor con el árbol. Esta pieza corresponde a un acople flexible de aluminio 8mm de diámetro interno.
- Tornillos y tuercas del Cojinete. El cojinete seleccionado cuenta con dos agujeros de 5mm de diámetro para ser sujetado por medio de tornillos. Por este motivo se escogieron dos tornillos 5x30 con dos tuercas de MM5x0.8.
- Tornillos del soporte del cojinete. Para unir el soporte de cojinete a la placa de soporte es necesario utilizar dos tornillos que se rosquen a dicha pieza.
- Tornillo y tuercas de la cabeza. La cabeza se une por medio de un tornillo y cuatro tuercas a la pieza movable. Debido a las dimensiones de la cabeza se escogió un tornillo de 1/4 x 4" y cuatro tuercas de 1/4.
- Tuercas del tornillo Sin Fin. Para unir la placa movable a los dos tornillos sin fin se utilizan cuatro tuercas. Las tuercas son de 5/8 de pulgada de acero galvanizado.
- Tornillos y tuercas de las celdas de carga. Las celdas de carga necesitan 6 tornillos 6x50 cada una para poder unirlos al sistema, además se necesitan sus respectivas tuercas de M6x1.0.
- Tornillos y tuercas del motor. El motor cuenta con cuatro agujeros de 5mm de diámetro. Para poder unirlos con el sistema se seleccionaron cuatro tornillos de 3/16 x 53.10 con sus respectivas tuercas.
- Tuercas de la tapa. Para mantener la tapa unida al resto del sistema se le realizó una rosca a la parte superior de los soportes principales. Para esto se aplica una rosca M10.
- Prisioneros de los engranajes. Los prisioneros se utilizan para mantener los engranes

unidos a los tornillos sin fin y al árbol del motor.

- Roles lineales. Los roles lineales son los encargados de garantizar el movimiento uniforme de la placa movable. Para esto se seleccionaron cuatro roles KH 1026 PP 10x1.
- Roles axiales. Los roles axiales son los que permiten el movimiento libre de los tornillos sin fin, para lo que se seleccionaron cuatro roles axiales marca craft de diámetro interno 10mm.

3.4 Diseño e implementación de la parte eléctrica

3.4.1 Controlador

Para la elección del controlador se propusieron cuatro opciones diferentes, el Arduino Uno, la Teensy 3.2, la Rapberry y el Romeo V2. Para realizar la selección del controlador primero se plantearon los requerimientos de la tabla 3.6 y se identificó las características principales de cada uno en la tabla 3.7.

Tabla 3.6: Requerimientos del procesador. [Elaboración Propia]

Número	Requerimiento	Importancia
1	La frecuencia del CPU debe ser alta para poder obtener la mayor cantidad de datos posibles y ejecutar las instrucciones	3
2	Se debe tener disponible como mínimo 7 entradas digitales	4
3	Se debe tener como mínimo 2 pines de interrupción	4
4	Debe poder conseguirse en el país para agilizar los trámites de compra	1
5	El costo debe ser accesible para el laboratorio de investigación	5
6	Debe contar con un tamaño reducido para su implementación	3

Con las características claras de cada uno de los procesadores se utilizó la métrica de la tabla 3.1 para calificar cada uno de los procesadores, comparándolos con los requerimientos previamente definidos. Donde 5 se considera muy bueno, 4 bueno, 3 regular, 2 malo, 1 muy malo y 0 se utiliza cuando el parámetro no se cumple.

Como se observa en la tabla 3.8 los parámetros evaluados para cada uno de los procesadores son la frecuencia del CPU, la cantidad de entradas, la cantidad de pines de interrupción, la disponibilidad en el país, el costo y el tamaño. Al realizar la evaluación

Tabla 3.7: Comparación de los procesadores. [Elaboración Propia]

Característica	Arduino	Raspberry	Romeo V2	Teensy 3.2
Voltaje funcionamiento	5V	5V	5V	5V
Frecuencia del CPU	16 MHz	700MHz	16 MHz	72 MHz
Entradas Analógicas	6	NA	12	21
Pines de interrupción	2	26	2	34
Vin	7-12V	5V	7-12V	3.3-5V
Tamaño (mm)	75x55x15	86x54x17	89x84x14	17.8x36.3x4.6
Digital I/O	14	8	14	34
Costo	\$27.95	\$67.95	\$42.50	\$25.83

Tabla 3.8: Elección del procesador. [Elaboración Propia]

Parámetro a evaluar	Arduino	Raspberry	Romeo V2	Teensy 3.2
Frecuencia del CPU	3	5	3	4
Cantidad de entradas	3	3	4	5
Pines de interrupción	3	4	3	5
Disponibilidad en el país	4	4	0	0
Costo	4	1	3	4
Tamaño	4	2	2	5
Total	21	19	15	23

de cada uno de los procesadores se obtiene que la teensy 3.2 es la mejor opción a utilizar en este proyecto.

3.4.2 Motor

Para poder escoger el motor que se va a utilizar es necesario tener en cuenta una serie de consideraciones. La primera es que el motor debe girar a 360° , ya que su movimiento rotacional debe transformarse en movimiento lineal sin ninguna limitación. La segunda característica que debe cumplir el motor es controlar con precisión la magnitud de su movimiento rotacional, ya que de esto depende la magnitud del movimiento lineal que se va a realizar. La tercer consideración que se debe tener es que la magnitud del movimiento rotacional debe ser sumamente pequeña. Por último, el motor debe poseer un torque lo suficientemente alto para poder aplicar la fuerza necesaria para deformar los álabes. Estos requerimientos se observan en la tabla 3.9.

La selección del motor se realiza comparando tres tipos diferentes de modelos con los

Tabla 3.9: Requerimientos del motor. [Elaboración Propia]

Número	Requerimiento	Importancia
1	El motor debe girar a 360°	5
2	Se debe controlar con precisión la magnitud de su movimiento rotacional	3
3	Se debe controlar con precisión la posición	4
4	El motor debe poseer un torque lo suficientemente alto para aplicar la fuerza necesaria para deformar los álabes	5
5	Debe conseguirse en el país para agilizar los trámites de compra	1
6	El costo debe ser accesible para el laboratorio de investigación	5

requerimientos planteados previamente. Estos modelos corresponden a un motor DC, un motor a pasos y un servomotor, y se observan en la tabla 3.10. Para realizar la comparación de estos motores se compara el capacidad de giro, la magnitud mínima de movimiento rotacional, el control del movimiento rotacional con precisión, el torque máximo y el precio. En ninguno de los precios mostrados en la tabla se incluye costo de envío en caso de que este sea necesario.

Tabla 3.10: Comparación de distintos motores. [Elaboración Propia]

Característica	Motor DC	Motor a pasos	Servomotor
Modelo	PN01007-38	23HS45-4204	TD8320MG
Giro	360°	360°	270°
Magnitud mínima de movimiento rotacional	N/A	1.8°	N/A
Control del movimiento rotacional con precisión	No	Sí	Sí
Torque (Nm)	11.5	3	2.2
Tienda	Amazon	Amazon	Amazon
Precio	\$64	\$33	\$17.99

Una vez comparadas las características de los distintos motores se utilizan seis parámetros de evaluación, para poder realizar la elección final. Estos parámetros son capacidad de girar a 360°, magnitud mínima de rotación adecuada, control del movimiento de rotación con precisión, torque máximo aceptable, disponibilidad en el país y precio. En la tabla

3.11 se realiza la elección del motor utilizando la métrica mostrada en la tabla 3.1.

Tabla 3.11: Elección del motor. [Elaboración Propia]

Métrica a ser evaluada	Motor DC	Motor a pasos	Servomotor
Giro 360°	5	5	0
Magnitud mínima de rotación	3	4	3
Control del movimiento de rotación con precisión	0	5	4
Torque máximo aceptable	5	3	2
Disponibilidad en el país	0	0	0
Precio	2	3	4
Total	15	20	13

Como se observa en la tabla 3.11 el motor con la mayor puntuación es el motor a pasos. Esto se debe a que cuenta con la capacidad de girar 360° y la magnitud de su movimiento rotacional se puede controlar con precisión. Además, el ángulo de cada paso es de 1.8°, el cual es aceptable para la implementación de la prueba. Por último, el torque que posee este motor es suficiente para aplicar la fuerza lineal necesaria para deformar los álabes del impulsor.

Para poder implementar el motor a pasos correctamente es necesario utilizar un driver para poder controlar el movimiento. Para esto se selecciona el driver TB6600, el cual funciona entre 9 y 40 voltios a 4 amperios. Utilizando este driver se puede realizar la conexión con el motor mostrada en la imagen 3.27.

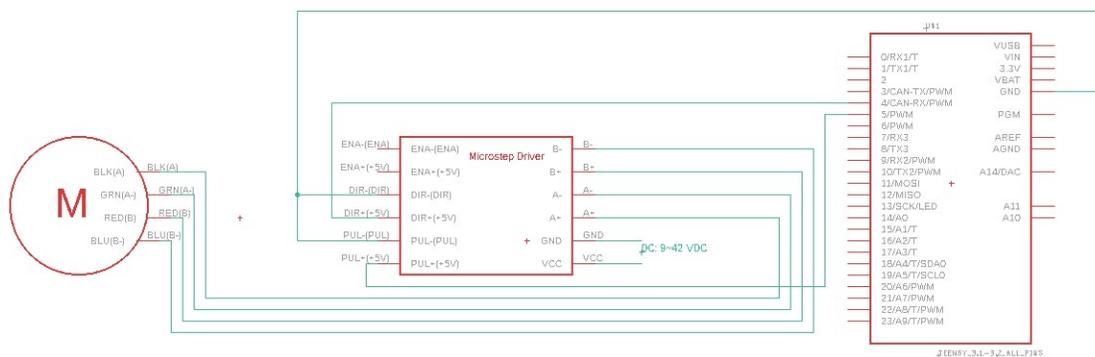


Figura 3.27: Diagrama eléctrico del motor a pasos [Elaboración propia utilizando Eagle]

3.4.3 Sensores de fuerza

Para obtener el diagrama de esfuerzo vs deformación unitaria es necesario medir la fuerza que se aplica sobre los álabes del impulsor. Para lograr esto es imprescindible utilizar sensores de fuerza con la sensibilidad suficiente para medir cambios pequeños en la fuerza, pero que sean capaces de medir hasta 1591,2 N.

Se proponen tres sensores, conocidos como celdas de carga, para utilizar en el diseño; los de 50 kg en placa, los de 50 kg en barra y los de 100 kg en barra. Estos sensores se encuentran en la tabla 3.12, donde se comparan las distintas características de cada uno. Además, en la tabla 3.13 se pueden observar los requerimientos planteados para las celdas de carga.

Tabla 3.12: Comparación de las celdas de carga. [Elaboración Propia]

Característica	Load Sensor50 kg (Placa) (1)	Celda de Carga 50kg (Barra) (2)	Liukouu 100kg Parallel Beam Electronic Load Cell Scale Weighting Sensor High Precision (3)
Proveedor	Micro JPM	Amazon	Amazon
Precio	\$5,1	\$13,99*	\$12,29*
Cantidad necesaria	4	4	2
Sub Total	\$20,4	\$55,96*	\$24,58*
Capacidad	40,50kg	50kg	100kg
Sensibilidad	1,0+-0,1 mV/V	2.0+-0.15 mV/V	2.0+-0.2mv/v
Voltaje de excitación	10	10-15	-

* No incluye el precio del envío

La elección de las celdas de carga se realiza aplicando la métrica de la tabla 3.1 a distintos parámetros relevantes y comparándolos con los requerimientos. Estos parámetros son facilidad de implementación, rango de medición, sensibilidad, precio, disponibilidad en el país e información disponible. La comparación de estos parámetros se realiza en la tabla 3.14, donde el sensor 1, sensor 2 y sensor 3 corresponden respectivamente al Load Sensor 50 kg (placa), a la celda de carga 50 kg (barra) y al sensor Liukouu 100kg Parallel Beam Electronic Load Cell Scale Weighting Sensor High Precision.

Como se observa en la tabla 3.14 el sensor 3, Liukouu 100kg Parallel Beam Electronic Load Cell Scale Weighting Sensor High Precision, es el sensor más adecuado para el diseño planteado. Se puede adaptar fácilmente al diseño mecánico, cuenta con una sensibilidad apropiada para la elaboración del gráfico de esfuerzo vs deformación, su costo es accesible

Tabla 3.13: Requerimientos de las celdas de carga. [Elaboración Propia]

Número	Requerimiento	Importancia
1	Adaptarse fácilmente a la parte mecánica del diseño	3
2	Debe tener un rango de medición suficientemente amplio para poder realizar las mediciones del sistema	5
3	Debe contar con una sensibilidad alta	4
4	El costo debe ser accesible para el laboratorio de investigación	5
5	Debe conseguirse en el país para agilizar los trámites de compra	1

Tabla 3.14: Elección de la celda de carga. [Elaboración Propia]

Métrica a ser evaluada	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
Facilidad de implementación	1	3	5
Rango de medición	0	4	4
Sensibilidad	4	4	3
Disponibilidad en el país	5	0	0
Información disponible	4	5	4
Precio	5	2	4
Total	19	18	20

y es capaz de medir la fuerza máxima necesaria.

Para la implementación de este sensor se va a utilizar el módulo HX711 de sparkfun [21] que permite leer fácilmente los valores dados por las celdas de carga. Además, al utilizar este módulo se disminuye el ruido que un circuito adicional produciría.

Para la implementación de este sensor se va a utilizar el módulo HX711 de SparkFun [21], el cual se observa en la figura 3.28. Este módulo permite leer fácilmente los valores dados por las celdas de carga y permite que la conexión se haga de una forma sencilla. Además, al utilizar este módulo se disminuye el ruido que un circuito adicional produciría.

Debido al valor tan alto de la fuerza final teórica de deformación es necesario utilizar dos celdas de carga para que la fuerza aplicada se reparta entre las dos equitativamente. Al conectar las celdas de carga en paralelo es posible sumar los valores dados por ambas. La conexión de esta sección se muestra en la figura 3.29.

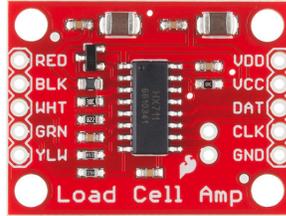


Figura 3.28: Módulo HX711 de Sparkfun. [7]

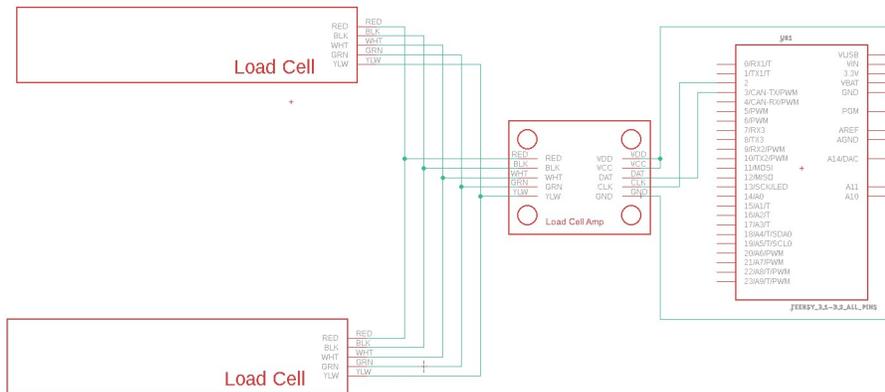


Figura 3.29: Diagrama eléctrico de las celdas de carga. [Elaboración propia utilizando Eagle]

3.4.4 Sensor de desplazamiento

El cálculo de la deformación unitaria se realiza por medio del desplazamiento lineal de la deformación. Por lo que es necesario cuantificar la trayectoria de la placa movable, lo cual se logra implementando un sensor capaz de detectar movimientos de un milímetro o menos.

Para la implementación de este sistema se contempló utilizar un sensor ultrasónico o un sensor infrarrojo de distancia. Sin embargo, la resolución de estos sensores era de aproximadamente 3 mm, por lo que no se cumplía con el requerimiento planteado. Para cumplir con dicho requerimiento era necesario utilizar sensores más precisos, por lo que el costo se elevaba considerablemente.

