

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica
Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica



Automatización del proceso de fabricación de microfilamentos de policaprolactona

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

II Semestre 2018.

Bernal Alejandro Cordero Umaña

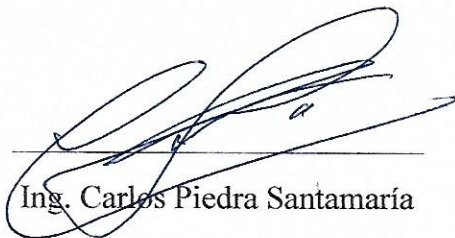
Carné: 2013015567

Noviembre, 2018

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

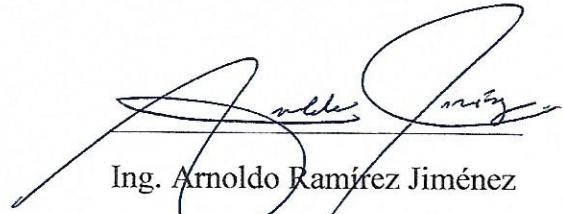
Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal



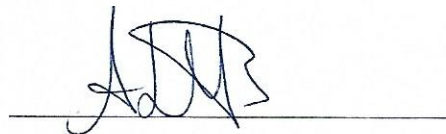
Ing. Carlos Piedra Santamaría

Profesor Lector



Ing. Arnoldo Ramírez Jiménez

Profesor Lector



Ing. Ana Lucía Morera Barquero

Profesora Asesora

Los miembros de este Tribunal 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, 16 de Noviembre del 2018

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.



Bernal Alejandro Cordero Umaña

Cédula: 1-1588-0821

Cartago, 16 de Noviembre del 2018

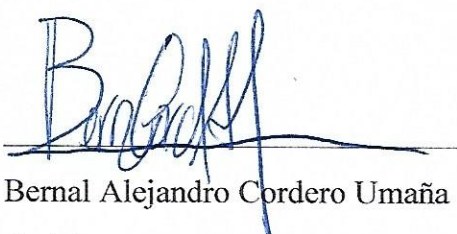
CARTA DE ENTENDIMIENTO

Señores

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Biblioteca José Figueres Ferrer

Yo, Bernal Alejandro Cordero Umaña, carné 2013015567, autorizo a la Biblioteca José Figueres Ferrer del Instituto Tecnológico de Costa Rica disponer del Trabajo Final realizado por mi persona, con título "*Automatización del proceso de fabricación de microfilamentos de policaprolactona*" para ser ubicado en el Repositorio Institucional y Catálogo SIBITEC para ser accesado a través de la red internet.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Bernal Alejandro Cordero Umaña', is written over a horizontal line.

Bernal Alejandro Cordero Umaña

Cédula: 1-1588-0821

Resumen

El Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales del ITCR se dedica a la investigación y desarrollo de nuevos compuestos y aplicaciones novedosas de estos. El proyecto que se desarrolla en este documento se deriva de una investigación en curso titulada “Desarrollo de un Sistema de Estudios In-Vitro adaptable en equipo de Pruebas Dinámicas”. En dicha investigación se pretende someter a diversas pruebas mecánicas probetas hechas de policaprolactona (PCL) para estimular el crecimiento celular en ellas. Dichas probetas pueden ser andamios que simulan la estructura ósea humana o pueden ser microfilamentos que asemejen el grosor de fibras de músculo esquelético.

En este documento se desarrolla una solución a un problema presente en el proceso de fabricación de microfilamentos de PCL. Actualmente es un proceso manual que presenta varias deficiencias como, por ejemplo, estirado manual del filamento. Esto resulta en hilos que no presentan las características dimensionales necesarias para que puedan utilizarse como probeta para la inoculación celular.

Como propuesta a solución se diseñó un sistema automático que consta de un carrete de recolección de material y dos rodillos en configuración de sistema de arrastre tipo llanta. Estos últimos se acoplan a un motor CD con control de velocidad de modo que se asegura que la tracción a la cual se somete el material extruido es constante. Dadas las propiedades mecánicas del PCL se sabe que una vez que el material sobrepasa su esfuerzo de fluencia, este se elongará reduciendo su diámetro de manera constante, siempre y cuando no se supere el esfuerzo último a tensión. Este es un sistema que es fácil de operar y cuya implementación se traduce en un mejor aprovechamiento de la materia prima que se dispone.

Palabras Clave: Policaprolactona, sistema de control, arrastre tipo llanta, tracción, extrusión, inoculación celular.

Abstract

The Mechanics of Materials Laboratory of the Costa Rican Institute of Technology School of Science and Materials Engineering dedicates itself to the research, development and innovative application of new compounds and materials. The project developed in this paper derives itself from an on-course investigation titled “Development of an In-Vitro Study System adaptable to a Dynamic Test equipment”. It is intended, in such project, to subject different specimens made of polycaprolactone (PCL) to several mechanic tests to stimulate cellular growth. The afore mentioned specimens can be scaffolds whose purpose is to mimic human bone structure or they can also be microfilaments that resemble the thickness and shape of skeleton muscle fibers.

In this document, a solution to an existing problem in the process of fabrication of PCL microfilaments is designed. At present moment, this is a manual process that presents several deficiencies such as, manual stretching of the filament. This leads to resulting threads that are unfit to be used as cellular inoculation scaffolds due to unmet dimensional characteristics requirements.

As a solution proposal to the afore stated problem, an automatic stretching system was designed. Such system includes a material recollection spool and two rollers in a tire traction system configuration. The latter are coupled to a speed-controlled DC motor to ensure that the tension to which the material is subjected is always constant. Given the mechanical properties of PCL, it is known that once the material surpasses its yield strength, it will elongate at a rate in which its thickness will be reduced at a constant rate as well, as long as the material’s ultimate strength is not exceeded. This easy to use automatic system yields a better and more efficient harness of the raw material at disposal.

Key words: Polycaprolactone, control system, tire traction system, traction, extrusion, cellular inoculation.

Dedicatoria

Dedico este trabajo Dios, quien me ha guiado, protegido y corregido y hace que todo sea posible.

A mis padres Bernal Cordero Arias y Priscilla Umaña Rojas quienes siempre brindaron todo su apoyo, sabiduría y amor incondicional.

A mis demás familiares y amigos que me acompañaron a lo largo de los años de estudio.

Agradecimientos

A mi familia por siempre apoyarme y proveer todo lo necesario para mi desarrollo académico y personal.

A mis amigos por haber caminado y crecido juntos a lo largo de los años universitarios.

A la profesora Laura Rojas Rojas y al profesor Teodolito Guillén Girón por brindar su apoyo y consejo en la realización de este proyecto.

Índice General

Resumen	5
Abstract.....	6
Dedicatoria.....	7
Agradecimientos	8
Índice General.....	9
Índice de Figuras.....	11
Índice de Gráficas	13
Índice de Tablas	13
1 Capítulo 1. Introducción.....	14
1.1 Entorno del Proyecto	14
1.2 Justificación	15
1.2.1 Definición del problema.....	15
2 Capítulo 2. Objetivos.....	17
2.1 Objetivo general.....	17
2.2 Objetivos específicos	17
2.3 Procedimiento para la ejecución del proyecto	18
2.3.1 Determinar las variables de control	18
2.3.2 Diseño de un sistema de control automático.....	18
2.3.3 Diseño del mecanismo	18
2.3.4 Plan de mantenimiento.....	18
2.3.5 Análisis Económico	20
3 Capítulo 3. Marco teórico.....	21
3.1 Policaprolactona o PCL:	21
3.1.1 Reseña histórica:	21
3.1.2 Aplicación en dispositivos médicos:.....	22
3.1.3 Aplicación en ingeniería de tejidos:.....	22
3.2 Técnicas de manufactura de andamios y filamentos.....	24
3.2.1 Lixiviación porógena:	24
3.2.2 Espumado con gas:.....	25
3.2.3 Electrospinning o electrohilado:	25
3.2.4 Deposición de material fundido:.....	27

3.2.5	Extrusión de materia prima granular.....	28
3.3	Propiedades mecánicas del PCL:	29
3.3.1	Resistencia a la tensión:	30
3.3.2	Propiedades de flexión:	31
3.3.3	Resistencia a la compresión:	31
3.3.4	Condiciones que afectan las propiedades mecánicas del PCL:.....	32
4	Capítulo 4. Estudio del proceso de fabricación actual.	34
4.1	Primera Fase:	34
4.2	Segunda fase:	35
4.3	Deficiencias encontradas en el método actual	36
5	Capítulo 5. Propuestas a solución	38
5.1	Descripción general de propuestas de solución	38
5.2	Requerimientos del sistema:	39
5.3	Candidatos a solución	42
5.3.1	Propuesta 1	42
5.3.2	Propuesta 2	43
5.3.3	Propuesta 3	45
5.4	Comparación de propuestas:	47
5.5	Selección de propuesta final	50
6	Capítulo 6. Diseño.....	51
6.1	Descripción General:	51
6.2	Pruebas realizadas previo al diseño del sistema:	51
6.2.1	Sistema de control de velocidad para motor sin codificador incorporado:	51
6.2.2	Medición de tasa de extrusión actual.	59
6.3	Diseño mecánico de la máquina	61
6.3.1	Rodillos:	61
6.3.2	Ejes:.....	64
6.3.3	Análisis de Fatiga:.....	70
6.3.4	Chasis:.....	71
6.4	Sistema Electrónico:	73
6.4.1	Fuente de alimentación:	74
6.4.2	Sistema de control:	76

6.4.3	Filamentos Resultantes Teóricos	80
6.4.4	Control de velocidad:	80
6.4.5	Control:	84
6.4.6	Interfaz Humano-Máquina:.....	87
6.4.7	Medición del filamento resultante.....	88
7	Capítulo 7. Resultados.....	89
7.1	Resultados Experimentales	89
7.2	Análisis Financiero.	90
7.2.1	Costo.	90
8	Capítulo 8. Conclusiones y Recomendaciones	93
8.1	Conclusiones	93
8.2	Recomendaciones	93
9	Bibliografía.....	94
10	Anexos.....	96
A1.	Manual de usuario.....	96
A2.	Plan de Verificación.....	100
A3.	Plan de Validación	101
A4.	Hoja de especificación de motor CD	102
A5.	Código para microcontrolador	103
A6.	Plan de Mantenimiento	107
A7.	Planos Mecánicos	109

Índice de Figuras

Figura 1.1	Micrografía de microfilamento de PCL	16
Figura 1.2	Micrografía de microfilamentos de PCL.....	16
Figura 3.1	Esquema general del procedimiento de lixiviación porógena.....	24
Figura 3.2	Andamio fabricado por lixiviación porógena.....	25
Figura 3.3	Esquema de sistema de electrospinning	26
Figura 3.4	Nanofibras de PCL obtenidas por electrohilado.....	27
Figura 3.5	Andamio fabricado por FDM	28
Figura 3.6	Diagrama del mecanismo de extrusión	29
Figura 4.1	Sistema de arrastre	34
Figura 5.1	Diagrama de bloques general del sistema	39
Figura 5.2	Propuesta 1	43
Figura 5.3	Propuesta 2	44

Figura 5.4 Propuesta 3.	46
Figura 6.1 Dibujo del perfil del diente.....	53
Figura 6.2 Engrane con diámetro de paso 80 mm	53
Figura 6.3 Piñón con diámetro de paso de 20 mm.	54
Figura 6.4 Diagrama de esfuerzo cortante	55
Figura 6.5 Gráfica de esfuerzo a flexión	55
Figura 6.6 Eje del sistema de control.....	55
Figura 6.7. Rueda con agujeros	56
Figura 6.8 Prueba de concepto 1.....	57
Figura 6.9 Ensamble sistema de control.....	57
Figura 6.10 Sistema de medición de velocidad	58
Figura 6.11 Lectura de velocidad cada 1000 ms.	58
Figura 6.12 Lectura de velocidad cada 100 ms.	59
Figura 6.13 Eje para rodillos.	64
Figura 6.14 Eje para carrete.....	64
Figura 6.15 Diagrama de esfuerzo cortante eje para rodillos.	65
Figura 6.16 Curva de momento flector de eje para rodillo.....	65
Figura 6.17 Esfuerzos percibidos por el eje para rodillos.	65
Figura 6.18 Diagrama de esfuerzo cortante eje para carrete.....	66
Figura 6.19 Curva de momento flector para eje carrete.	66
Figura 6.20 Esfuerzos percibidos por el eje para carrete.....	66
Figura 6.21. Simulación de esfuerzos eje para rodillos	68
Figura 6.22 Simulación de esfuerzos eje para carrete.	68
Figura 6.23 Simulación de esfuerzos torsionales en eje para rodillos.....	69
Figura 6.24 Simulación de esfuerzos torsionales en eje para carrete	69
Figura 6.25 Simulación de esfuerzos torsionales en acople de motor.....	69
Figura 6.26 Chasis de la máquina.....	72
Figura 6.27 Simulación de esfuerzos en chasis de máquina.....	72
Figura 6.28 Sistema ensamblado.	73
Figura 6.29 Vista interna del sistema ensamblado	73
Figura 6.30 Señal en la bobina secundaria del transformador.....	74
Figura 6.31 Señal obtenida del puente de diodos.	75
Figura 6.32 Señal Rectificada.....	75
Figura 6.33 Señal de salida del circuito acondicionador de señal	76
Figura 6.34 Circuito acondicionador de señal.	76
Figura 6.35 Motor 76 RPM	79
Figura 6.36 Driver con doble puente H para control dual de motor CD	80
Figura 6.37 Circuito equivalente de un motor CD	81
Figura 6.38 Respuesta a lazo abierto del motor CD	84
Figura 6.39 Respuesta a lazo abierto de motor CD.	85
Figura 6.40 Lazo de control de motor CD.....	86
Figura 6.41 Respuesta a lazo cerrado de la planta.....	87
Figura 6.42 Interfaz humano-máquina	87

Figura 6.43 Indicador digital	88
Figura 7.1 Sistema completo	92
Figura A 1 Carrete y Rodillos.....	96
Figura A 2 Interruptor y pantalla HMI	97
Figura A 3 Interfaz HMI.....	97
Figura A 4 Tornillo de sujeción carrete	99

Índice de Gráficas

Gráfica 3.1 Curva de resistencia a la tensión de 3 probetas de PCL.	30
Gráfica 3.2. Prueba de la flexión del PCL.	31
Gráfica 3.3. Prueba de compresión del PCL.....	32