Como alternativa, se escogió un encoder rotativo óptico. El encoder es económico, se puede conseguir en el país y cumple con el requerimiento de desplazamiento planteado. Además, es posible integrarlo al sistema por medio de dos engranes rectos con una relación de uno a uno.

Para implementar el encoder se realizó el diagrama eléctrico mostrado en la figura 3.30. Como se muestra, la fase A y B se conectan a los pines 6 y 7 de la teensy respectivamente, ya que estos pines tienen la capacidad de utilizar interrupciones. Además, se coloca una resistencia de $10k\Omega$ a cada una de las fases como pull-up, para que la interrupción del

programa funcione correctamente. Por último, la hoja de datos del encoder (Anexo C) indica que la tensión de alimentación puede estar entre 5 y 24 V.

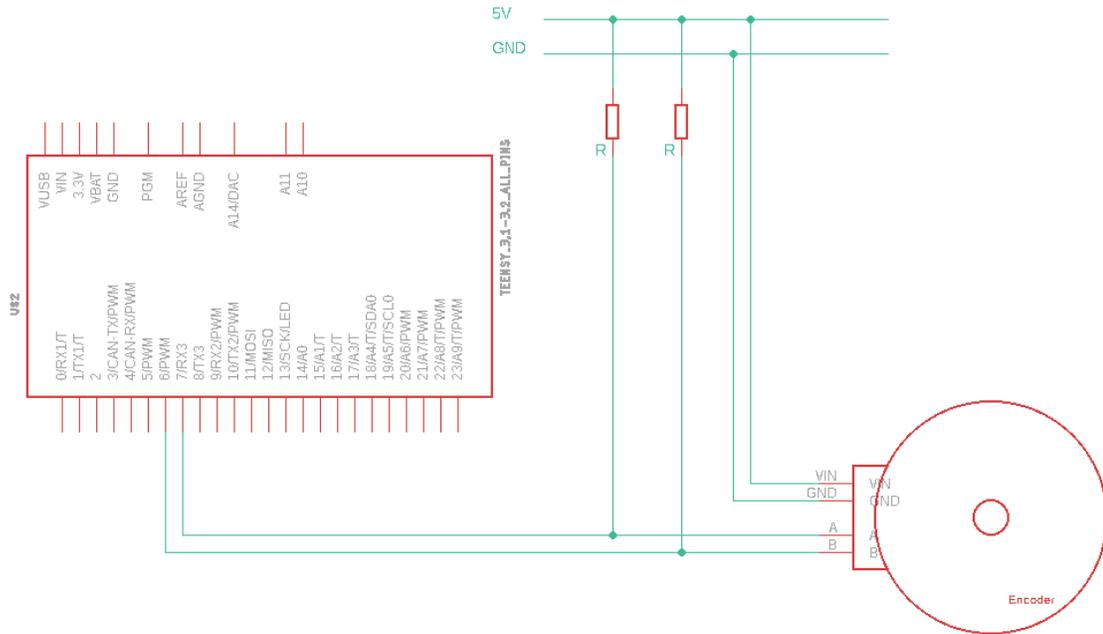


Figura 3.30: Diagrama eléctrico del Encoder. [Elaboración propia utilizando Eagle]

3.5 Diseño e implementación de la parte programada

3.5.1 Programación del motor

El motor se controla mediante un programa que lo activa al dar inicio a la prueba. Se inicia el movimiento del motor controlando cada paso para asegurar que la prueba se haga a la velocidad apropiada. Se continúan produciendo los pasos del motor hasta que la fuerza medida por las celdas de carga sea mayor o igual a la fuerza máxima de deformación, el desplazamiento sea mayor a 1 cm (el largo total del álabe) o se detenga la prueba manualmente. La lógica del código para controlar el motor se observa en el diagrama de flujo en la figura 3.31.

3.5.2 Programación de las celdas de carga

La lectura de las celdas de carga se realiza por medio de la biblioteca del módulo HX711, la cual solo necesita un factor de calibración. El factor de calibración se puede encontrar colocando un peso conocido en el sistema de medida. La lógica del código de las celdas de carga se observa en el diagrama de flujo mostrado en la figura 3.32.



Figura 3.31: Diagrama de flujo para controlar el motor [Elaboración propia]

3.5.3 Programación del codificador

La información que el controlador obtiene del encoder son dos señales cuadradas, las cuales se producen cuando el encoder gira hacia un lado o hacia el otro. Por este motivo, el código del encoder funciona por medio de interrupciones que se activan cuando la señal cambia de estado. Dependiendo del tipo de cambio, el contador de pasos aumenta o disminuye, para conocer la posición del encoder. La lógica del código se observa en la imagen 3.33.



Figura 3.32: Diagrama de flujo para controlar las celdas de carga [Elaboración propia]

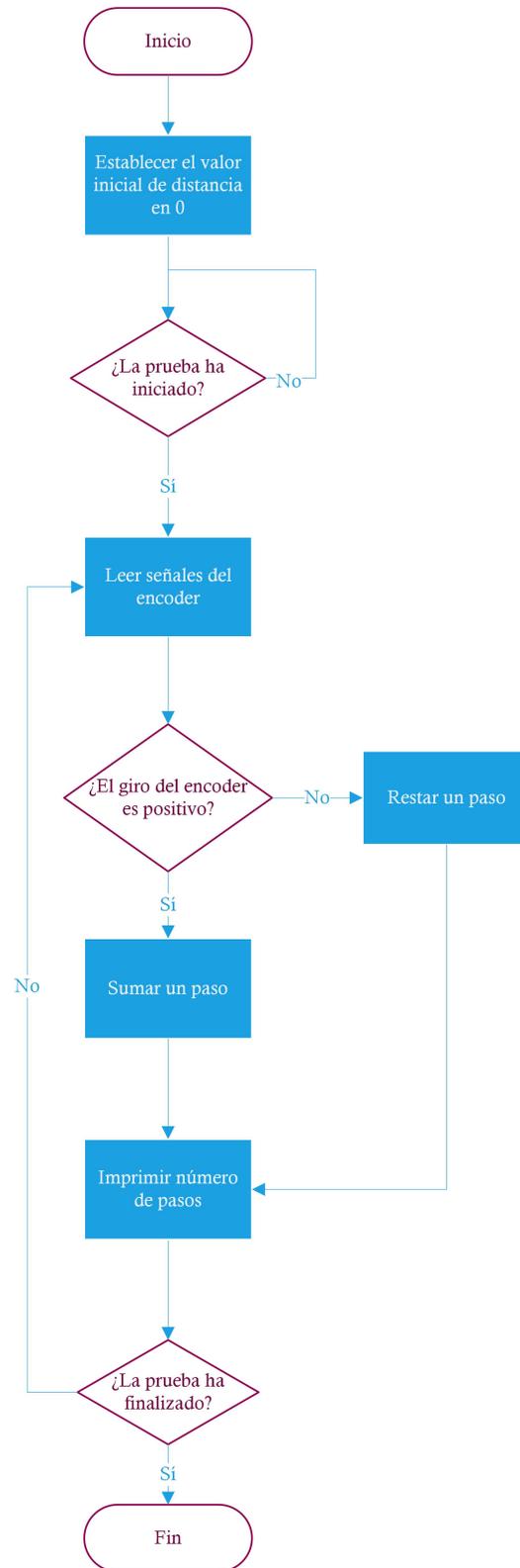


Figura 3.33: Diagrama de flujo para controlar el codificador [Elaboración propia utilizando visio]

Capítulo 4

Resultados y análisis

4.1 Diseño Mecánico

Como diseño mecánico se obtiene un sistema capaz de mover una placa, por medio dos tornillos sinfin, con la fuerza suficiente para deformar los alábés del impulsor. El análisis individual de cada pieza demuestra que ninguna de las piezas se deformará antes de que los álabes lo hagan, lo cuál permite realizar la prueba de esfuerzos de compresión completa. El ensamble final del sistema se muestra en la figura 4.1. De igual forma, las cuatro columnas principales cuentan con una rosca en el extremo superior, lo que permite desarmar sencillamente todo el sistema para brindar cualquier mantenimieto que sea necesario a las distintas partes que lo conforman.

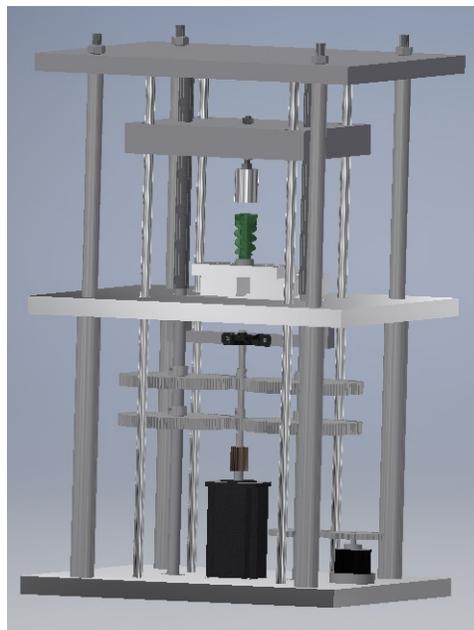


Figura 4.1: Diseño final mecánico. [Elaboración propia utilizando Invector]

4.2 Diseño eléctrico

El diseño eléctrico está conformado por un microcontrolador Teensy 3.2, el cual se programó utilizando el IDE de Arduino. Este microcontrolador se encarga de ejecutar las órdenes de las celdas de carga, el motor a pasos y el encoder consecutivamente. Además se cuenta con un push button, utilizado para dar inicio a la prueba. Debido a los rangos de funcionamiento del motor a pasos, las celdas de carga y el encoder, el circuito se alimenta a 10V.

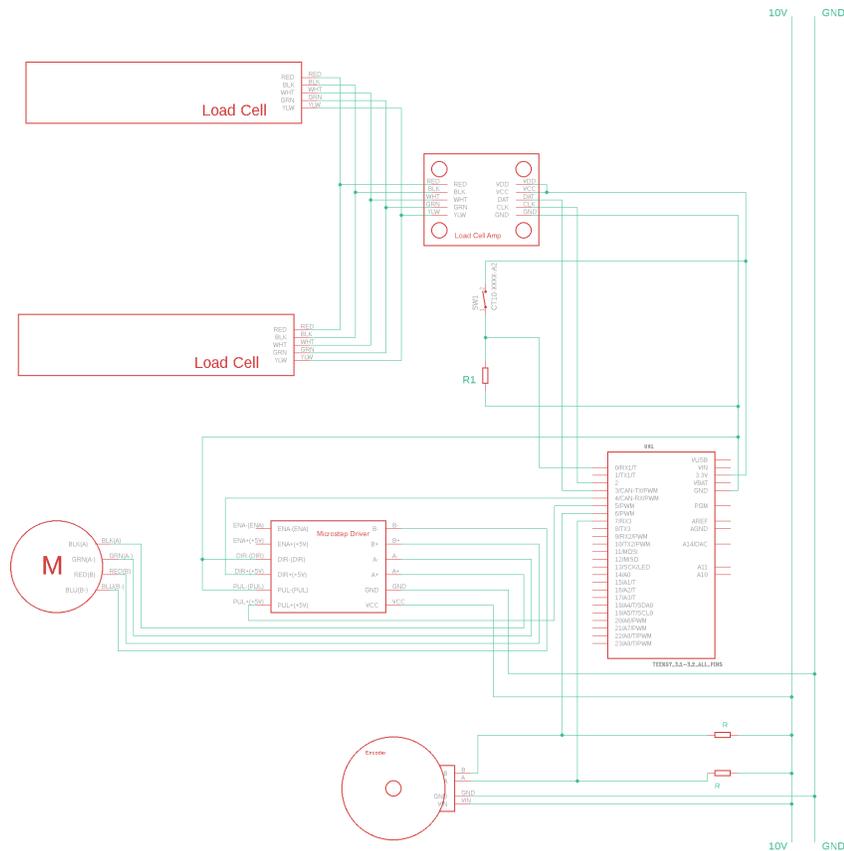


Figura 4.2: Diseño final eléctrico. [Elaboración propia utilizando Eagle]

4.3 Programación

El programa final se realiza uniendo los códigos de las celdas de carga, el encoder y el motor. El programa inicia al oprimir el push button que se encuentra en el sistema eléctrico. Después se da un paso del motor a pasos, se lee la señal dada por las celdas de carga y el encoder. Este proceso se realiza hasta que se alcance la fuerza máxima del sistema o se haya alcanzado el desplazamiento máximo del sistema, si alguna de estas dos cosas sucede la prueba finaliza. En la imagen 4.3 se puede observar el diagrama de flujo del código final.

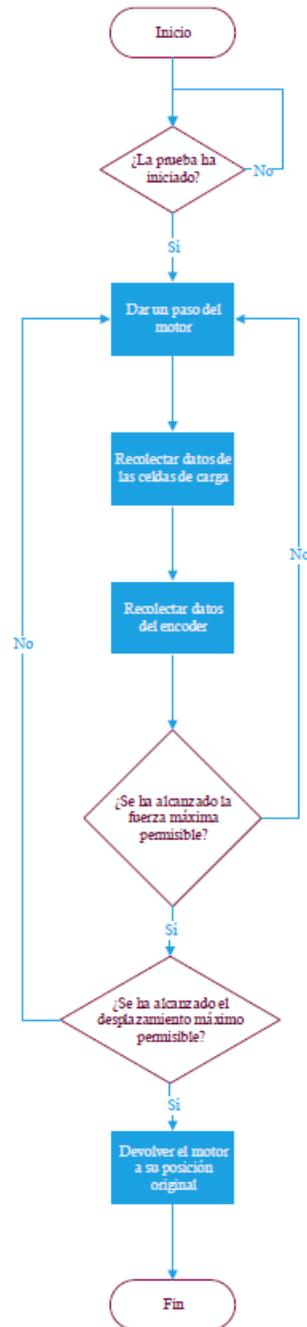


Figura 4.3: Diagrama de flujo del código final. [Elaboración propia utilizando Visio]

4.4 Prueba de concepto de las Celdas de Carga

Por medio de las celdas de carga se obtienen las fuerzas aplicadas a los álabes del impulsor, por lo que es necesario comprobar que los valores dados son correctos. Para corroborar esto se procedió a realizar 16 mediciones de distintos objetos, primero con una pesa comercial y después con las celdas de carga.

Para determinar la cantidad de mediciones que se iban a realizar se aplicó la fórmula de

población infinita o muestreo simple al azar con reemplazo, la cual se puede observar en la ecuación 4.4. A esta fórmula se le aplicaron los siguientes datos:

-Para una confiabilidad del 90%, $Z=1.645$

-Probabilidad de éxito, $P=0.5$

-Probabilidad de fracaso, $Q=0.5$

-Error de muestreo, $d=20\%$

$$n = \left(\frac{Z_{\alpha/2} \sqrt{PQ}}{d} \right)^2 \quad (4.1)$$

Tabla 4.1: Mediciones tomadas con las celdas de carga. [Elaboración Propia]

Número de muestra	Pesa comercial ($\pm 0.001\text{kg}$)	Celdas de carga ($\pm 0.03\text{kg}$)
1	1.008	1.004
2	0.960	0.954
3	1.353	1.345
4	1.832	1.826
5	1.425	1.417
6	0.394	0.391
7	0.661	0.658
8	0.223	0.222
9	0.730	0.727
10	0.497	0.495
11	0.629	0.626
12	1.034	1.027
13	1.126	1.121
14	1.519	1.513
15	0.130	0.128
16	1.641	1.636

Al comparar los resultado de las mediciones que se muestran en la tabla 4.1, se observa que el porcentaje de error entre las celdas de carga y la pesa comercial es menor al 1% en promedio. Por este motivo, el valor de fuerza dado por las celdas de carga es adecuado para llevar a cabo la prueba.

4.5 Prueba de concepto del encoder

Para verificar el comportamiento del encoder se utilizó una regla de metal, la cual se analizó como una viga con dos apoyos. Al realizar esto, es posible calcular la deflexión máxima de la regla al aplicarle una fuerza específica. Luego se procedió a implementar la configuración planteada en el prototipo para obtener un valor práctico de deflexión.