Índice de Tablas

Tabla 3.1 Propiedades mecánicas del PCL con diversas temperaturas y tasas de deformación	32
Tabla 5.2 Comparación de técnicas de fabricación de filamentos.....	38
Tabla 5.1 Lluvia de ideas	41
Tabla 5.3 Cotización preliminar del candidato 1	43
Tabla 5.4 Cotización preliminar propuesta 2.....	45
Tabla 5.5 Cotización preliminar propuesta 3.....	46
Tabla 5.6 Ventajas y desventajas de propuesta 1	47
Tabla 5.7 Ventajas y desventajas de propuesta 2.	48
Tabla 5.8 Ventajas y desventajas de propuesta 3	49
Tabla 6.1 Ecuaciones de un engrane.....	52
Tabla 6.2 Ecuaciones del piñón	54
Tabla 6.3 Datos para tasa de extrusión	59
Tabla 6.10 Materiales para recubrimiento de rodillos.	62
Tabla 6.11 Materiales para fabricar ejes.	67
Tabla 6.12 Factores de corrección para la resistencia a la fatiga.....	71
Tabla 6.4 Datos recopilados del experimento.....	77
Tabla 6.5 Parámetros del modelo de un motor CD	81
Tabla 6.6 Parámetros calculados para motor CD	84
Tabla 6.7 Fórmulas para parámetros de PID	85
Tabla 6.8 Parámetros ajustables de un PID	86
Tabla 6.9 Comparación de dispositivos de medición	88
Tabla 7.1 Resultados experimentales	89
Tabla 7.2 Costo de componentes por adquirir	90
Tabla 7.3 Costo de partes que requieren maquinado (Prototipo)	91

1 Capítulo 1. Introducción

1.1 Entorno del Proyecto

La Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica, se caracteriza por mantenerse a la vanguardia en cuanto a desarrollo, técnica y aplicación de los diversos materiales que se desarrollan en el mundo. Clásicamente las investigaciones se han enfocado hacia la aplicación industrial de los materiales, con el fin de que el sector productivo mejore la calidad de los productos, sin embargo, el alto desarrollo tecnológico ha llevado a que las investigaciones se centren en explorar aplicaciones en campos en donde se tendría un impacto directo en las vidas de las personas.

De esta manera considerando que en el mundo existen muchas personas que por diversas razones requieren implantes o prótesis de diferentes tipos, la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales consideró oportuno investigar respecto a los materiales necesarios para desarrollar este tipo de artefacto. En este caso, inicialmente a través del proyecto “Desarrollo de un Sistema de Estudios In-Vitro adaptable en equipo de Pruebas Dinámicas”, se trata entender el comportamiento natural del cuerpo humano, centrándose en el funcionamiento de los músculos y las células que los conforman. El objetivo a largo plazo de esta investigación es desarrollar un método en el cual se podrán cultivar células propias del paciente sobre una prótesis de modo que esta no sea rechazada.

Esta investigación tiene entre sus objetivos llegar a desarrollar una estructura que reproduzca las condiciones fisiológicas de una fibra de músculo esquelético. Para fabricar esta estructura se deben considerar microfilamentos de policaprolactona (PCL), las células que se implantarán y las condiciones donde se hará el crecimiento y diferenciación celular. Se busca construir una cámara de ambiente controlado que regule las condiciones de crecimiento y diferenciación celular, además que la cámara pueda ser sometida a una máquina de ensayos mecánicos.

El éxito de este proyecto depende en que se logre hacer la inoculación celular sobre las probetas que están formadas por microfilamentos de PCL. En el caso específico de los microfilamentos es de gran importancia que sean de un grosor uniforme y menor a 0.1 mm en un tramo de al menos 20 cm. Si el microfilamento no cumple con estas condiciones, entonces las células que se pretenden inocular no recubrirán la superficie. Por esta razón es que surge la necesidad de establecer un protocolo estándar para la fabricación de los microfilamentos y así garantizar que éstos cumplirán con los requisitos establecidos. Se ha determinado que el diseño de un sistema mecatrónico es oportuno para mejorar la producción y homogenizar su diámetro y su superficie, el sistema mecatrónico integrará elementos electrónicos, mecánicos y computacionales para generar una solución eficiente a la producción de los microfilamentos.

1.2 Justificación

1.2.1 Definición del problema

1.2.1.1 Generalidades

Los investigadores de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales del Instituto Tecnológico de Costa Rica están desarrollando el proyecto titulado “Desarrollo de un Sistema de Estudios In-Vitro adaptable en equipo de Pruebas Dinámicas” y han determinado que el proceso de fabricación de microfilamentos de policaprolactona (PCL), necesarios para el desarrollo del proyecto, no cuentan con un proceso de fabricación estandarizado por lo que los resultados de la fabricación son variables y no homogéneos. Por esta razón, a la hora de evaluar la calidad del producto final obtenido, a través de una microscopía electrónica (ver Figura 1.), se evidencia que cada uno de los microfilamentos producidos presenta imperfecciones, entre ellas, los microfilamentos tienen un grosor variable el cual es mayor al de una fibra muscular (0.1 mm). En consecuencia, la adherencia y distribución de los microorganismos que se pretenden cultivar en la cámara de ambiente controlado se verá afectada ya que éstos no se distribuirán uniformemente en la superficie de los filamentos dado que no se logra simular las características dimensionales de una fibra de músculo esquelético normal y por lo tanto su reproducción y diferenciación se puede ver afectada.

El proceso de fabricación de los microfilamentos comienza cuando el PCL se introduce en forma de granos en la extrusora marca “Filabot” modelo “Ex2”, con esta extrusora es posible obtener un filamento de 2.85 mm de grosor. Una vez que se ha recolectado suficiente material proveniente de la extrusora, éste se introduce a través de la boquilla caliente de una impresora 3D, obteniéndose así un segundo filamento de 0.4 mm de grosor. Cabe destacar que, en esta etapa del proceso de fabricación, el filamento que se introduce en la impresora 3D se va extruyendo a través de la boquilla de manera manual, por lo que la presión con la que se introduce depende en gran medida del operario, por lo tanto, la cantidad de material que llega a la boquilla es variable y el diámetro del filamento se verá directamente afectado por esto. El paso final para la obtención del microfilamento consiste en someter el filamento de 0.4 mm de grosor a una tensión externa que permite que éste se estire hasta el diámetro deseado; la tensión a la que se somete el filamento también es variable y depende del operario puesto que se realiza manualmente. El material debe tensionarse hasta que la reducción de su diámetro sea tal que el filamento posea menos de 0.1 mm de diámetro. El método actual no permite garantizar uniformidad en el diámetro del filamento obtenido.

En la figura 1.1 y 1.2, se puede ver una comparación de diferentes microfilamentos fabricados siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. Se puede apreciar el hecho de que presentan un grosor que no es uniforme en su longitud y numerosas irregularidades en forma de bultos en la superficie.

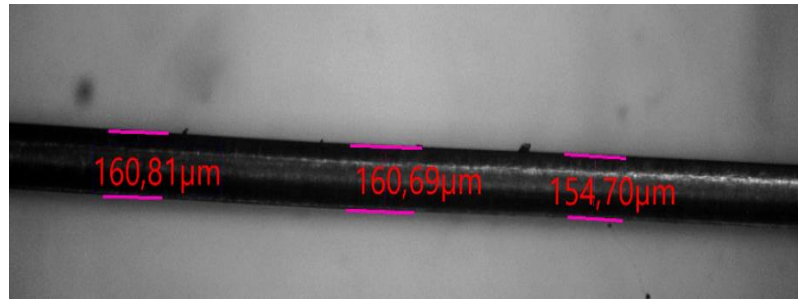


Figura 1.1 Micrografía de microfilamento de PCL

Fuente: Rojas, L (2018) Desarrollo de un Sistema de Estudios In-Vitro adaptable en equipo de Pruebas Dinámicas [Imagen] Reimpresión autorizada

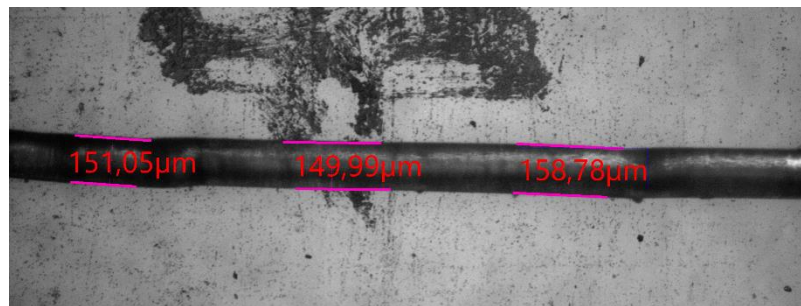


Figura 1.2 Micrografía de microfilamentos de PCL

Fuente: Rojas, L (2018) Desarrollo de un Sistema de Estudios In-Vitro adaptable en equipo de Pruebas Dinámicas [Imagen] Reimpresión autorizada

Al considerar la problemática anteriormente descrita se determina que para poder plantear una solución es necesario determinar qué parámetros son los que afectan la calidad del filamento. Para esto se analizarán las dos etapas de fabricación que se siguen actualmente en el laboratorio. En la primera etapa se buscará cómo es que la temperatura y tasa de extrusión afectan las características dimensionales del filamento. La segunda etapa que se estudiará es la manera en que se logra obtener una reducción del diámetro. Para esto se tomarán en cuenta las propiedades mecánicas del filamento, tales como el esfuerzo de fluencia y resistencia a la compresión.

1.2.1.2 Síntesis del problema

Se necesita diseñar un sistema mecatrónico que automatice la fabricación de microfilamentos de PCL para que estos cumplan con el estándar de calidad que los investigadores de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales han establecido.

2 Capítulo 2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Diseñar un sistema mecatrónico que automatice la fabricación de los microfilamentos de policaprolactona que cumplan con el estándar de calidad definido por los investigadores del laboratorio de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales.

2.2 Objetivos específicos

1. Identificar deficiencias y parámetros de control en el sistema de fabricación actual.
 - a) Entregable: Evaluación del sistema de fabricación actual.
2. Diseñar un sistema mecatrónico que integre los sistemas mecánicos y electrónicos necesarios para la fabricación de microfilamentos con grosor menor a 0.1 mm.
 - a) Entregable: Simulación de la respuesta de la planta ante el lazo de control diseñado.
 - b) Indicador: Respuesta estable de la planta ante perturbaciones.
 - c) Entregable: Planos mecánicos del prototipo.
 - d) Entregable: Planos eléctricos del prototipo.
3. Formular un plan de mantenimiento para cumplir con los rangos de operación.
 - a) Entregable: Plan de mantenimiento.
4. Realizar un análisis financiero que muestre el costo y el beneficio del proyecto.
 - a) Entregable: Análisis financiero del proyecto.

2.3 Procedimiento para la ejecución del proyecto

2.3.1 Determinar las variables de control

Las variables de control se determinarán a partir de un estudio del proceso de fabricación actual. En este se determinan los factores que afectan directamente el grosor del microfilamento final. Como parte de la búsqueda bibliográfica se buscará comprender las propiedades físicas del material para determinar su comportamiento frente a esfuerzos mecánicos y cambios de temperatura.

2.3.2 Diseño de un sistema de control automático

Una vez que se han determinado las variables de control necesarias se procederá a realizar un modelado de la planta. Este modelo se determinará para poder plantear un sistema de control automático que haga que la planta presente un comportamiento estable frente a perturbaciones. La simulación del control se realizará haciendo uso del software Matlab con la herramienta Simulink.

2.3.3 Diseño del mecanismo

En esta etapa del proyecto se seleccionarán los componentes mecánicos necesarios para el diseño del mecanismo. El mecanismo que se diseñará se desarrollará haciendo uso de herramientas de software como por ejemplo SolidWorks. Este es un software adecuado para hacer el modelado y diseño de los planos de las partes mecánicas. Éste tiene la facilidad de que los planos se pueden exportar a formatos como PDF de modo que se puede armar rápidamente una maqueta haciendo uso de recursos como una cortadora láser, entre otras.

2.3.4 Plan de mantenimiento

El plan de mantenimiento es el documento en el cual se describe el conjunto de acciones y tareas que los operarios de un sistema deben seguir para asegurar que este funcionará de acuerdo con lo esperado. Para elaborar dicho plan se deben considerar los aspectos que se enlistan a continuación:

- Función
- Falla funcional
- Modo de falla
- Efectos de la falla
- Consecuencias de la falla
- Acciones preventivas:
 - a) Frecuencia con la que se llevan a cabo las acciones preventivas.
 - b) Tiempo estimado para realizar cada acción preventiva.
 - c) Costo de las labores de mantenimiento.

Función:

La primera parte que se debe definir es la función del equipo en cuestión. Ésta debe de indicar la razón por la cual se adquirió el equipo o bien la necesidad que este satisface. A la hora de indicar la función no basta con mencionar la acción que el equipo realiza, sino que además se debe de agregar el parámetro de funcionamiento. En este caso, el término parámetro de funcionamiento se refiere a una especificación cuantitativa de la función que el equipo está realizando. (Barreda, 2015)

Falla funcional:

En este apartado se debe identificar cómo puede fallar cada elemento en la realización de sus funciones. El término falla funcional se refiere a la incapacidad de un equipo para satisfacer el estándar deseado de funcionamiento. (Moubray, 2004)

Modo de falla:

Los hechos que causan la falla son los que se denominan modos de falla. Estos se pueden determinar únicamente después de que se ha indicado la falla funcional. Se deben enlistar solo los modos de falla que razonablemente puedan ser el origen de la avería. Moubray (2004) indica: “Cuando se está realizando este paso, es importante identificar cuál es la causa origen de cada falla. Esto asegura que no se malgaste el tiempo y el esfuerzo tratando los síntomas en lugar de las causas.”

Efectos de falla:

Los efectos de falla indican las posibles implicaciones de no realizar ninguna tarea para anticipar o detectar una falla. A la hora de describir el efecto de falla es necesario evaluar:

1. Evidencia de que la falla se haya dado.
2. Existe amenaza a la seguridad del operario o del medio ambiente.
3. Efecto sobre la producción.
4. Pasos que seguir para devolver la función al sistema.

Consecuencia de la falla:

Este apartado es el que justifica si las acciones preventivas deben realizarse o no. Según Barreda (2015) las tareas preventivas se llevarán a cabo solo si al realizarlas se pueden evitar las consecuencias de falla. Las consecuencias de falla se dividen en cuatro categorías:

1. Fallas ocultas: Este tipo de falla no tiene algún efecto negativo directo sobre el sistema o la producción misma, sin embargo, si no se le presta atención y la falla se presenta, esto podría desencadenar que se presenten múltiples fallas y consecuencias graves.
2. Seguridad y medio ambiente: Una falla presenta consecuencias a la seguridad o medioambientales cuando no cumple con las regulaciones establecidas.
3. Operacional: Estas consecuencias de falla se traducen en pérdidas económicas ya que se ven reflejadas en costos de reparación de los equipos averiados y reducción de la producción.