En la imagen 4.4 se puede observar la configuración de la regla de metal para realizar el análisis de deflexión. Para realizar la prueba se utilizó una fuerza de 5 kg y dos puntos de apoyo.

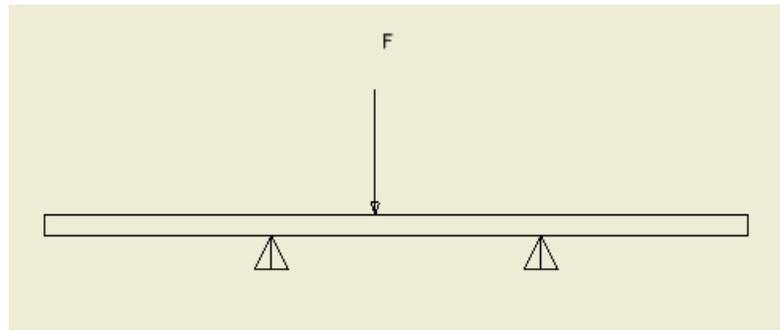


Figura 4.4: Configuración de la regla como viga [Elaboración propia utilizando Inventor]

Para aplica el análisis del método de deflexión se utilizaron los datos mostrados a continuación:

- $A=9.00 \text{ mm}^2$
- $I=0.270 \text{ mm}^4$
- $E=190 \text{ GPa}$

Al plantear el diagrama de cuerpo libre, mostrado en la figura 4.5, se pueden obtener los diagramas de cortante y momento. A partir de estos diagramas se pueden aplicar las ecuaciones 4.5, 4.5 y 4.5, con lo cual se obtuvo la deflexión máxima de 5.1mm.

$$EI \frac{d^2V}{X^2} = M(X) \quad (4.2)$$

$$EI \frac{dV}{X} = M(X) \quad (4.3)$$

$$EIV = M(X) \quad (4.4)$$

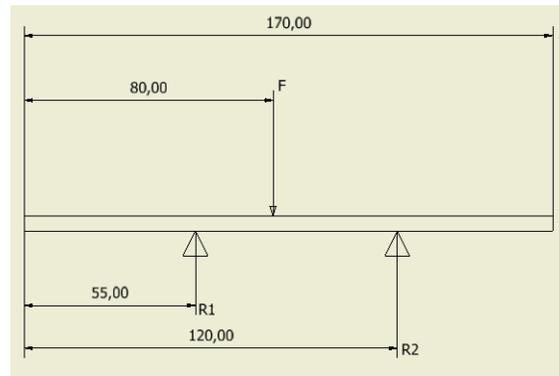


Figura 4.5: Diagrama cuerpo libre de la viga [Elaboración propia utilizando Inventor]

Al realizar el experimento en el prototipo con la regla de metal, se logran obtener los datos mostrados en la tabla 4.2. Como se puede observar en dicha tabla el porcentaje de error en todos los casos fue menor al 5%, por lo que se considera posible obtener el desplazamiento correcto por medio del prototipo.

Tabla 4.2: Resultados de la implementación de la regla como viga. [Elaboración Propia]

Número de muestra	Valor Experimental (mm)	Porcentaje de error
1	4.93	3.33
2	4.90	3.92
3	4.95	2.94
4	4.87	4.51
5	4.93	3.33
6	4.96	2.73
7	4.91	3.73
8	4.91	3.73
9	4.97	2.55
10	4.93	3.33
11	4.95	2.94
12	4.89	4.12
13	4.91	3.73
14	4.90	3.92
15	4.92	3.53
16	4.94	3.14

4.6 Análisis económico

Para realizar el análisis económico primero se definió el costo de la implementación del prototipo. Esto se hizo por medio de la tabla 4.3. En donde se observan los distintos componentes que conforman la elaboración del prototipo, así como la cantidad necesaria de cada uno de los componentes, una aproximación del costo unitario y el costo total por componente. Sumando el costo total por componente se obtiene el costo total de implementación, el cual es de \$17960.

Tabla 4.3: Costos de la implementación del prototipo. [Elaboración Propia]

Parte	Cantidad	Costo unitario (en dólares)	Costo total (en dólares)
Láminas acrílico	2	100	200
Servicio corte láser	1	60	60
Servicio impresión 3D	1	50	50
Rol lineal	4	5	21
Cojinetes	5	5	25
Tornillos de potencia	2	11	22
Tubo E.M.T 1/4	1	5	5
Tubo E.M.T 1/2	1	5	5
Celdas de carga	2	20	40
Motor a pasos	1	40	40
Enoder	1	26	26
Barras acero inoxidable	5	7	36
Driver TB6600	1	20	20
Teensy 3.2	1	26	26
Servicios profesionales	12	800	9600
Servicios básicos	12	350	4200
Licencias	1	2085	2085
Herramientas y consumibles	1	300	300
Imprevistos	12	100	1200
Total			17960

Asimismo, se determinó el costo que tendría la implementación del diseño propuesto. En este caso se considera el costo de los materiales duraderos y la manufactura de estos. Como

se observa en la tabla 4.4, el costo total de la fabricación del diseño sería aproximadamente de \$19760.

Tabla 4.4: Costos para realizar el diseño propuesto. [Elaboración Propia]

Parte	Cantidad	Costo unitario (en dólares)	Costo total (en dólares)
Láminas 3/4"	3	150	450
Láminas 1"	1	50	50
Rol lineal	4	5.3	21.2
Cojinetes	5	4.9	24.5
Tornillos de potencia	2	10.85	21.7
Barra acero 1020 1"	4	100	400
Engranaje grande	4	80	320
Engranaje pequeño	2	50	100
Celdas de carga	2	20	40
Motor a pasos	1	39.99	39.99
Encoder	1	25.95	25.95
Barras 8 mm	5	7.1	35.5
Driver TB6600	1	19.95	19.95
Teensy 3.2	1	25.83	25.83
Servicios Profesionales	12	800	9600
Licencias	1	2085	2085
Herramientas y consumibles	1	300	300
Imprevistos	12	100	1200
Manufactura	1	800	800
Total			19760

Por último, ambos costos se compararon contra el precio de una máquina comercial con características similares. Sin embargo, la comparación se limita a los costos, ya que la máquina comercial cuenta con una eficiencia mayor a la del diseño planteado. La cotización de la máquina comercial se obtuvo por medio de la empresa Metalinspec y se encuentra en el anexo A. El costo total de esta máquina es de \$86750,00, el cual incluye la máquina, las mordazas, las celdas de carga, instalación, calibración, entrenamiento, flete y empaque. En cuanto al prototipo se tiene que representa una disminución del costo en un 79%, contra el costo de la máquina comercial; y en cuanto al diseño planteado, se tendría un ahorro del 77% con respecto a la máquina comercial. Por medio de estos porcentajes se determina que la implementación del diseño es una solución viable y económica para el

laboratorio de investigación.

4.7 Prototipo

Para demostrar el funcionamiento del diseño planteado, se implementó un prototipo físico integral, el cual se puede observar en la imagen 4.6. Este prototipo se manufacturó utilizando materiales más económicos, como el acrílico maquinado con corte láser. Al utilizar materiales económicos fue posible comprobar el funcionamiento de todas las partes del diseño sin tener que realizar una gran inversión económica. De igual forma, por medio del prototipo fue posible identificar oportunidades de mejora del diseño, las cuales se pueden aplicar cuando se implemente el diseño en materiales más duraderos.

Debido a que los materiales económicos presentan una limitante en los esfuerzos que pueden soportar, la fuerza máxima que puede soportar el prototipo es de 440N o 45kgf. Este valor se calculó por medio de pruebas prácticas.

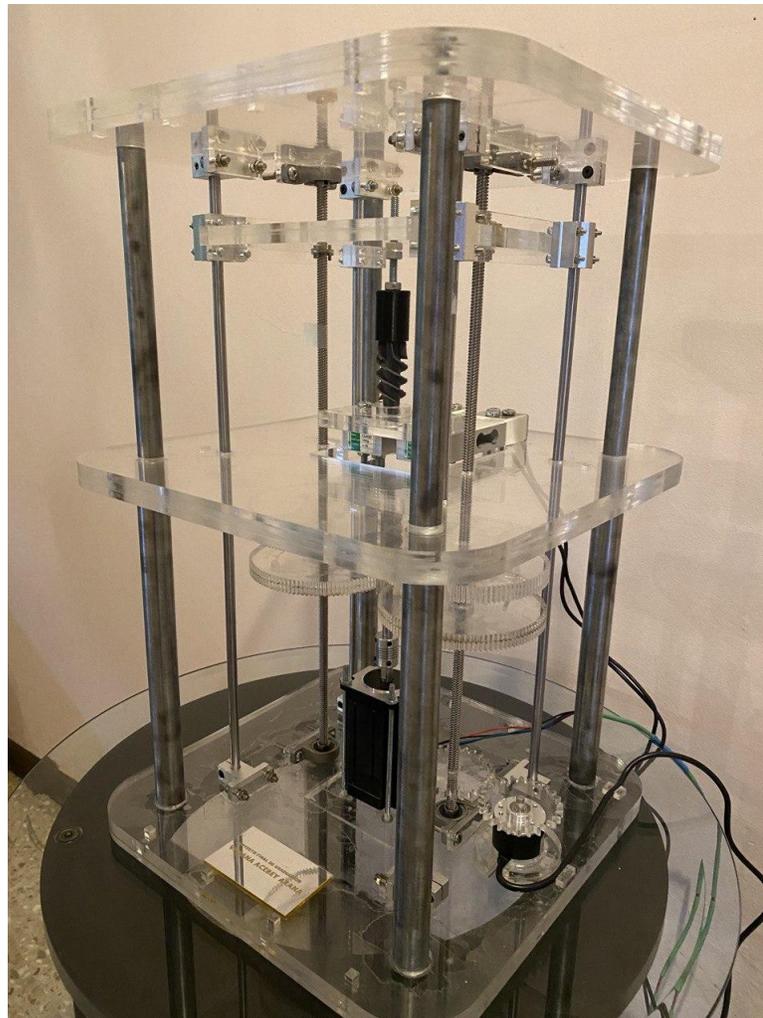


Figura 4.6: Prototipo. [Elaboración propia]

Para comprobar que el diseño planteado es viable se llevaron a cabo distintas pruebas con el prototipo. La primera prueba que se realizó fue en vacío, es decir sin ningún objeto de prueba. Con esta prueba se comprobó que la transformación del movimiento radial que se obtiene del motor a pasos se convierte correctamente a movimiento lineal en la placa que aplica la fuerza. La segunda prueba realizada consistió en someter a esfuerzos distintos objetos, de esta manera se comprobó que el sistema es capaz de aplicar fuerza sobre un sujeto de prueba y obtener los valores correspondientes a dicha fuerza. Por último, se aplicó una fuerza a una regla de metal, en configuración de viga, con la cual se pudo comprobar el funcionamiento del encoder. Por medio de estas pruebas fue posible determinar que el diseño planteado es viable.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Se planteó un primer diseño electromecánico, apto para la medición de esfuerzos de compresión en los álabes del impulsor para bombas de sangre. Por medio del diseño, es posible alcanzar una fuerza de 1591.2N.

Se comprobó que la implementación del diseño en materiales duraderos considera una disminución de costos del 77% para el laboratorio de investigación.

Se verificó el funcionamiento de las celdas de carga por medio de una prueba de concepto, en la cual el porcentaje de error es menor al 5% para todas las muestras realizadas.

Se comprobó el funcionamiento del encoder por medio de una prueba de concepto, donde los porcentajes de error de todas las muestras fue menor al 5%.

Se implementó un prototipo funcional capaz de alcanzar fuerzas de hasta 440N y el cuál representa un ahorro del 79% al laboratorio de investigación.

5.2 Recomendaciones

Para el diseño planteado se recomienda tener en cuenta los aspectos detallados a continuación.

Para el sistema eléctrico se recomienda realizar un PCB (placa de circuito impreso) para disminuir el ruido que se pueda generar en el sistema.

Se recomienda eliminar los angulos rectos del diseño para evitar concentradores de esfuerzo.

De igual forma, se recomienda diseñar una caja protectora para almacenar el diseño durante la realización de la prueba. Para garantizar la seguridad de las personas presentes.

Bibliografía

- [1] C. L. M. Espinoza, “Informe final del proyecto: Determinacion computacional del comportamiento fluido-estructura de un impulsor en flujo sanguíneo,” Master’s thesis, Escuela de Ingeniería Electrónica, ITCR, 2018.
- [2] U. de Estadísticas Demográficas, “Estadísticas vitales 2017: Población, nacimientos y matrimonios,” tech. rep., Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2018.
- [3] G. O. León, *Modelo de un nuevo concepto de impulsor para la aplicación en bombas para sangre*. PhD thesis, Escuela de Ingeniería Electrónica, ITCR, 2017.
- [4] F. de Enseñanza de CC.OO. de Andalucía, “Tipos de esfuerzos físicos,” *Revista digital para profesionales de la ensañaza*, no. 15, 2011.
- [5] E. Bejarano, “Ensayo de tensión o tracción,” tech. rep., Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2002.
- [6] R. Hibbeler, *Fundamental Equations of Mechanics of Materials*. Pearson Prentice Hall, ninth ed., 2014.
- [7] S. Electronics, “Sparkfun load cell amplifier - hx711.”
- [8] H. Kuhn and D. Medlin, “High strain rate tension and compression tests,” *Mechanical Testing and Evaluation*, vol. 8, pp. 429–446, 2000.
- [9] N. Muñóz, “Maquina universal de ensayos uh-a.c,” tech. rep., Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017.
- [10] D. Benavides, “Costa rica: Evolución de la mortalidad y los días de estancia por egresos hospitalarios en el periodo 2013-2030,” tech. rep., Estado de la Nación, 2013.
- [11] A. de Recursos y Servicios de Salud, “Estadísticas sobre la donación de órganos,” tech. rep., HRSA, 2019.
- [12] K. M. Kiros, “Memoria institucional 2014 - 2018,” tech. rep., Ministerio de Salud, 2018.
- [13] C. A. Thunberg, B. D. Gautan, F. A. Arabia, D. J. Cole, and A. M. Grigore, “Ventricular assist devices today and tomorrow,” *Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia*, vol. 24, no. 4, pp. 656–680, 2010.

-
- [14] M. G. C. Leiro and M. J. P. Martín, “Tratamiento de la insuficiencia cardíaca refractaria o avanzada,” *Revista Española Cardiología*, vol. 57, no. 9, pp. 869–883, 2004.
- [15] D. H. Delgado, V. Rao, H. J. Ross, S. Verma, and N. G. Smedira, “Mechanical circulatory assistance: State of art,” *Journal of the American Heart Association*, vol. 106, no. 16, pp. 2046–2050, 2002.
- [16] S. Schampaert, “Evaluation of the micromed debakey ventricular assist device,” tech. rep., Eindhoven University of Technology, Department of Biomedical Engineering, Division of Cardiovascular Biomechanics, 2009.
- [17] R. C. Hibbeler, *Mecánica de Materiales*. Pearson Education, sexta ed., 2006.
- [18] H. Appold, *Tecnología de los metales para profesiones tecnico mecánicas*. Reverte, sexta ed., 1984.
- [19] H. A. Kuhn, “Uniaxial compression testing,” *ASM Handbook*, vol. 8, 2000.
- [20] ASTM, “Standard test method for compressive properties of polymer matrix composite materials using a combined loading compression (clc) test fixture,” *ASTM Int’l*, 2019.
- [21] Sparkfun, “Sparkfun load cell amplifier - hx711.”