Acciones preventivas:

Es el conjunto de tareas que se llevarán a cabo para prevenir las fallas que se han estimado podrían ocurrir. Dichas tareas se realizarán con una frecuencia que se define para cada una y se especifica el lapso que se destinará para llevarlas a cabo. Finalmente se indica el costo implícito que conlleva cada una. (Barreda, 2015)

2.3.5 Análisis Económico

Se elabora un análisis económico para cuantificar el impacto monetario del proyecto. En este informe se muestra el costo total del proyecto y se analiza el beneficio que se obtendría del proyecto.

3 Capítulo 3. Marco teórico

3.1 Policaprolactona o PCL:

3.1.1 Reseña histórica:

La policaprolactona es un polímero alifático lineal semicristalino que se sintetizó por primera vez en la década de 1930. Debido al gran interés que existía por identificar polímeros que fueran biodegradables fue que se llegó a convertir en un producto comercial. El PCL es un polímero hidrofóbico y semi-cristalino que presenta una buena solubilidad y un bajo punto de fusión el cual por lo general se encuentra entre 59 °C y 64 °C. Se determinó que es un material el cual presenta propiedades ventajosas como por ejemplo su versatilidad para tomar distintas formas y la facilidad con la que se puede manufacturar. De manera adicional, se pueden añadir grupos funcionales para modificar sus propiedades químicas, como por ejemplo hacer que se vuelva más hidrofílico, adhesivo o biocompatible. En las décadas de 1970 y 1980 se comenzaron a hacer más investigaciones para ampliar los usos de este polímero, entre ellos, se destaca la aplicación en dispositivos médicos, específicamente en artefactos diseñados para administrar medicamentos. (Woodruff & Hutmacher, 2010)

A pesar de que inicialmente la policaprolactona presentó un atractivo muy grande para la industria biomédica, rápidamente fue desplazada por otros polímeros resorbibles que se utilizaban en la época, como por ejemplo los polímeros polilácticos y poliglicólicos. Dichos materiales se utilizaron para crear cápsulas que debían administrar algún medicamento en cuestión de días o semanas con una reabsorción completa en dos a cuatro meses después de la implantación. El interés más grande que existía por parte de la industria médica era llegar a reemplazar dispositivos metálicos como placas, tornillos y clavos por materiales biodegradables, sin embargo, las propiedades mecánicas del PCL no permitían que el material se adaptara a la aplicación.

El interés en el uso del PCL reapareció cuando se dio el nacimiento de una nueva área de estudio que se llamó “Ingeniería de Tejidos”. Este resurgimiento se dio al inicio de la década de 1990 y fue gracias a que las investigaciones que se realizaron demostraron que la policaprolactona presenta mejores propiedades desde un punto de vista reológico y viscoelástico cuando se compara con otros polímeros. Por otro lado, desde un punto de vista económico, el PCL resulta ser más costo efectivo debido a que la mayoría de los dispositivos médicos utilizados para administrar medicamentos ya cuentan con la aprobación por parte de la FDA. (Langer & Vacanti, 1993)

Al referirse a biopolímeros es importante tomar en cuenta que el hecho de que un material presente una cualidad biodegradable no implica que este sea biorresorbible, es decir, que a medida que se degrada y se desplaza de su sitio de acción in vivo, el cuerpo extraño no es removido del cuerpo. En contraste, la biorreabsorbibilidad es un término que se refiere a la total eliminación del objeto extraño inicial a través de la degradación del material en subproductos que no dejan efectos residuales.

El PCL es un polímero que puede ser biodegradado por organismos como bacterias y hongos que se encuentren en un ambiente in vitro. La fisiología animal y humana hace que

no sea posible biodegradar este material dado que no cuenta con la producción de las enzimas necesarias. El PCL se puede considerar como un material biorresorbible bajo condiciones fisiológicas específicas, sin embargo, el proceso toma mucho tiempo por lo que el polímero primero sufre una degradación hidrolítica.

Una característica importante que se debe tomar en cuenta cuando se trata con materiales para la aplicación en el área biomédica es la biocompatibilidad. Este es un término que se refiere a la habilidad de un material para desempeñar su función con una respuesta aceptable por parte del organismo anfitrión. Los estudios más recientes buscan dar una definición más acertada. Por ejemplo, la biocompatibilidad *in vitro* por lo general se evalúa a través de cultivos celulares. Por otra parte, también se estudian las respuestas inmunogénicas y carcinogénicas del anfitrión frente a implantes por medio de exámenes experimentales, histológicos y patológicos. La complejidad de estas respuestas es resultado de una serie de procesos que involucran muchos mecanismos interdependientes de interacciones entre el tejido y el material implantado. Estas interacciones son las que finalmente controlan el desempeño de un material en un medio biológico. Si se considera el campo de los materiales bioestables, se evidencia que el objetivo que por lo general se persigue es el de minimizar las interacciones entre el material y el tejido. Esto es para crear una interacción aceptable y estable para terapias y tratamientos que son a largo plazo. Si se compara con el campo de los materiales biodegradables y biorresorbibles se puede notar como el objetivo es contrario al de los materiales bioestables. En esta área lo que se busca es generar una interacción entre el tejido y el material añadiendo la complejidad brindada por los procesos de degradación del material.

3.1.2 Aplicación en dispositivos médicos:

La policaprolactona es un material que como se ha mencionado anteriormente posee muchas aplicaciones en el campo de la medicina. Un ejemplo del uso del PCL son los recubrimientos de heridas. El PCL se utiliza como una película ultradelgada que se utiliza para cubrir heridas cutáneas. También se ha utilizado como medio para distribuir un antiséptico químico llamado clorhexidina. Al mezclar la policaprolactona con el complejo polimérico antimicrobial vinilpirrolidona se provee de un biomaterial para la uretra con una incrustación reducida.

Otro ejemplo de aplicación de la policaprolactona es su uso en dispositivos anticonceptivos. Se estima que por lo menos diez millones de mujeres han utilizado implantes subdérmicos. A menudo dichos implantes requieren de operaciones traumáticas para remover el implante cuando ya ha dejado de funcionar o si el paciente desea dejarlo de usar. Esto ha generado que las compañías dedicadas a este sector inviertan recursos en investigación para desarrollar implantes que posean una matriz biodegradable para eludir las operaciones quirúrgicas para recuperar el dispositivo anticonceptivo.

3.1.3 Aplicación en ingeniería de tejidos:

La ingeniería de tejidos se define como: “un campo interdisciplinario que aplica los principios de la ingeniería y ciencias naturales para el desarrollo de sustitutos biológicos que restauran, mantienen o mejoran la función del tejido o de un órgano completo” (Langer &

Vacanti, 1993). Si bien es cierto hace años este sector era considerado como una rama de los biomateriales, hoy día se puede considerar como un campo aparte dado el crecimiento en importancia y aplicación que ha tenido. La ingeniería de tejidos se puede asociar con aplicaciones enfocadas en reparar o reemplazar porciones de hueso, cartílago, vejiga o vasos sanguíneos. El término también ha sido ampliamente utilizado en investigaciones donde se busca recrear algunas funciones bioquímicas específicas usando células en sistemas de soporte artificiales, por ejemplo, un páncreas o hígado artificial. (Hutmacher, 2000)

Numerosos desarrollos han llevado a que se diseñe una serie de técnicas para reemplazar partes e implementar estrategias. Avances en biomateriales, células madre, factores de crecimiento y diferenciación y ambientes biomiméticos han creado oportunidades únicas para fabricar tejidos en laboratorios. Estos tejidos provienen de combinaciones de matrices extracelulares con células y moléculas biológicamente activas. Las matrices de crecimiento celular deben ser aptas para la inoculación celular, proliferación y diferenciación in vitro. De esta manera eventualmente podrán ser trasplantadas in vivo. Dentro de los retos que enfrenta la ingeniería de tejidos hoy día se encuentra la necesidad de desarrollar una funcionalidad más compleja, así como mejorar la estabilidad tanto funcional como biomecánica en los tejidos cultivados en el laboratorio.