Anexo A

Cotización Metalinspec



Instron
825 University Avenue, Norwood, MA 02062-2643 USA
Tel. +1 781 575 5000 www.instron.com

QUOTATION

Quote To:

Viviana Acebey

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Provincia de Cartago
Costa Rica

Tel:

Fax:

cc:

We are pleased to submit the following quotation for your consideration

Date: 12/10/2020

Quote # IEWRQ3465

NP#

Reply To:

Gerardo Dominguez

Metalinspec SRL

200 mts- Norte y 50 mts. este del centro

Cultural Costarricense Norteamericano

Barrio Dent, San Jose

Costa Rica

Phone: (506) 2100-7471

Movil (506) 8706.2763

E-Mail: gdominguez@metalinspec.com.mx

Qty	Catalog #	Description	Price
1	5944	<p>Maquina universal de una columna para ensayos mecanicos INSTRON modelo 5944</p> <p>Sistema para prueba de materiales Modelo 5944, capacidad 2 kN (200 kg, 450 lb)</p> <p>Sistema de pruebas electromecánico de una columna para ser instalado sobre mesa, las características estándar</p> <ul style="list-style-type: none"> - Control digital integrado de bucle cerrado y electrónica para adquisición de datos incluyendo canales de medición de carga y de extensión de cruceta. - Panel de control de prueba con: cuatro botones con funciones programables, pantalla para resultados, botones de función para comienzo prueba, detención de prueba y retorno de cruceta; indicadores luminosos de estado de prueba, mando giratorio de velocidad variable y botón de activación protección de probeta. - Rango de velocidades de prueba: 0.05 a 2500 mm/min (0.002 pulg/min a 100 pulg/min). - Velocidad de retorno de la cruceta: 2500 mm/min (100 pulg/min) - Adaptadores sobre la base: Conexión tipo O hembra (pasador de 6 mm de diámetro) y Conexión tipo D hembra (pasador de 0.5 pulg. De diámetro) 	

*Nota: Cuando se usan platos de compresión, se deben usar barras



Quote # IEWRQ3465
Last modified 02/28/20

Page 1

Quotation submitted subject to provisions included.

<i>Qty</i>	<i>Catalog #</i>	<i>Description</i>	<i>Price</i>
		de tensión/compresión para permitir que los platos se toquen. Usar 3119-300 para platos con conexión tipo D y 3110-718 para platos con conexión tipo O.	
1	5944-A6	Opción de lenguaje Español	
1	5944-D1	Opción de voltaje 120 V	
1	5944-L6	Celda de carga: 1 kN (100 kg, 225 lb) - Tipo Of. Tensión/Compresión. Conexión tipo O hembra (pasador de 6 mm de diámetro).	
		Celdas adicionales	
1	2580-500N	Celda de carga: 500 N (50 kg, 112 lb) - Tipo Of. Tensión/Compresión. Conexión tipo O hembra (pasador de 6 mm de diámetro).	
1	2530-100N	Celda de carga de tensión/compresión, estática Capacidad: 100 N (10 kg, 22 lb) Conexión hembra tipo OO (conexión de 6 mm con chaveta de horquilla de 2,5 mm de diámetro) Incluye adaptador a conexión hembra tipo O (conexión de 12 mm con chaveta de horquilla de 6 mm de diámetro). Diseño con perno con autoidentificación y calibrado	
		Mordazas neumáticas	
1	2712-041	Mordazas Neumáticas de Acción Lateral. Capacidad 1 kN (100 kg, 225lb) Rango de Temperatura: -20 °C hasta +100 °C (-4 °F hasta +212°F).** Máximo espesor de probeta: 13 mm (0.5 pulg.)* *Depende de la cara empleada Conexión superior e inferior: Pasador de 6 mm. Macho	
		Requiere caras y kit de distribución de aire. Kit de control de aire con pedal esta disponible y es opcional ** Mangueras clasificadas a 80°C. Requiere 2712-047 Kit de mangueras de alta temperatura para temperaturas más altas.	
1	2702-315	Caras acanaladas planas, 25 mm ancho x 25 mm alto (1 x 1 pulg.) Juego de 4 caras. Para Mordazas Neumáticas de acción lateral 2712-04X Máximo espesor de muestra: 13mm con 2712-041 20mm con 2712-042 26mm con 2712-045/-046	

<i>Qty</i>	<i>Catalog #</i>	<i>Description</i>	<i>Price</i>
		36mm con 2710-113/-114 46mm con 2710-115/-116	
1	2712-052	Pneumatic Side Action Grips. Capacity: 250 N (50 lbf, 25 kgf). Temperature range: -20 °C to 100 °C (-4 °F to 212 °F)**. Maximum specimen thickness: Refer to faces Upper and lower fittings: Type Om (12 mm connection with 6 clevis pin). Equipped with manual air switch and check nuts. Includes Jaw face shields 2701-215. Requires faces and an Air Distribution Kit. An Automatic Air Control Kit or Footswitch is recommended. **Included hoses rated to 80 C / 176 F. Requires 2712-047 High temperature hoses kit for higher temperatures.	
1	2702-367	Jaw Faces, Serrated, 25 mm wide x 25 mm high (1 x 1 in) Set of 4 faces. For 2712-051, 2712-052, 2712-002, 014, 019, and 2732-001, 006 Pneumatic Side Action Grips, and 2710-001, 101, 102, 111, 112 Screw Side-Action Grips. Max. Specimen thickness : 7.0 mm for 2712-051 5.8 mm for 2712-052 35 mm for 2710-111/ -112 3.5 mm for 2712-002, 014, 019, 2732-001, 006 30 mm for 2710-001, 101, 102 Accesorio para el accionamiento neumático de las mordazas	
1	2701-042	Kit de distribución de aire, externo. Para uso únicamente con mordazas 2712-002, 003, 004, 014, 015, 018, 019, 020, 2712-04x, 2712-052 . Incluye mangueras y accesorios. Software Bluehill Universal	
1	2450-700	Software de ensayos Bluehill Universal para las NUEVAS series 3300, 5900 y 59, 8800 y las nuevas actualizaciones AMPLIADAS Bluehill Universal es el paquete principal de software de componentes y materiales de Instron que satisface las necesidades de una amplia variedad de aplicaciones, como plásticos, compuestos, metales, elastómeros, biomédicos, adhesivos, textiles, componentes y otros. Cada módulo de aplicación ofrece la capacidad de ensayos de tensión, compresión, flexión, relajación, fluencia, pelado, desgarrado y fricción y de ensayos basado en extensión, carga o deformación. Asimismo, se incluye la biblioteca completa de cálculos de Instron, con cientos de cálculos diferentes, como módulo y tensión pico, así	

<i>Qty</i>	<i>Catalog #</i>	<i>Description</i>	<i>Price</i>
		<p>como cálculos definidos por el usuario. El generador de sin igual de Bluehill permite a los usuarios crear personalizadas de informes que pueden vincularse con métodos de ensayos y usarse para exportar resultados de ensayos mediante correo electrónico o guardarse como HTML, Word o PDF. Los datos sin procesar y los archivos de exportación de resultados se pueden personalizar por completo para una mejor compatibilidad con los sistemas de gestión de información del laboratorio. También hay opciones de control de ensayos avanzado, como carga de bloques, y análisis de datos avanzado, como registros de cámara web.</p> <p>Para sistemas operativos Windows 7 Professional (32 o 64 bits) o Windows 10 Professional (solo 64 bits) (se recomienda Win 10).</p>	
1	2450-700A6	Opción de idioma español.	
1	2450-700C3	Para Instron 5900 Series.	
1	2450-700D6	<p>Módulo de Aplicación de Materiales Biomédicos y Médicos</p> <p>El Módulo de aplicación de materiales biomédicos y médicos incluye los siguientes métodos de ensayos preconfigurados: ASTM F2458-05, ASTM F2516-14*, ASTM F2606-08 (2014), ASTM F2256-05 (2015), ASTM F88-15, EN 455-2(2015).</p> <p>*ASTM F2516, ISO 7886-1 Annex G requiere TestProfiler (opción F1).</p>	
1	2450-700F1	<p>TestProfiler</p> <p>TestProfiler permite crear secuencias de control de ensayos personalizadas (perfiles) con una interfaz sencilla y fácil de Se pueden crear fácilmente secuencias de ensayos cíclicos complejos(bloques) utilizando las formas de onda de (triángulos, rampas y niveles constantes). El método de ensayo se muestra gráficamente a medida que usted lo crea, y se pueden usar las herramientas estándares de Window (cortar, pegar, copiar, borrar, etcétera) para rápidamente crear o modificar de manera virtual cualquier secuencia de ensayos compleja. Los resultados de los ensayos pueden asignarse de manera independiente a los bloques individuales de ensayos, y la exposición gráfica de resultados de ensayos puede filtrarse para mostrar solo los pasos (ciclos) de interés.</p> <p>Con Bluehill 3.61 se introdujo un TestProfiler</p>	

<i>Qty</i>	<i>Catalog #</i>	<i>Description</i>	<i>Price</i>
		<p>rediseñado con mejor utilidad y flexibilidad de control de Ejemplos del control de ensayos mejorado abarcan la capacidad de</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cambiar la temperatura de ciertas cámaras o modelos de hornos en medio de un ensayo - Cambiar la frecuencia de adquisición de datos para cada segmento individual del ensayo (denominado paso) - Permitir cambios rápidos de parámetros de perfil entre ensayos con las entradas del operador <p>Dashboard-Tablera operativa</p>	
1	2490-696	<p>Panel del operador para sistemas Serie 3300/3400/5500/5500A/5900 nuevos y existentes</p> <p>Incluye: Monitor táctil de pantalla plana con clasificación Compatibilidad total con el software de ensayo de materiales Bluehill Universal Cables y conectores Interfaz VESA de 100 mm estándar para permitir el uso de montajes de televisores/monitores de terceros, si lo desea X años de garantía</p> <p>Opciones: - Controlador integrado (selección B1) - Soporte de sobremesa en pedestal o brazo de montaje ajustable montado en ranura en T (selección M) - Integración con mando 5900 o 5500/5500A (selección G1 o H1)</p>	
1	2490-696B1	<p>Monitor de 21,5 in con controlador integrado Incluye 2 puertos Ethernet y adaptador de red inalámbrica. Se debe seleccionar la opción de cable de alimentación (selección P).</p>	
1	2490-696M1	<p>Brazo de montaje del panel del operador para sistemas de columna única con cubiertas de columna extruidas y ranuras en T.</p> <p>Las características incluyen: Altura ajustable a lo largo de columna de ranura en T Rotación e inclinación hacia el operador y en sentido Orientación prolongada y apaisada Interfaz de montaje VESA de 100 mm</p>	
1	2490-696P1	<p>Conjunto de Cables de Alimentación de los Estados Unidos o Canadá (NEMA).</p>	
1	2490-696G1	<p>Soporte ampliado del mando (panel de productividad) para el bastidor Instron 5900</p> <p>Integra el mando con el brazo de soporte opcional del panel del</p>	

<i>Qty</i>	<i>Catalog #</i>	<i>Description</i>	<i>Price</i>
		operador. Para los sistemas Instron 59XX EM que requieren el montaje del monitor en el lado derecho del bastidor, junto al mando 5900 (p. ej., cuando AVE o SVE está instalado). Requiere una opción de brazo de soporte del panel del operador montado en bastidor compatible (2490-696M1/M2/M3)	
		Valor ExWorks Norwood MA, EE.UU.	\$80,575.00
1		Valor de la Instalación - Calibración - Entrenamiento	\$4,375.00
1		Valor del flete y empaque EPH	\$1,800.00
1		Valor total CIP aeropuerto internacional de Costa Rica (almacén fiscal)	\$86,750.00

<i>Qty</i>	<i>Catalog #</i>	<i>Description</i>	<i>Price</i>
------------	------------------	--------------------	--------------

workstations and managed directories for which a License Fee has been paid. By installing and using the software, the user agrees to be bound by such terms and conditions. Customer's signature on this proposal and/or submittal of purchase order referencing proposal shall be deemed acceptance of the shrink wrap method of licensing. Customers wishing to review the terms and conditions prior to issuance of a purchase order or shipment may request a printed copy of the licensing terms and conditions, which shall be provided promptly.

Note: 1. PC must have standard Windows 7 (32/64 bit), or Windows 10 (32/64 bit), installed (non-image version) and may require additional on-site services. Compatible with Bluehill 3 Windows 7 and Windows 10 and Bluehill Universal for Windows 7 and Windows 10. 2. ComplianceBuilder Network Server License may be purchased for a local or corporate network with connections to an unlimited number of Instron test Network Licenses should be purchased directly from Xybion Corporation. 3. ComplianceBuilder, 2450-600, has unlimited unique users. ComplianceBuilder tracks user changes Windows log-in credentials.

Electronic signatures are most commonly used only by administrators and laboratory managers. ComplianceBuilder has a limit of 3 unique electronic signatures. In some rare cases, e-signatures may be required. In those rare cases, please quote 2450-601 as needed. If more than 8 electronic signatures are needed, please consult EMBT.

IQ / OQ Verification Services

IQ/OQ Qualification Documentation for Static Systems

Customer specific documentation template details the steps necessary to ensure that all key aspects of the Instron testing system software are in conformance with manufacturer's specifications and produce valid results. Software validated with this part number includes Bluehill Bluehill 3, Bluehill 2, and Partner. This service does not require onsite IQ/OQ services. Included in the package is the verification of one customer-specified calculation. Individual calculations may be purchased with 1490-041 or the entire calculation suite with 1490-048. Documentation package



<i>Qty</i>	<i>Catalog #</i>	<i>Description</i>	<i>Price</i>
------------	------------------	--------------------	--------------

includes files on a USB stick

INSTALLATION

This service completes the customer specific template purchased through 1490-040. An Instron Field Engineer will conduct the installation and operation qualification of the Instron testing system to ensure system operation is conformance with design specifications. Note: Verification/calibration services need to be purchased (e.g. force verification).

CALCULATIONS

Individual Calculation Verification for IQ/OQ Documentation
Includes verification of one (1) individual, customer defined our calculation list) calculation. Additional verifications can added by simply increasing the quantities. This information will added to documentation template

Generales de la oferta.

La oferta fue configurada en base a la información proporcionada y a las visitas técnicas.

Tiempo de entrega: 5 - 6 semanas salvo imprevistos. No incluye tiempo de tránsito.

Forma de pago: 50% anticipado junto con la orden de compra y 50% contra aviso de embarque del equipo.

La orden de compra deberá ser emitida a nombre de Metalinspec SRL. Cedula Jurídica: 3-102-650889.

Reserva de propiedad - Todo equipo se mantendrá como propiedad de Metalinspec SRL en tanto no sea pagado en su totalidad.

Garantía del sistema: 12 meses después de instalado el equipo o 15 meses después de la fecha de embarque. Lo que primero ocurra.

Para información de nuestro laboratorio de calibración del equipo cotizado, puede visitar el sitio web www.metrolab.com.mx

Los precios son en dólares americanos de los Estados Unidos de Norteamérica.

Validez de los precios: 30 días después de la fecha de esta oferta.



<i>Qty</i>	<i>Catalog #</i>	<i>Description</i>	<i>Price</i>
------------	------------------	--------------------	--------------

Los precios no incluyen los gastos internos. Son responsabilidad del cliente.

Cualquier duda o consulta estamos a sus órdenes.

Gerardo Dominguez F. / Metalinspec Sucursal CA2 / Instron



Quote # IEWRQ3465
Last modified 02/28/20

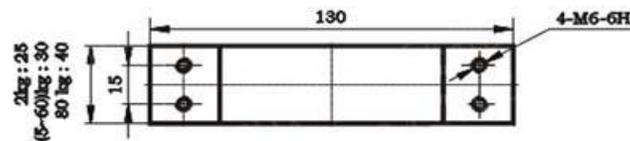
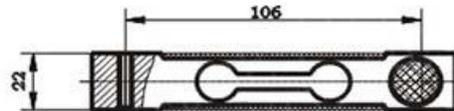
Page 9

Quotation submitted subject to provisions included.