Existe una gran variedad de técnicas de manufactura de matrices para la inoculación celular. Siempre es necesario que se preste atención a las especificaciones requeridas en cada caso y entender los factores que se cruzan dependiendo de la necesidad presentada ya que de esta forma es que los criterios de diseño y escogencia del material se ven afectados. Por lo general lo que se busca es que la degradación del material vaya de acuerdo con la producción del tejido que se va produciendo naturalmente por parte de las células. La dinámica de la degradación y reabsorción de la matriz celular se diseña para permitir que las células que han sido inoculadas puedan proliferar y secretar su propia matriz extracelular. La matriz artificial debería ir paulatinamente reabsorbiéndose para que quede espacio suficiente para que el nuevo tejido pueda crecer.

Según Hutmacher et al (2000), las características que una matriz de inoculación celular ideal debe tener son:

- Estructuras tridimensionales con una estructura interconectada y altamente porosa.
- Biocompatible y biorresorbible con una tasa de degradación controlable.
- Superficie que permita la adhesión, proliferación y diferenciación.
- Propiedades mecánicas que concuerden con las del tejido en la zona de la implantación.

Las matrices de inoculación celular se han convertido en un tema de estudio muy importante por lo que se han desarrollado muchas formas de fabricarlas. El PCL ha demostrado ser un material especialmente adaptado para este tipo de aplicación debido a que cumple con las condiciones ideales presentadas anteriormente.

Si bien este proyecto se centra en la fabricación de microfilamentos de PCL y se le prestará especial atención a los métodos que se emplean para fabricar filamentos, a

continuación, se presentan algunas técnicas convencionales para fabricar matrices de inoculación celular (andamios):

- Lixiviación porógena.
- Espumado con gas.
- Electrospinning o electrohilado.
- Deposición de material fundido.
- Extrusión de materia prima granular.

3.2 Técnicas de manufactura de andamios y filamentos

3.2.1 Lixiviación porógena:

Este método consiste en dispersar partículas (molde) a través de una solución polimérica. Una vez que la estructura que se busca ha quedado fija, se procede a remover las partículas que dieron forma al andamio poroso. Este es un método de bajo costo para producir andamios aptos para la inoculación celular. En la figura 3.1 se puede ver un esquema del procedimiento que se sigue para fabricar los andamios con esta técnica.

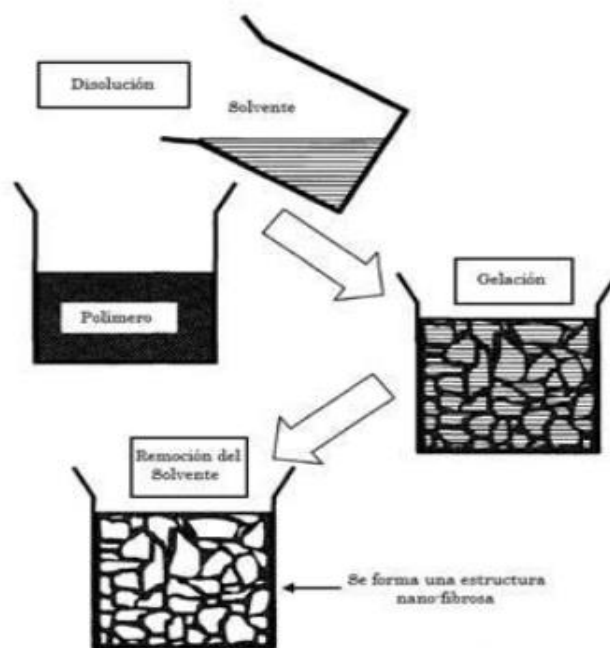


Figura 3.1 Esquema general del procedimiento de lixiviación porógena

Fuente: Sabino et al (2017) Proceso esquemático para la preparación de andamios usando la técnica de lixiviado

La manufactura de andamios basada en esta técnica permite lograr interconexiones de los poros con una gran variedad de materiales. De acuerdo con Woodruff et al (2010):” Los poros locales son vacíos que se caracterizan por pequeñas cavidades esféricas o tubulares con un diámetro que por lo general es menor a 300 μm .” Un ejemplo de un andamio fabricado siguiendo la técnica anteriormente descrita se puede apreciar en la figura 3.2.

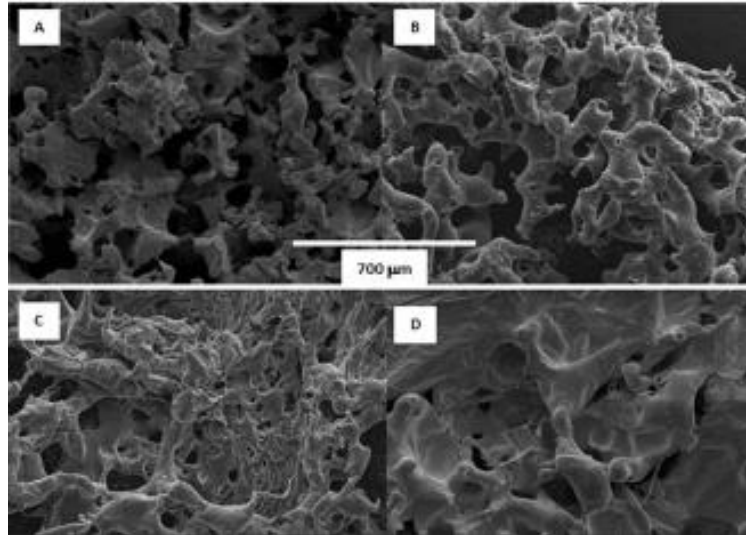


Figura 3.2 Andamio fabricado por lixiviación porógena.

Fuente: Sabino et al (2017) Observación por MEB, de un andamio usando poliésteres biodegradables, a través de la técnica de lixiviación (agente porógeno usado: NaCl).

3.2.2 Espumado con gas:

Este es un método que evita el uso de disolventes orgánicos. Esta técnica de fabricación de andamios consiste en crear una serie de discos comprimidos del polímero que se va a utilizar. Estos discos son calentados hasta una temperatura que se encuentre al menos por encima de la temperatura de transición vítrea y se inyecta dióxido de carbono a alta presión. Conforme se va reduciendo la presión, se van a ir formando poros cuya cantidad es función de la cantidad de gas que se inyectó previamente. Según Sabino et al (2017): “El tamaño medio de poros varía desde 100 μm hasta 500 μm . Sin embargo, un inconveniente de este método sigue siendo que la morfología de poros formada corresponde a poros fundamentalmente cerrados, lo cual es una limitante, pues se sabe que los andamios para ingeniería de tejidos deben garantizar interconectividad entre poros.” Una manera de solventar el problema anteriormente mencionado es incorporar sales y su lixiviación para crear la red de poros abiertos que se requiere.

3.2.3 Electrospinning o electrohilado:

Ésta es una técnica de manufactura de bajo costo para obtener fibras de PCL o algún otro polímero con diámetros en el orden de los micrones o menores a partir de soluciones de polímeros. A pesar de que es una técnica que se comenzó a aplicar en 1930 se considera que aún se encuentra en desarrollo desde el punto de vista de la industria. Es una técnica que ha despertado el interés de los investigadores ya que las fibras que se pueden obtener suelen estar en el orden de los micrómetros a los nanómetros. Otro aspecto que hace que el método sea de gran valor científico es que permite que las células se adhieran no solo a una fibra,

sino que pueda ocupar varias nano fibras. (Sabino, Loaiza, Dernowsek, Rezende, & Da Silva, 2017)

La técnica consiste en aplicar una alta tensión entre un tubo capilar lleno de la solución polimérica a utilizar y el colector de los filamentos. Una vez que se ha aplicado suficiente tensión al líquido, este se carga eléctricamente. Una fuerza de repulsión perpendicular a la tensión superficial de la gota del polímero se genera, lo que conlleva a que la gota se alargue. En cierto punto se alcanza el punto crítico de elongación y de la gota erupciona un filamento que se impulsa por efecto eléctrico hacia la placa o rodillo colector. A medida que el material viaja desde la punta de la aguja hasta el colector se enfría de modo que se obtiene una fibra en estado sólido. Este es un estiramiento que se da con una fuerza constante por lo que se asegura la uniformidad en el grosor de la nano fibra. (Martins, Reis, & Neves, 2008) Si se observa la figura 3.3 se puede ver un esquema general de un sistema de electrospinning.

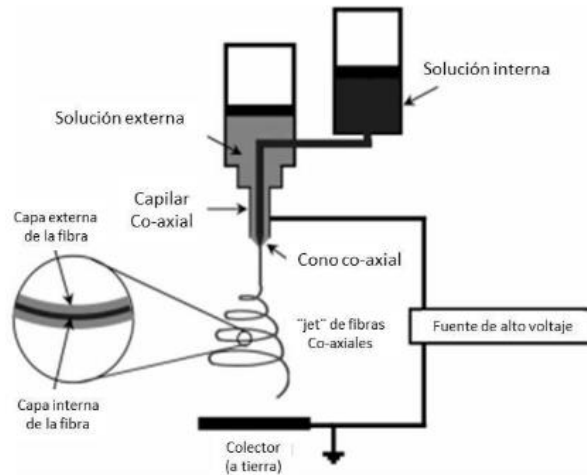


Figura 3.3 Esquema de sistema de electrospinning

Fuente: Sabino et al (2017) Diseño básico de un aparato de electrospinning con sistema coaxial.

Martins et al (2008) indican que existen tres parámetros que afectan significativamente el proceso de electrospinning:

- Propiedades intrínsecas de la solución tales como la viscosidad, elasticidad, conductividad y tensión superficial.
- Condiciones operacionales: Presión hidrostática, potencial eléctrico y diámetro del tubo capilar, así como la distancia con el colector.
- Parámetros ambientales tales como la temperatura de la solución polimérica, humedad y viento en la cámara donde se lleva a cabo el proceso de electrohilado.

Al sintonizar correctamente estos parámetros es que se podrá asegurar que las fibras se formarán correctamente, inclusive se puede llevar a determinar el diámetro de estas. En la

figura 3.4 se puede observar una micrografía hecha a un grupo de fibras de policaprolactona obtenidas a través del método del electrohilado.

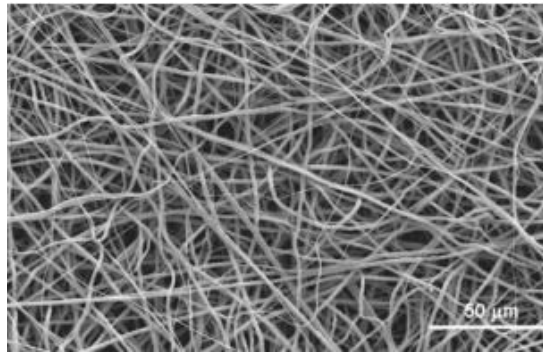


Figura 3.4 Nanofibras de PCL obtenidas por electrohilado

Fuente: Martins et al (2008) SEM images of polycaprolactone (PCL) nanofibres in mesh, produced by electrospinning.

3.2.4 Deposición de material fundido:

Ésta técnica fue desarrollada por el Instituto Tecnológico de Massachusetts. Consisten en crear un objeto tridimensional al depositar capas de un material que fluye a una cierta tasa a través de una boquilla. Las instrucciones para determinar dónde depositar cada una de las capas de material proviene del programa de diseño CAD que se haya utilizado.

Una variable importante por considerar cuando se emplea esta técnica es la rapidez de secado del solvente si es que el material a utilizar viene en forma de solución líquida. Si se tiene que el secado es excesivamente rápido relativo al material, se presentarán deformaciones en el componente que ha sido impreso. Este es un problema que se puede resolver si se escoge un solvente que tenga una baja presión de vaporización. Woodruff et al (2010) indica: “Las piezas de PCL que han sido impresas utilizando cloroformo como solvente presentan deformaciones indetectables, mientras que piezas que se imprimieron utilizando diclorometano si han presentado grandes deformaciones”.

En esta técnica es de mucha importancia evitar la acumulación de humedad en la boquilla ya que se podrían formar ampollas que resistirían el flujo del material depositado. Existen varias maneras de diseñar las máquinas para la deposición de material fundido. Lo más común es tener una mesa móvil. El movimiento de esta se da a lo largo de los ejes X y Y para ir formando el perfil de la pieza. Una vez que se ha completado la capa, la mesa desciende a lo largo del eje Z y se continúa con el procedimiento.

El material que se utiliza comúnmente es el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno). Sabino et al (2017) indican: “Además del ABS, resinas termoplásticas adecuadas a este proceso son también usadas, lo cual incluyen poliésteres (como el PLA últimamente muy empleado), polipropileno, elastómeros”. Al apreciar la figura 3.5 se puede observar un andamio fabricado por este método.

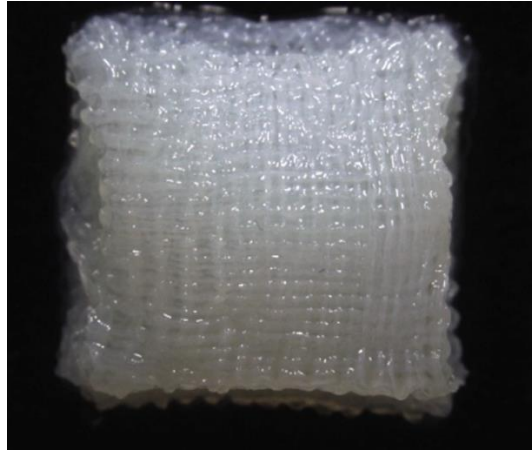


Figura 3.5 Andamio fabricado por FDM

Fuente: Pop (2014) 3D printed scaffold used in surgery.

Park et al (2008) realizaron un experimento en el que se fabricaron andamios para proliferación celular utilizando un método híbrido entre la técnica de electrohilado y FDM. Los andamios fueron construidos con la deposición de microfibras de PCL con la ayuda de un diseño realizado por computadora al considerar varios parámetros de importancia como, por ejemplo, el tamaño de los poros y el diámetro del filamento. Para evaluar las matrices construidas se inocularon microorganismos llamados condrocitos y se cultivaron por 10 días. Los parámetros que se monitorearon fueron la adhesión celular y proliferación. Finalmente, los resultados mostraron que los andamios fabricados con las nanofibras de policaprolactona en efecto proveían a los microorganismos de las condiciones necesarias para su cultivo.