Anexo B

Hoja de datos Celdas de Carga

YZC-1B 型号: YZC-1B



技术指标

应用	Application	计价秤 Price computing scales	
型号	Model	YZC-1B	
量程	Capacity	Kg	2, 3, 5, 8, 10, 30, 35, 40, 50, 60, 80
输出灵敏度	Rated output	MV/V	2.0±0.15
精度等级	Accuracy class		C2 C3
最大检定分度数	Maximum number of verification intervals	n_{max}	2000 3000
最小检定分度值	Minimum load cell verification intervals	V_{min}	$E_{Max}/5000$ $E_{Max}/500$
综合误差	Combined error	%RO	≤ ±0.030 ≤ ±0.020
蠕变	Creep	%RO/30min	0.03 0.0167
温度灵敏度漂移	Temperature effect on sensitivity	%RO/°C	0.0016
温度零点漂移	Temperature effect on zero	%RO/°C	0.003 0.002
零点平衡	Zero balance	%RO	±1.0
输入阻抗	Input resistance	Ω	402±6 1066±10
输出阻抗	Output resistance	Ω	350±3 1000±10
绝缘电阻	Insulation resistance	MΩ (50V)	5000
推荐激励电压	Recommended excitation voltage	V	10~15
温度补偿范围	Compensated temperature range	°C	-10~+40
工作温度范围	Operating temperature range	°C	-35~+80
安全超载能力	Safe overload	%RO	150
极限超载范围	Ultimate overload	%RO	200
传感器材料	Load cell material		铝合金 Aluminium
推荐台面尺寸	Platform size		350X350
接线电缆	Connecting cable		∅ 4.2X350mm
接线方式	Method of connecting wire		红输入 (+) 黑输入 (-) 绿输出 (+) 白输出 (-)

Anexo C

Hoja de datos Encoder

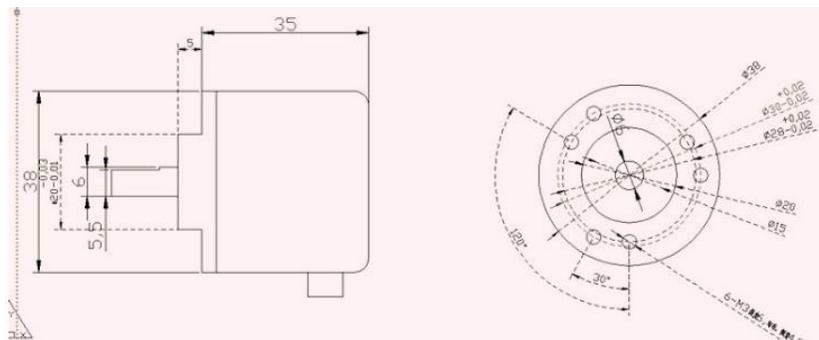
OPTICAL ROTARY ENCODER 400 PULSE

Model: HN3806-AB-400N



Features:

- AB two-phase, pulse signal generation count can be identified by the rotation direction of the grating disk and optocoupler.
- Performance: 400 Pulse per Revolution
- DC5-24V wide supply voltage
- Maximum mechanical speed: 6300 rev/min
- Dimensions:
 - The encoder body size: $\varnothing 38\text{mm}$;
 - Shaft: $\varnothing 6 \times 16\text{mm}$;
 - Axis platform: high 5mm, $\varnothing 20\text{mm}$;
 - Fixing hole: M3 screws,
 - Three mounting holes on the circle 30 and the other three mounting holes in the 28th round; side of the outlet.



Output:

AB two-phase quadrature output rectangular pulse, the circuit output is NPN open collector output type, the output of this type can with internal pull-up resistor be directly connected to the microcontroller or PLC, such as 51 single or Mitsubishi PLC (the PLC input should switch to the 0V work). Note: if the encoder is not connected to the device it cannot be directly connected to oscilloscope (open collector output when there is no pull-up resistor, there is no voltage output), to connect to oscilloscope add two pull-up resistor AB two-phase output.

Application:

Used to measure the rotation speed of the object, angle, acceleration and length measurements.
Suitable for all kinds of intelligent control displacement measurement, automatic fixed-length leather guillotine machines, steel cutting length controller, human height scale, students racing robots.

Connection:

- Red: VCC
- Black: GND (0V)
- White: Phase A
- Green: Phase B

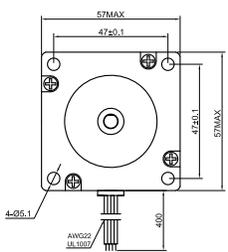
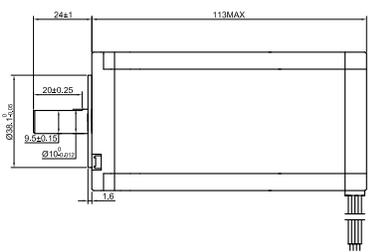
Note: AB two-phase output must not be directly connected to VCC, otherwise, they will burn the output transistor.

Made in China



Anexo D

Hoja de datos Motor a pasos

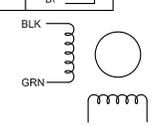



SPECIFICATION	CONNECTION	BIPOLAR
VOTAGE(VOC)		3.78
AMPS/PHASE		4.20
RESISTANCE/PHASE(Ohms)@25°C		0.90±10%
INDUCTANCE/PHASE(mH)@1KHz		3.80±20%
HOLDING TORQUE(Nm) (lbf-in)		3.00[26.55]
STEP ANGLE(°)		1.80
STEP ACCURACY(NON-ACCUM)		±5.00%
ROTOR INERTIA(g-cm²)		800.00
WEIGHT(Kg) (lb)		1.60[3.53]
TEMPERATURE RISE:MAX.80°C (MOTOR STANDSTILL:FOR 2PHASE ENERGIZED)		
AMBIENT TEMPERATURE -10°C-50°C[14°F-122°F]		
INSULATION RESISTANCE 100 Mohm (UNDER NORMAL TEMPERATURE AND HUMIDITY)		
INSULATION CLASS B 130°C[266°F]		
DIELECTRIC STRENGTH 500VAC FOR 1MIN.(BETWEEN THE MOTOR COILS AND THE MOTOR CASE)		
AMBIENT HUMIDITY MAX.85%(NO CONDENSATION)		

TYPE OF CONNECTION (EXTERN)		MOTOR	
PIN NO	BIPOLAR	LEADS	WINDING
1	A —	BLK	A
2	A1 —	GRN	A1
3	B —	RED	B
4	B1 —	BLU	B1

FULL STEP 2 PHASE-Ex. .
WHEN FACING MOUNTING END (X)

STEP	A	B	A1	B1	
1	+	+	-	-	↓ CCW ↑ CW
2	-	-	+	+	
3	-	+	-	+	
4	+	+	-	-	





www.oystepper.com

APVD		
CHKD		
DRN		
SCALE	SIGNATURE	DATE

STEPPER MOTOR

23HS45-4204S

Anexo E

Hoja de datos TB6600



TB6600

Stepper Motor Driver

Analog Driver Model TB6600

Analog Technology, max. 40 VDC / 4.0 A (PEAK)



Product Description:

The TB6600 single axis drive is a low cost microstepping drive. It is suitable for driving 2-phase and 4-phase hybrid stepper motors. Not for professional applications.

Features:

- Cost-effective
- Supply voltage up to +40 VDC, Output current up to 4.0 A (PEAK)
- Output current selectable in 8 steps via DIP-switch
- Automatic idle-current reduction (in standstill mode) to reduce motor heating
- Pulse input frequency up to 20 kHz
- Input suitable for 5 V signals
- Inputs are optically isolated
- 6 selectable microstep resolutions, up to 6400 steps/rev with standard 1.8° motors
- Suitable for 2-phase and 4-phase motors
- Supports PUL/DIR mode
- Over current and overheat protection

Electrical Specifications:

Parameters	Min	Typ.	Max	Unit
Output current	0.7	-	4.0 (3.5 RMS)	A
Supply voltage	+9	+36	+40	VDC
Logic signal current	8	10	15	mA
Puls input frequency	0	-	20 when duty cycle is 25 high / 75 low 13 when duty cycle is 50 / 50	kHz
Insulation resistance	500			MΩ

Further Specifications:

Microsteps / 1,8 °	200		6400
PUL / DIR		yes	
NEMA sizes	17		24
Motor type Mecheltron	42BYGH-XXXX		60BYGH-XXX

22.01.18

Right of techn. modifications is reserved

www.sorotec.de

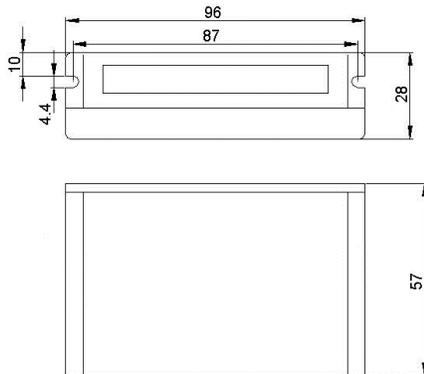
Technische Änderungen vorbehalten

TB6600

Stepper motor driver

Analog Driver
 Model TB6600

Mechanical Specifications: (Unit: mm)

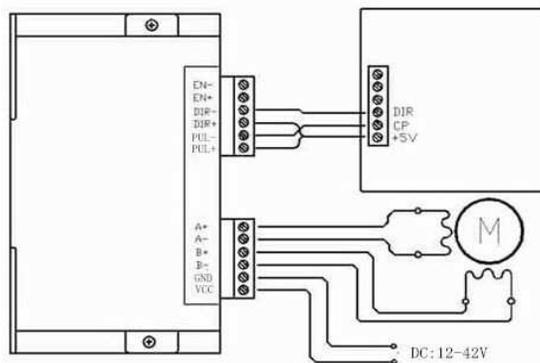


Applications:

Suitable for a wide range of stepping motors of NEMA sizes 17, 23 and 24 (42x42 mm to 60x60 mm). It can be used in various kinds of machines, such as X-Y tables, engraving machines, labeling machines, laser cutters, pick-place devices, and so on. Particularly well suited for applications where low noise levels, less heat development, high speed and high precision are desired.

Typical Connection Schematic:

A typical system consists of stepper motor, stepper motor driver, power supply and controller. The following image shows a typical connection schematic:



Logic control signals which have 5 V can be connected directly;

R 1k Ω must be connected in line when control signal is 12V;

R 2k Ω must be connected in line when control signal is 24V to ensure control signal current is 8mA to 15mA.

22.01.18

Anexo F

Hoja de datos HX711

24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales

DESCRIPTION

Based on Avia Semiconductor's patented technology, HX711 is a precision 24-bit analog-to-digital converter (ADC) designed for weigh scales and industrial control applications to interface directly with a bridge sensor.

The input multiplexer selects either Channel A or B differential input to the low-noise programmable gain amplifier (PGA). Channel A can be programmed with a gain of 128 or 64, corresponding to a full-scale differential input voltage of $\pm 20\text{mV}$ or $\pm 40\text{mV}$ respectively, when a 5V supply is connected to AVDD analog power supply pin. Channel B has a fixed gain of 32. On-chip power supply regulator eliminates the need for an external supply regulator to provide analog power for the ADC and the sensor. Clock input is flexible. It can be from an external clock source, a crystal, or the on-chip oscillator that does not require any external component. On-chip power-on-reset circuitry simplifies digital interface initialization.

There is no programming needed for the internal registers. All controls to the HX711 are through the pins.

FEATURES

- Two selectable differential input channels
- On-chip active low noise PGA with selectable gain of 32, 64 and 128
- On-chip power supply regulator for load-cell and ADC analog power supply
- On-chip oscillator requiring no external component with optional external crystal
- On-chip power-on-reset
- Simple digital control and serial interface: pin-driven controls, no programming needed
- Selectable 10SPS or 80SPS output data rate
- Simultaneous 50 and 60Hz supply rejection
- Current consumption including on-chip analog power supply regulator:
 - normal operation $< 1.5\text{mA}$, power down $< 1\mu\text{A}$
- Operation supply voltage range: 2.6 ~ 5.5V
- Operation temperature range: $-40 \sim +85^\circ\text{C}$
- 16 pin SOP-16 package

APPLICATIONS

- Weigh Scales
- Industrial Process Control

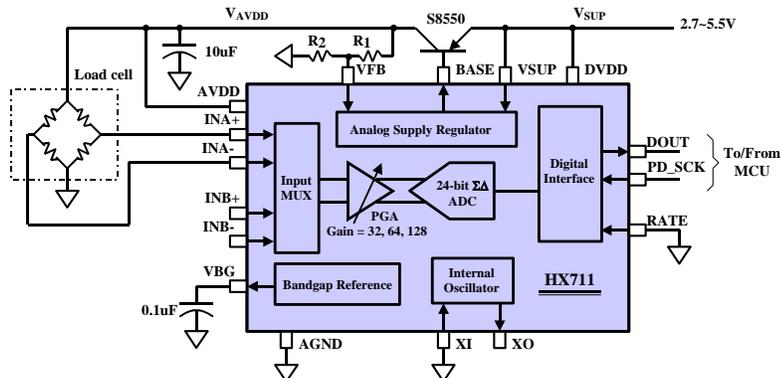
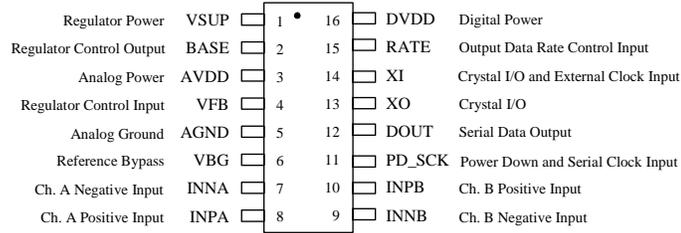


Fig. 1 Typical weigh scale application block diagram



HX711

Pin Description



SOP-16L Package

Pin #	Name	Function	Description
1	VSUP	Power	Regulator supply: 2.7 ~ 5.5V
2	BASE	Analog Output	Regulator control output (NC when not used)
3	AVDD	Power	Analog supply: 2.6 ~ 5.5V
4	VFB	Analog Input	Regulator control input (connect to AGND when not used)
5	AGND	Ground	Analog Ground
6	VBG	Analog Output	Reference bypass output
7	INA-	Analog Input	Channel A negative input
8	INA+	Analog Input	Channel A positive input
9	INB-	Analog Input	Channel B negative input
10	INB+	Analog Input	Channel B positive input
11	PD_SCK	Digital Input	Power down control (high active) and serial clock input
12	DOUT	Digital Output	Serial data output
13	XO	Digital I/O	Crystal I/O (NC when not used)
14	XI	Digital Input	Crystal I/O or external clock input, 0: use on-chip oscillator
15	RATE	Digital Input	Output data rate control, 0: 10Hz; 1: 80Hz
16	DVDD	Power	Digital supply: 2.6 ~ 5.5V

Table 1 Pin Description

KEY ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Parameter	Notes	MIN	TYP	MAX	UNIT
Full scale differential input range	V(inp)-V(inn)	$\pm 0.5(AVDD/GAIN)$			V
Common mode input		AGND+1.2		AVDD-1.3	V
Output data rate	Internal Oscillator, RATE = 0		10		Hz
	Internal Oscillator, RATE = DVDD		80		
	Crystal or external clock, RATE = 0		$f_{clk}/1,105,920$		
	Crystal or external clock, RATE = DVDD		$f_{clk}/138,240$		
Output data coding	2's complement	800000		7FFFFFF	HEX
Output settling time ⁽¹⁾	RATE = 0		400		ms
	RATE = DVDD		50		
Input offset drift	Gain = 128		0.2		mV
	Gain = 64		0.4		
Input noise	Gain = 128, RATE = 0		50		nV(rms)
	Gain = 128, RATE = DVDD		90		
Temperature drift	Input offset (Gain = 128)		± 6		nV/°C
	Gain (Gain = 128)		± 5		ppm/°C
Input common mode rejection	Gain = 128, RATE = 0		100		dB
Power supply rejection Reference bypass (V _{BG})	Gain = 128, RATE = 0		100		dB
Crystal or external clock frequency		1	11.0592	20	MHz
Power supply voltage	DVDD	2.6		5.5	V
	AVDD, VSUP	2.6		5.5	
Analog supply current (including regulator)	Normal		1400		μA
	Power down		0.3		
Digital supply current	Normal		100		μA
	Power down		0.2		

(1) Settling time refers to the time from power up, reset, input channel change and gain change to valid stable output data.

Table 2 Key Electrical Characteristics



Analog Inputs

Channel A differential input is designed to interface directly with a bridge sensor's differential output. It can be programmed with a gain of 128 or 64. The large gains are needed to accommodate the small output signal from the sensor. When 5V supply is used at the AVDD pin, these gains correspond to a full-scale differential input voltage of $\pm 20\text{mV}$ or $\pm 40\text{mV}$ respectively.

Channel B differential input has a fixed gain of 32. The full-scale input voltage range is $\pm 80\text{mV}$, when 5V supply is used at the AVDD pin.

Power Supply Options

Digital power supply (DVDD) should be the same power supply as the MCU power supply.

When using internal analog supply regulator, the dropout voltage of the regulator depends on the external transistor used. The output voltage is equal to $V_{AVDD} = V_{BG} * (R1+R2) / R1$ (Fig. 1). This voltage should be designed with a minimum of 100mV below VSUP voltage.

If the on-chip analog supply regulator is not used, the VSUP pin should be connected to either AVDD or DVDD, depending on which voltage is higher. Pin VFB should be connected to Ground and pin BASE becomes NC. The external 0.1uF bypass capacitor shown on Fig. 1 at the VBG output pin is then not needed.

Clock Source Options

By connecting pin XI to Ground, the on-chip oscillator is activated. The nominal output data rate when using the internal oscillator is 10 (RATE=0) or 80SPS (RATE=1).

If accurate output data rate is needed, crystal or external reference clock can be used. A crystal can be directly connected across XI and XO pins. An external clock can be connected to XI pin, through a 20pF ac coupled capacitor. This external clock is not required to be a square wave. It can come directly from the crystal output pin of the MCU chip, with amplitude as low as 150 mV.

When using a crystal or an external clock, the internal oscillator is automatically powered down.

Output Data Rate and Format

When using the on-chip oscillator, output data rate is typically 10 (RATE=0) or 80SPS (RATE=1).

When using external clock or crystal, output data rate is directly proportional to the clock or crystal frequency. Using 11.0592MHz clock or crystal results in an accurate 10 (RATE=0) or 80SPS (RATE=1) output data rate.

The output 24 bits of data is in 2's complement format. When input differential signal goes out of the 24 bit range, the output data will be saturated at 800000h (MIN) or 7FFFFFFh (MAX), until the input signal comes back to the input range.

Serial Interface

Pin PD_SCK and DOUT are used for data retrieval, input selection, gain selection and power down controls.

When output data is not ready for retrieval, digital output pin DOUT is high. Serial clock input PD_SCK should be low. When DOUT goes to low, it indicates data is ready for retrieval. By applying 25~27 positive clock pulses at the PD_SCK pin, data is shifted out from the DOUT output pin. Each PD_SCK pulse shifts out one bit, starting with the MSB bit first, until all 24 bits are shifted out. The 25th pulse at PD_SCK input will pull DOUT pin back to high (Fig.2).

Input and gain selection is controlled by the number of the input PD_SCK pulses (Table 3). PD_SCK clock pulses should not be less than 25 or more than 27 within one conversion period, to avoid causing serial communication error.

PD_SCK Pulses	Input channel	Gain
25	A	128
26	B	32
27	A	64

Table 3 Input Channel and Gain Selection

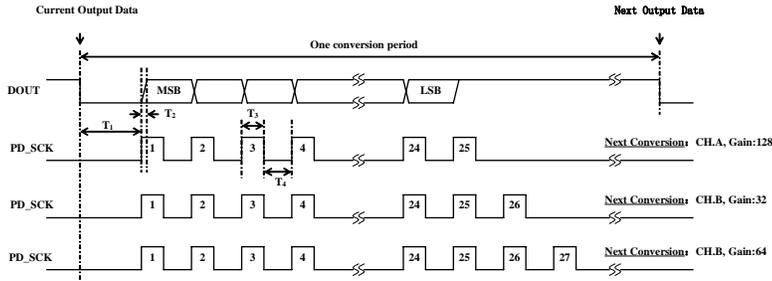


Fig.2 Data output, input and gain selection timing and control

Symbol	Note	MIN	TYP	MAX	Unit
T ₁	DOUT falling edge to PD_SCK rising edge	0.1			μs
T ₂	PD_SCK rising edge to DOUT data ready			0.1	μs
T ₃	PD_SCK high time	0.2	1	50	μs
T ₄	PD_SCK low time	0.2	1		μs

Reset and Power-Down

When chip is powered up, on-chip power on rest circuitry will reset the chip.

Pin PD_SCK input is used to power down the HX711. When PD_SCK Input is low, chip is in normal working mode.

powered down. When PD_SCK returns to low, chip will reset and enter normal operation mode.

After a reset or power-down event, input selection is default to Channel A with a gain of 128.

Application Example

Fig.1 is a typical weigh scale application using HX711. It uses on-chip oscillator (XI=0), 10Hz output data rate (RATE=0). A Single power supply (2.7~5.5V) comes directly from MCU power supply. Channel B can be used for battery level detection. The related circuitry is not shown on Fig. 1.

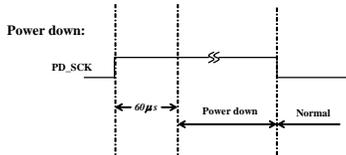


Fig.3 Power down control

When PD_SCK pin changes from low to high and stays at high for longer than 60μs, HX711 enters power down mode (Fig.3). When internal regulator is used for HX711 and the external transducer, both HX711 and the transducer will be



HX711

Reference PCB Board (Single Layer)

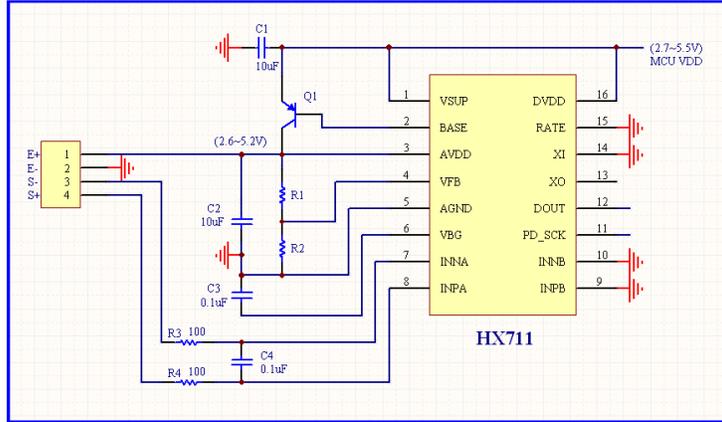


Fig.4 Reference PCB board schematic

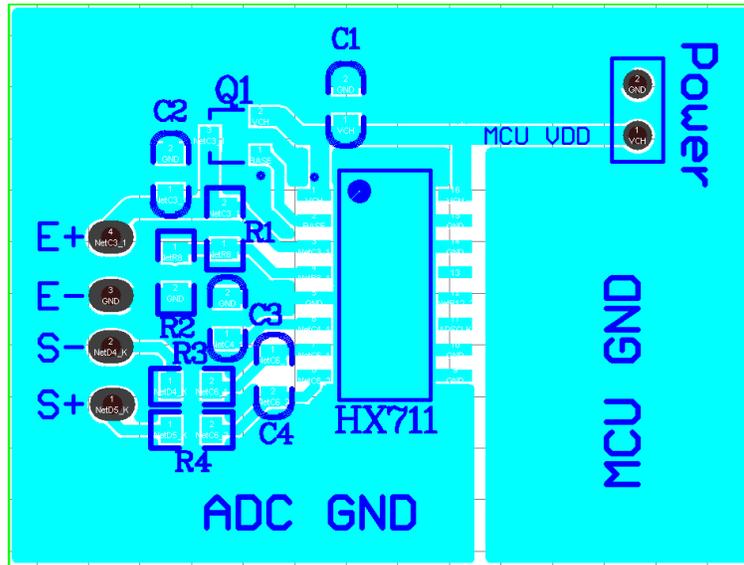


Fig.5 Reference PCB board layout

Reference Driver (Assembly)

```

/*-----
Call from ASM:      LCALL  ReaAD
Call from C:       extern unsigned long ReadAD(void);
                  .
                  .
                  unsigned long data;
                  data=ReadAD();
                  .
                  .
-----*/

PUBLIC      ReadAD
HX711ROM   segment  code
rseg      HX711ROM

sbit      ADD0 = P1.5;
sbit      ADSK = P0.0;
/*-----
OUT:      R4, R5, R6, R7  R7=>LSB
-----*/

ReadAD:
  CLR  ADSK          //AD Enable (PD_SCK set low)
  SETB ADD0         //Enable 51CPU I/O
  JB  ADD0,$        //AD conversion completed?
  MOV  R4,#24

ShiftOut:
  SETB ADSK         //PD_SCK set high (positive pulse)
  NOP
  CLR  ADSK         //PD_SCK set low
  MOV  C,ADD0       //read on bit
  XCH  A,R7         //move data
  RLC  A
  XCH  A,R7
  XCH  A,R6
  RLC  A
  XCH  A,R6
  XCH  A,R5
  RLC  A
  XCH  A,R5
  DJNZ R4,ShiftOut //moved 24BIT?
  SETB ADSK
  NOP
  CLR  ADSK
  RET
END

```

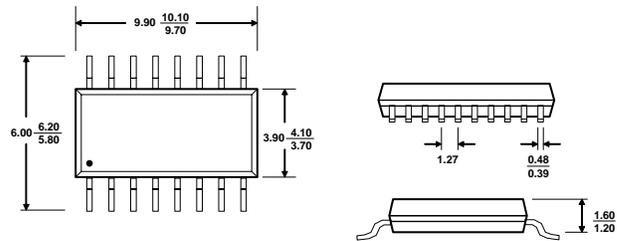


HX711

Reference Driver (C)

```
//-----  
sbit ADDO = P1^5;  
sbit ADSK = P0^0;  
unsigned long ReadCount(void) {  
    unsigned long Count;  
    unsigned char i;  
    ADDO=1;  
    ADSK=0;  
    Count=0;  
    while (ADDO);  
    for (i=0;i<24;i++){  
        ADSK=1;  
        Count=Count<<1;  
        ADSK=0;  
        if (ADDO) Count++;  
    }  
    ADSK=1;  
    Count=Count^0x800000;  
    ADSK=0;  
    return (Count);  
}
```

Package Dimensions



Typ $\frac{\text{MAX}}{\text{MIN}}$ Unit: mm

SOP-16L Package

Anexo G

Hoja de datos Teensy 3.2

Welcome to Teensy 3.2

32 Bit Arduino-Compatible Microcontroller

To begin using Teensy, please visit the website & click [Getting Started](http://www.pjrc.com/teensy).

www.pjrc.com/teensy

Digital Pins

digitalRead
digitalWrite
pinMode

Analog Pins

analogRead
analogReference
analogReadRes

PWM Pins

analogWrite
analogWriteRes

Touch Sense Pins

touchRead

Serial Ports

Serial1
Serial2
Serial3

I²C Port

Wire Library

SPI Port

SPI Library

Vin (3.6 to 6.0 volts)
 AGND
 3.3V (250 mA max)
 23
22
21
20
19
18
17
16
15
14
13 (LED)

A14/DAC
 Program
 GND
 3.3V
 VBat

GND
 0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12

RX1
TX1
TX1
RX3
TX3
RX2
TX2
DOUT
DIN
CS
CS
DOUT
DIN

Touch
Touch
PWM
PWM
PWM
PWM
PWM
PWM
PWM
PWM
Touch
Touch
Touch
Touch
Touch
Touch
C5
C5
SCL0
SDA0
SDA0
SCL0
C5
SCK
SCK

TX
RX
DOUT
DIN
CS
CS
DOUT
DIN

CAN Bus

All digital pins have interrupt capability.

95

Feature	Teensy 3.0	Teensy 3.2 Teensy 3.1	Units
Processor	MK20DX128VLH5	MK20DX256VLH7	
Core	Cortex-M4	Cortex-M4	
Rated Speed	48	72	MHz
Overclockable	96	96	MHz
Flash Memory	128	256	kbytes
Bandwidth	96	192	Mbytes/sec
Cache	32	256	Bytes
RAM	16	64	kbytes
EEPROM	2	2	kbytes
Direct Memory Access	4	16	Channels
Digital I/O	34	34	Pins
Voltage Output	3.3V	3.3V	Volts
Voltage Input	3.3V Only	5V Tolerant	Volts
Analog Input	14	21	Pins
Converters	1	2	
Resolution	16	16	Bits
Usable	13	13	Bits
Prog Gain Amp	0	2	
Touch Sensing	12	12	Pins
Comparators	2	3	
Analog Output	0	1	Pins
DAC Resolution	-	12	Bits
Timers	11 Total	12 Total	
FTM Type	2	3	
PWM Outputs	10	12	Pins
PDB Type	1	1	
CMT (infrared) Type	1	1	
LPTMR Type	1	1	
PIT (interval) Type	4	4	
SysTick	1	1	
RTC (date/time) **	1	1	
Communication			
USB	1	1	
Serial	3	3	
With FIFOs	1	2	
High Res Baud	3	3	
Fast Clock	2	2	
SPI	1	1	
With FIFOs	1	1	
I2C	1	2	
CAN Bus	0	1	
I2S Audio	1	1	
FIFO Size	4	8	

Anexo H

Hoja de datos Resina Transparente

MATERIAL DATA SHEET

Standard

Materials for High-Resolution Rapid Prototyping

High Resolution. For demanding applications, our carefully-engineered resins capture the finest features in your model.

Strength and Precision. Our resins create accurate and robust parts, ideal for rapid prototyping and product development.

Surface Finish. Perfectly smooth right out of the printer, parts printed on the Form 2 printer have the polish and finish of a final product.



CLEAR
FLGPCL04

WHITE
FLGPWH04

GREY
FLGPGR04

BLACK
FLGPBL04

COLOR
FLGPCB01

Prepared 04 . 19 . 2016
Rev 01 04 . 18 . 2017

To the best of our knowledge the information contained herein is accurate. However, Formlabs, Inc. makes no warranty, expressed or implied, regarding the accuracy of these results to be obtained from the use thereof.

Material Properties Data

The following material properties are comparable for all Formlabs Standard Resins.

	METRIC ¹		IMPERIAL ¹		METHOD
	Green ²	Post-Cured ³	Green ²	Post-Cured ³	
Tensile Properties					
Ultimate Tensile Strength	38 MPa	65 MPa	5510 psi	9380 psi	ASTM D 638-10
Tensile Modulus	1.6 GPa	2.8 GPa	234 ksi	402 ksi	ASTM D 638-10
Elongation at Failure	12 %	6.2 %	12 %	6.2 %	ASTM D 638-10
Flexural Properties					
Flexural Modulus	1.25 GPa	2.2 GPa	181 ksi	320 ksi	ASTM C 790-10
Impact Properties					
Notched IZOD	16 J/m	25 J/m	0.3 ft-lbf/in	0.46 ft-lbf/in	ASTM D 256-10
Temperature Properties					
Heat Deflection Temp. @ 264 psi	42.7 °C	58.4 °C	108.9 °F	137.1 °F	ASTM D 648-07
Heat Deflection Temp. @ 66 psi	49.7 °C	73.1 °C	121.5 °F	163.6 °F	ASTM D 648-07

¹Material properties can vary with part geometry, print orientation, print settings, and temperature.

²Data was obtained from green parts, printed using Form 2, 100 µm, Clear settings, washed and air dried without post cure.

³Data was obtained from parts printed using Form 2, 100 µm, Clear settings, and post-cured with 1.25 mW/cm² of 405 nm LED light for 60 minutes at 60 °C.

Solvent Compatibility

Percent weight gain over 24 hours for a printed and post-cured 1 x 1 x 1 cm cube immersed in respective solvent:

Solvent	24 Hour Weight Gain (%)	Solvent	24 Hour Weight Gain (%)
Acetic Acid, 5 %	< 1	Hydrogen Peroxide (3 %)	< 1
Acetone	sample cracked	Isooctane	< 1
Isopropyl Alcohol	< 1	Mineral Oil, light	< 1
Bleach, "5 % NaOCl	< 1	Mineral Oil, heavy	< 1
Butyl Acetate	< 1	Salt Water (3.5 % NaCl)	< 1
Diesel	< 1	Sodium hydroxide (0.025 %, pH = 10)	< 1
Diethyl glycol monomethyl ether	1.7	Water	< 1
Hydraulic Oil	< 1	Xylene	< 1
Skydrol 5	1	Strong Acid (HCl Conc)	distorted

HIGH RESOLUTION

For demanding applications, our carefully-engineered resins capture the finest features in your model.

STRENGTH AND PRECISION

Our resins create accurate and robust parts, ideal for our rapid prototyping and product development.

SURFACE FINISH

Perfectly smooth right out of the printer, parts printed on the Form 2 printer have the polish and finish of a final product.

**CLEAR**

Our Clear Resin polishes to near optical transparency, making it ideal for showcasing internal features.

WHITE

Our White Resin emphasizes fine details and has a matte finish with a warm, slightly ivory color.

GREY

Our Grey Resin has a smooth, matte finish and shows details beautifully without primer.

BLACK

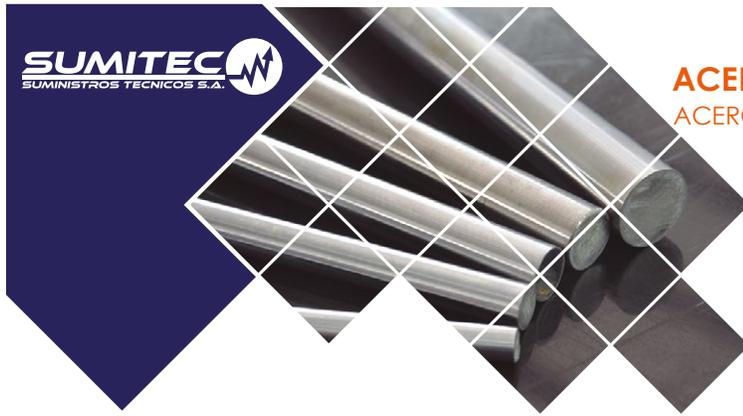
Our Black Resin's opaque matte finish rivals the look of injection-molded plastics, capable of producing incredible looks-like prototypes.

**COLOR KIT**

Color Kit contains a Color Base cartridge and five Color Pigments. Use Color Kit to mix and print matte, opaque parts in a range of colors without the manual work of finishing and painting.

Anexo I

Hoja de datos Acero 1020



ACERO GRADO MAQUINARIA

ACERO AISI-SAE 1020/18 (UNS G10180)



1. Descripción: Este acero de bajo - medio carbono tiene buena soldabilidad y ligeramente mejor maquinabilidad que los aceros con grados menores de carbono. Se presenta en condición de calibrado (acabado en frío). Debido a su alta tenacidad y baja resistencia mecánica es adecuado para componentes de maquinaria.

2. Normas involucradas: ASTM A 108

3. Propiedades mecánicas:

Dureza 126 HB (71 HRb)
 Esfuerzo de fluencia 205 - 307 MPa
 Esfuerzo máximo 20%
 Elongación máxima 20%
 Reducción de área 40%
 Módulo de elasticidad 205 GPa (29700 KSI)
 Maquinabilidad 75% (AISI 1212 = 100%)

4. Propiedades físicas: Densidad 7.87 g/cm³ (0.284 lb/in³)

5. Propiedades químicas: 1018; 0,18 - 0,23% C 1020
 0,3 - 0,6 % Mn 1020; 0,6-0,9% Mn 1018
 0.04 % P máx
 0.05 % S máx

6. Usos: Se utiliza en operaciones de deformación plástica como remachado y extrusión. Se utiliza también en componentes de maquinaria debido a su facilidad para conformarlo y soldarlo. Piezas típicas son los pines, cuñas, remaches, rodillos, piñones, pasadores, tornillos y aplicaciones de lámina

NOTA:

Los valores expresados en las propiedades mecánicas y físicas corresponden a los valores promedio que se espera cumpla el material. Tales valores son para orientar a aquella persona que debe diseñar o construir algún componente o estructura pero en ningún momento se deben considerar como valores estrictamente exactos para su uso en el diseño.

(506) 2591-7514 ☎

(506) 2551-4169 📠

info.clientes@sumitec.cr ✉



www.sumitec.cr

SUMITEC
 SUMINISTROS TÉCNICOS S.A.

Anexo J

Hoja de datos Aluminio 6061-T6



SUMITEC
SUMINISTROS TÉCNICOS S.A.

ALEACIONES DE ALUMINIO

AA 6061 T6511 (UNS A96061)



1. Descripción: Aleación de aluminio con el magnesio y el silicio. Se caracteriza por su excelente resistencia a la corrosión y se puede trabajar mucho más que otras aleaciones. Sus aplicaciones principales son las arquitectónicas y en muebles. También es utilizada en aplicaciones de transporte y marinas debido a su resistencia a la corrosión.

2. Normas involucradas: ASTM B 221

3. Propiedades mecánicas: Resistencia a la fluencia 255 MPa (37 KSI)
Resistencia máxima 290 MPa (42 KSI)
Elongación 12% (en 50mm, espesor 1.6mm)
Módulo de elasticidad 69 GPa (10000 KSI)

4. Propiedades físicas: Densidad 2.7 g/cm³ (0.0975 lb/in³)

5. Propiedades químicas: 0.8 – 1.2 % Mg
0.40 – 0.80 % Si
0.15 – 0.40 % Cu
0.04 – 0.35 % Cr
0.70 % Fe máx
0.15 % Mn máx
0.15 % Ti máx

6. Usos: Se usa para canoas, muebles, tuberías para aspiradoras, pasamanos para puentes, aplicaciones estructurales arquitectónicas y en piezas para maquinaria.

7. Tratamientos térmicos: Puede sufrir envejecimiento artificial a 177 °C con mantenimiento a esa temperatura por 8 horas. La temperatura de solubilidad es de 529°C.

NOTA:

Los valores expresados en las propiedades mecánicas y físicas corresponden a los valores promedio que se espera cumpla el material. Tales valores son para orientar a aquella persona que debe diseñar o construir algún componente o estructura pero en ningún momento se deben considerar como valores estrictamente exactos para su uso en el diseño.

(506) 2591-7514 ☎

(506) 2551-4169 📠

info.clientes@sumitec.cr ✉



www.sumitec.cr.com

SUMITEC
SUMINISTROS TÉCNICOS S.A.

Apéndice A

Código Teensy

```

//Motor
#define dirPin 4
#define stepPin 5
#define On 0
//Encoder
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
//Load Cells
#include "HX711.h"
#define DOUT 3
#define CLK 2
HX711 scale;
float calibration_factor = 21800;
//Encoder
volatile long temp, counter = 0;
//Motor
int tpasso=43.63;
int c=0;
int Pprb=200;
float F=45; //Fuerza maxima a la que llega la prueba
float FP=0;
float d=0;
void setup() {
  Serial.begin (9600);
  Serial.println("Peso" " " "Encoder");
  //Motor
  pinMode(stepPin, OUTPUT);
  pinMode(dirPin, OUTPUT);
  pinMode(On, INPUT);
  digitalWrite(dirPin, HIGH);
  //Encoder
  pinMode(7, INPUT_PULLUP);
  pinMode(6, INPUT_PULLUP);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(6), REV, RISING);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(7), FOR,
RISING);
  //Celdas de carga
  scale.begin(DOUT, CLK);
  scale.set_scale();
  scale.tare(); //Reset the scale to 0
  long zero_factor = scale.read_average(); }
void encoder() {
  if( counter != temp ){
  cli();
  temp = counter;
  sei();}}
void final(){
  counter=0;
  while (FP<=F){
// while (c<=Pprb){ //Se utiliza para hacer pruebas
  digitalWrite(dirPin, HIGH);
  digitalWrite(stepPin, HIGH);
  delay(tpaso);
  digitalWrite(stepPin, LOW);
  delay(tpaso);
  encoder();
  d=c*5.8608/1000;
  encoder();
  LC();
  Serial.print(scale.get_units(), 3);
  FP=scale.get_units(), 3);
  Serial.print("\t");
  Serial.println(d, 6);
  c=c+1;}
while (0<=c){
  digitalWrite(dirPin, LOW);
  digitalWrite(stepPin, HIGH);
  delay(tpaso);
  digitalWrite(stepPin, LOW);
  delay(tpaso);
  c=c-1;
  Serial.println("Devolviendo Motor"); }}
void loop() {
  if(digitalRead(On)==HIGH){
  c=0;
  final();
  }}
void REV() {
  if(digitalRead(7)==LOW) {
  cli();
  counter++;
  sei();
  }else{
  cli();
  counter--;
  sei();}}
void FOR() {
  if(digitalRead(6)==LOW) {
  cli();
  counter--;
  sei();
  }else{
  cli();
  counter++;
  sei(); }}
void LC() {
  scale.set_scale(calibration_factor);

```

Apéndice B

Código Matlab

```
Archivo = importdata('Prueba.txt'); %%Escribir el nombre del archivo
entre las comillas, el .txt debe estar en la misma carpeta que la progra
de matlab
A=6*4.08E-6; %% Area transversal original del objeto de prueba
L=14.225E-3; %%longitud original
l=8E-3; %%avance del tornillo sin fin
factor=5.8608E-6; %%Avance en 200 pasos del motor

sz=size(Archivo);
c=sz(1,1);
cont=0;
i=1;
j=1;

while(cont<c)
    P=Archivo(i,1);
    esf=P/A;
    x(i)=esf;

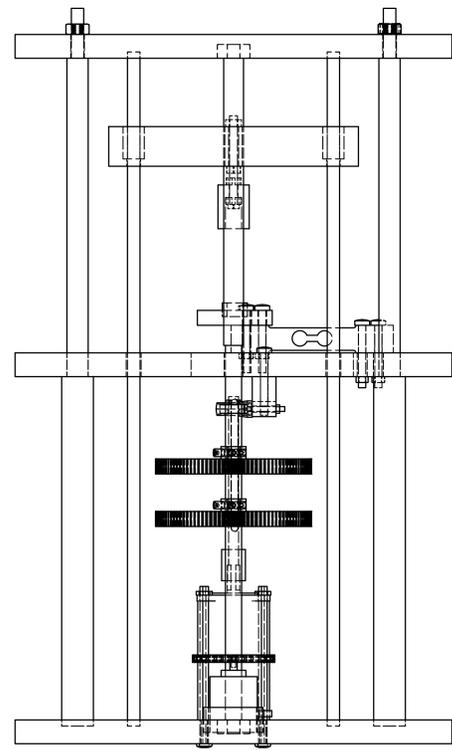
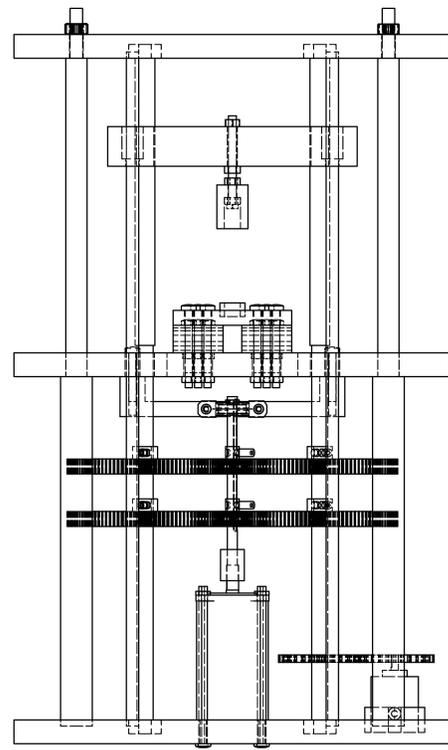
    d=Archivo(i,2);
    e=d/L;
    y(i)=e;

    i=i+1;
    cont=cont+1;
end

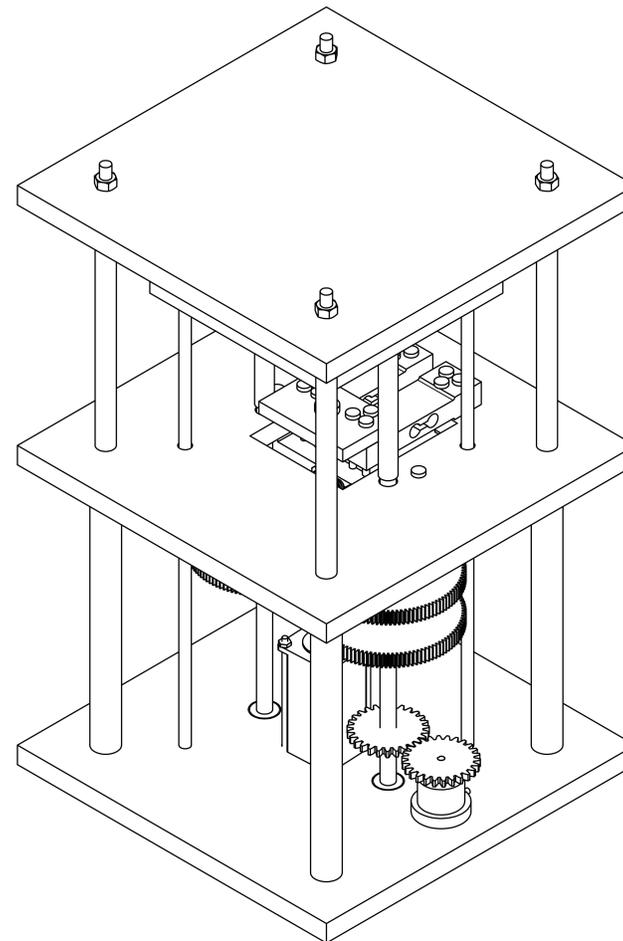
plot(x,y)
hold on
title('Diagrama Esfuerzo-Deformacion');
xlabel('\epsilon');
ylabel('\sigma');
hold on
```

Apéndice C

Planos



ITEM	QTY	PARTS LIST PART NUMBER	DESCRIPTION
1	2	Celda de carga	Pieza Estandarizada
2	1	Placa Móvil	
3	1	Tornillo de Fuerza	Pieza Estandarizada
4	4	Tuerca de Fuerza	Pieza Estandarizada
5	1	Cabeza	
6	1	Placa Soporte	
7	1	Base	
8	1	Motor	Pieza Estandarizada
9	4	Eje Guia	
10	2	Tornillos sinfin	
11	1	Soporte	
12	1	Acople Motor	
13	1	KP08	Pieza Estandarizada
14	1	608RS	Pieza Estandarizada
15	1	Arbol	
16	1	Soporte Arbol Motor	
17	4	Engranaje grande	
18	4	Soporte Mayor	
19	1	Tapa	
20	1	Soporte Encoder	
21	2	Engranaje pequeño	
22	4	M10	Pieza Estandarizada
23	1	Placa Impulsor	
24	1	Encoder	Pieza Estandarizada
25	4	Tornillo Motor	Pieza Estandarizada
26	4	Tuerca Motor	Pieza Estandarizada
27	14	Tornillo Celda de Carga	Pieza Estandarizada
28	12	Tuerca Celda de Carga	Pieza Estandarizada
29	2	Tornillo Cojinete	Pieza Estandarizada
30	2	Tuerca Cojinetes	Pieza Estandarizada
31	4	Rol Lineal	Pieza Estandarizada
32	4	Rol axial	Pieza Estandarizada
33	6	Prisionero	Pieza Estandarizada



Instituto Tecnológico de Costa Rica

Área Académica de Ingeniería Mecatrónica

Proyecto Final de Graduación

Ensamble

Máquina de Esfuerzos de Compresión

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJA	V. ACEBEY		07/08/20
VERIFICA	J. MORA		07/08/20
APRUEBA	J. MORA		07/08/20
FABRICA	V. ACEBEY		07/08/20

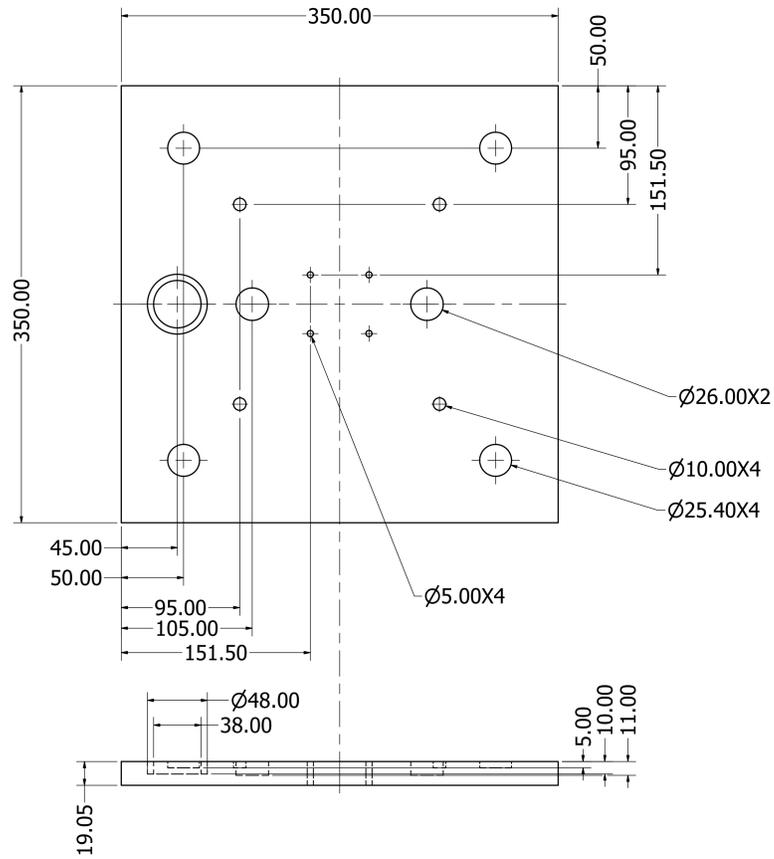
SISTEMA	ESCALA	MATERIAL	FORMATO
	1:2	N/A	A0

UNIDAD 571 HOJA 1 DE 3

Revisión:
A

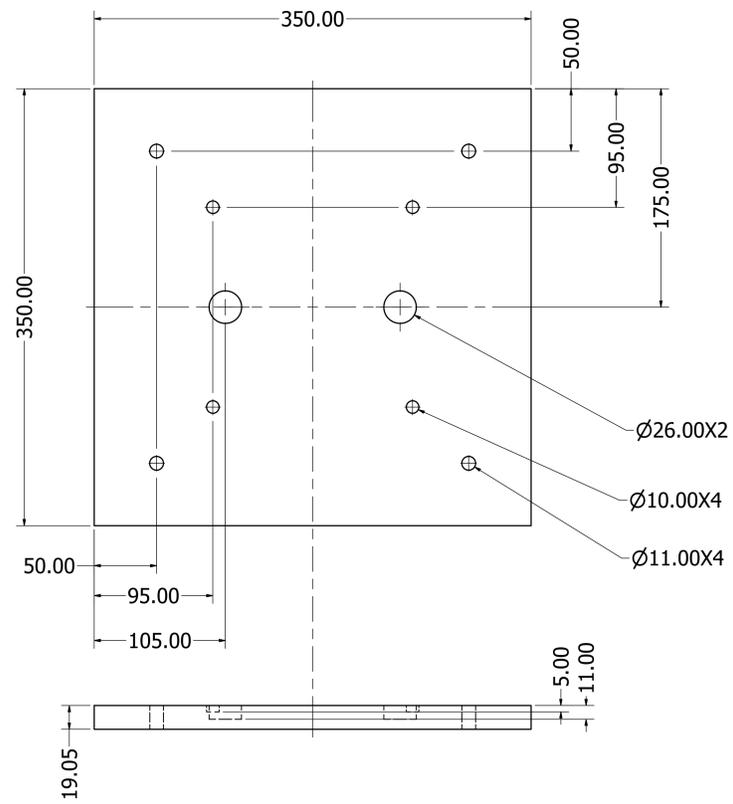
Base

Escala: 1:2



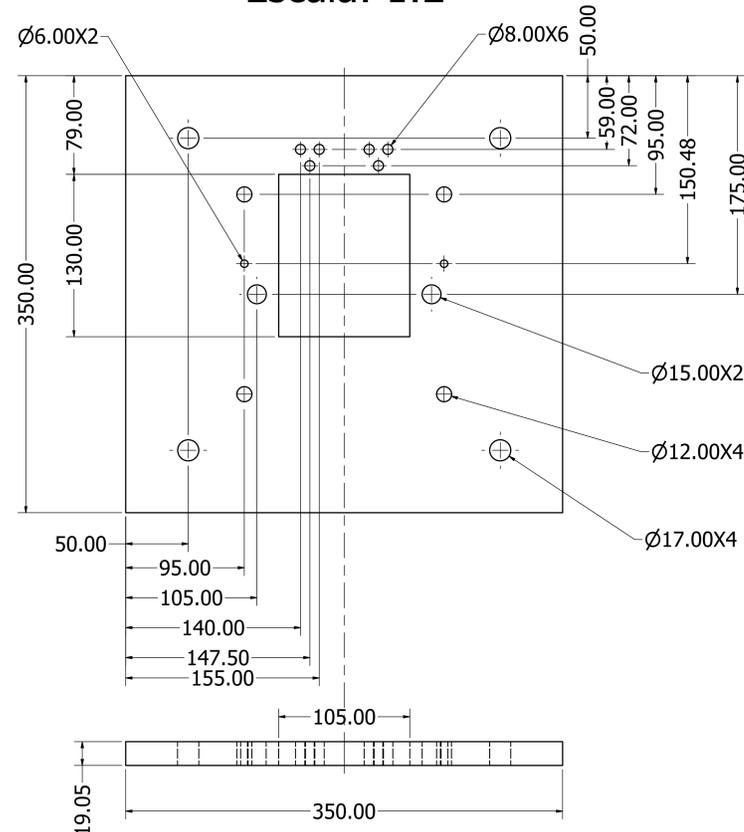
Tapa

Escala: 1:2



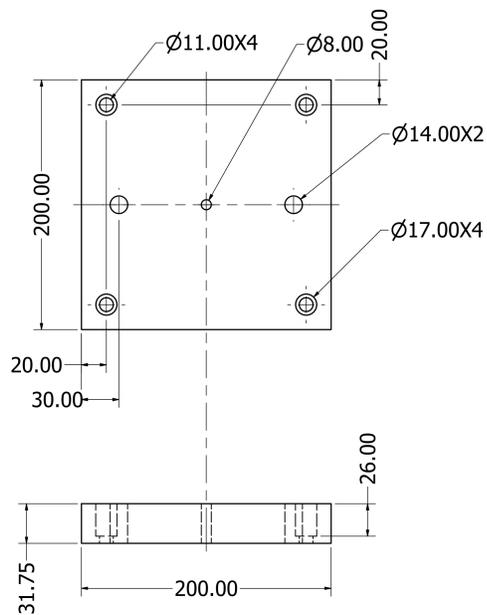
Placa Soporte

Escala: 1:2



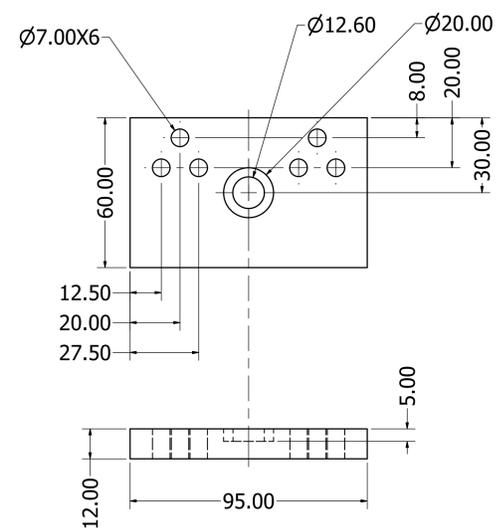
Placa Móvil

Escala: 1:2



Placa Impulsor

Escala: 1:1



Notas

Las placas se realizan de la misma lámina de hierro negro.
La lámina de hierro negro es de 3/4 pulgada, lo que equivale a 19.05mm

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Área Académica de Ingeniería Mecatrónica

Proyecto Final de Graduación

Título: Piezas Varias 1

Máquina de Esfuerzos de Compresión

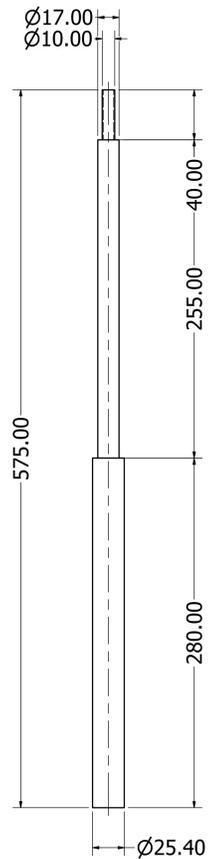
	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJA	V. ACEBEY		07/08/20
VERIFICA	J. MORA		07/08/20
APRUEBA	J. MORA		07/08/20
FABRICA	V. ACEBEY		07/08/20

SISTEMA	ESCALA	MATERIAL	FORMATO
	N/A	Aluminio	A0

UNIDADES: m HOJA 2 DE 3

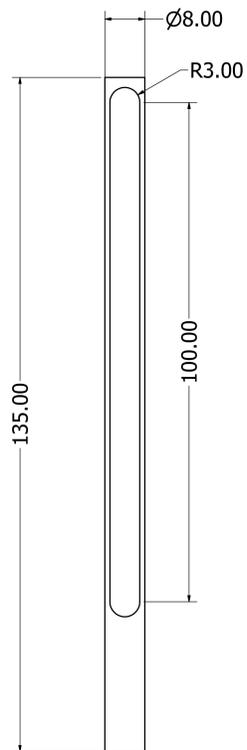
Soporte Mayor

Escala: 1:2



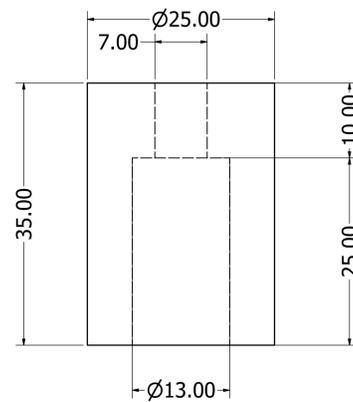
Árbol

Escala: 2:1



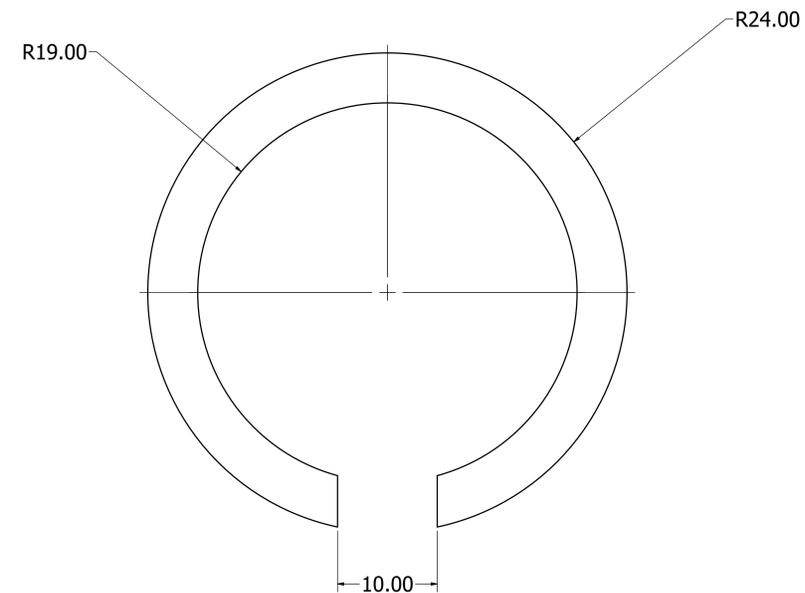
Cabeza

Escala: 3:1



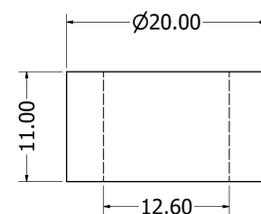
Soporte Encoder

Escala: 4:1



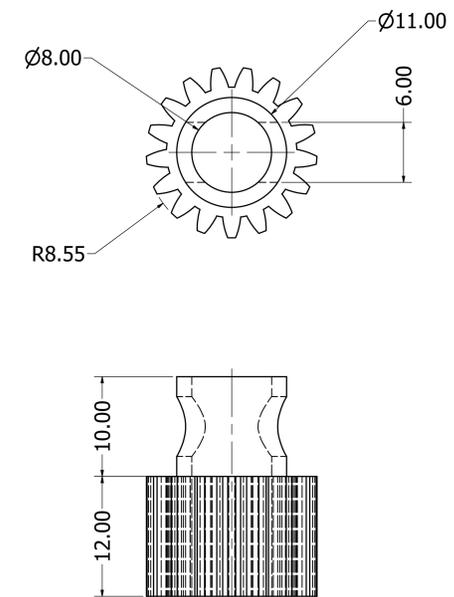
Soporte Impulsor

Escala: 3:1



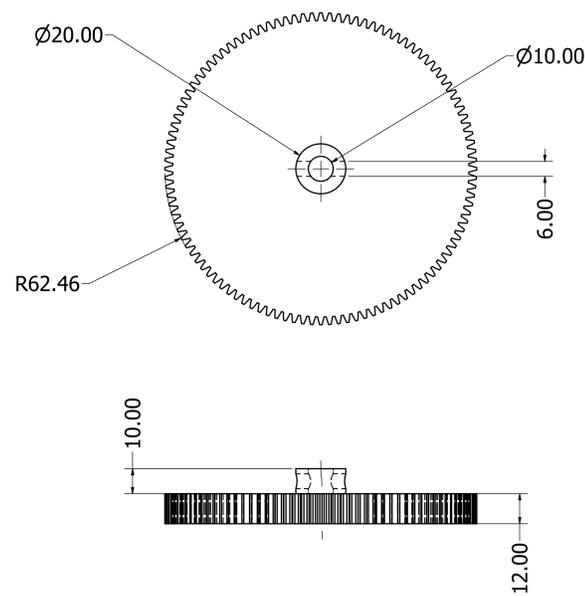
Engrane Pequeño

Escala: 4:1



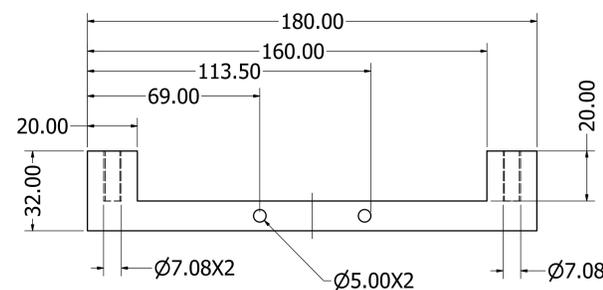
Engrane Grande

Escala: 1:1



Soporte Cojinete

Escala: 1:1



Notas

Soporte Mayor:

El material para la implementación es el acero 1020

Árbol:

El material para la implementación es el acero 1020

Cabeza:

El material para la implementación es el aluminio

Soporte Impulsor:

El material para la implementación es el aluminio

Soporte Encoder:

El material para la implementación es el aluminio. El grosor de la pieza es de 20mm

Engrane Grande:

El material para la implementación es el aluminio.

Engrane Pequeño:

El material para la implementación es el aluminio.

Soporte cojinete:

El material para la implementación es el aluminio. Su grosor es de 3/4 de pulgada o 19.05mm

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Área Académica de Ingeniería Mecatrónica

Revisión:

Proyecto Final de Graduación

A

Título:

Piezas Varias 2

Máquina de Esfuerzos de Compresión

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJA	V. ACEBEY		07/08/20
VERIFICA	J. MORA		07/08/20
APRUEBA	J. MORA		07/08/20
FABRICA	V. ACEBEY		07/08/20

SISTEMA	ESCALA	MATERIAL	FORMATO
	N/A	N/A	A0

UNIDAD: 3 DE 3

HOJA 3 DE 3