3.2.5 Extrusión de materia prima granular

La extrusión es un proceso mediante el cual la materia prima en forma granular se mezcla y derrite de manera homogénea y posteriormente se extruye para que adquiera algún perfil determinado. El proceso se lleva a cabo en un cilindro, dentro del cual se encuentra un tornillo sin fin giratorio y se utilizan calentadores para lograr que el material se derrita (Lipponen, 2015). Una línea de extrusión por lo general involucra las siguientes partes:

- Extrusora.
- Sistema de enfriado
- Mecanismo de arrastre.

Al ver la figura 3.6 se puede apreciar un diagrama en el cual se ilustra el mecanismo de una extrusora.

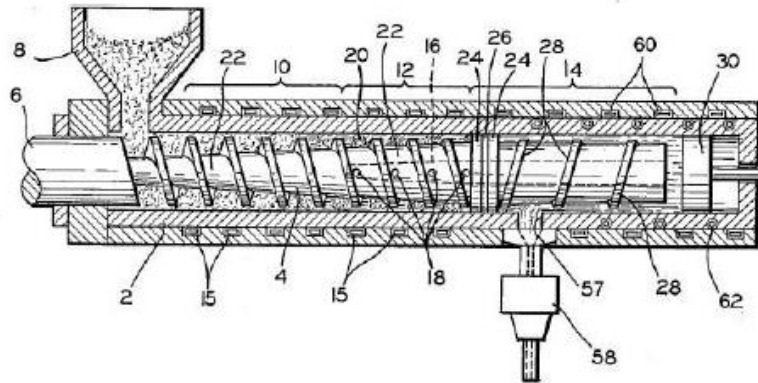


Figura 3.6 Diagrama del mecanismo de extrusión

Fuente: Eldridge, D, Whitton, Z. (2012) Schematic of plastic extrusion device.

Al analizar la imagen anterior se pueden identificar cinco componentes básicos que conforman todo sistema de extrusión, los cuales son:

- Tolva
- Bandas de calentamiento.
- Tornillo sin fin
- Boquilla
- Motor.

En la figura 8 se puede notar como la materia prima se introduce al sistema al depositarse esta en una tolva. Por efecto de la gravedad el material se va introduciendo en el canal de la extrusora para ser derretido y moldeado. Los parámetros que van a determinar el grosor del filamento son la temperatura del sistema, la tasa a la que el material se extruye y la tensión mecánica con la que se arrastra. Es de mucha importancia sintonizar correctamente estos parámetros ya que, si la tasa de extrusión es más rápida de lo necesario, algunos granos no se derretirán y finalmente algunos fragmentos en estado sólido podrán pasar a través de la boquilla causando deformaciones y bultos en el filamento obtenido. (Eldridge & Whitton, 2012)

3.3 Propiedades mecánicas del PCL:

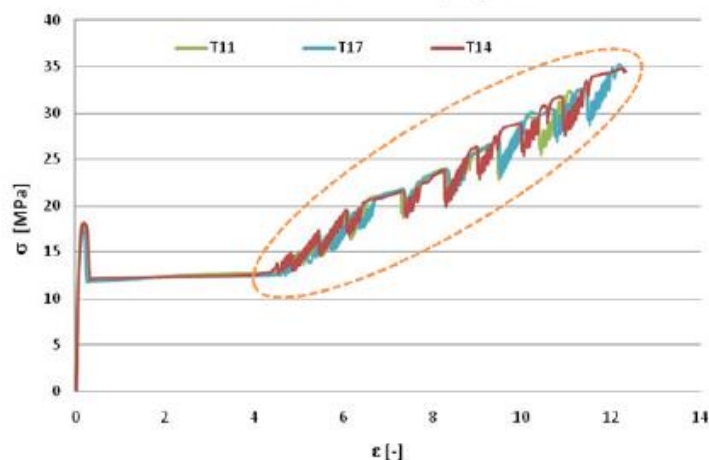
La policaprolactona es un polímero al cual se le han realizado numerosas pruebas por parte de varios grupos de investigación para poder determinar ciertas características mecánicas las cuales incluyen resistencia a la tensión, compresión y flexión. Es notable el hecho de que los valores reportados para cada uno de los parámetros mencionados anteriormente presentan cierta discrepancia entre cada una de las investigaciones que se han realizado. Esto se debe a que las mediciones fueron hechas a probetas que han sido fabricadas con características especiales como por ejemplo la porosidad de esta. Como se presentará más adelante las propiedades físicas del PCL se ven afectadas enormemente por diferencias

en la temperatura, humedad o la tasa a la que el material se somete a esfuerzo, por lo que estos son factores adicionales a los que se les atribuye esta discrepancia en las investigaciones publicadas. (Ragaert, Cardon, De Baere, & Degrieck, 2014)

Un estudio realizado por Ragaert et al (2014) se enfocó en determinar las propiedades físicas del PCL a granel a una temperatura ambiente de 23° C. Para este estudio se utilizaron diferentes especímenes que se fabricaron con medidas específicas para cada una de las pruebas. Las probetas utilizadas para las pruebas de resistencia a la tensión presentaron medidas de 4 mm de grosor, 6.35 mm de ancho y 36 mm de alto. Por otra parte, las muestras utilizadas en la prueba de flexión eran barras rectangulares con un largo de 120 mm, un ancho de 13 mm y un espesor de 3 mm. Finalmente, para determinar el esfuerzo a la flexión emplearon placas cuadradas de 50 mm de lado con un espesor de 4 mm.

3.3.1 Resistencia a la tensión:

Al realizarse la prueba de tracción, se determinó que el esfuerzo de fluencia se alcanza aproximadamente en 17 MPa al aplicarse una tasa de deformación de 100 mm/min. A partir de este punto al inspeccionar visualmente la probeta se puede notar como se da una reducción en el grosor del material a medida que se elonga. Al analizar la gráfica 3.1 se pueden apreciar los resultados de este experimento. En esta imagen se pueden ver los resultados para 3 probetas de PCL con las mismas dimensiones. Se puede notar como los resultados se pueden reproducir dado que las tres curvas se superponen inclusive en la curva de ascenso final donde se presentan fluctuaciones. (Ragaert, Cardon, De Baere, & Degrieck, 2014)



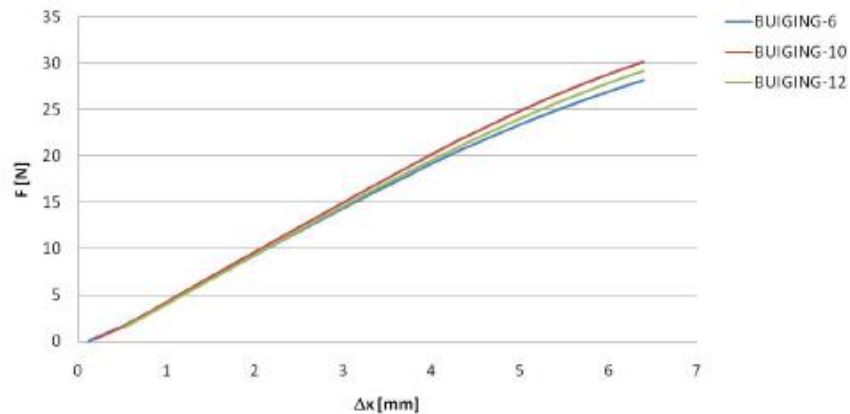
Gráfica 3.1 Curva de resistencia a la tensión de 3 probetas de PCL.

Fuente: Ragaert et al (2014) Ultimate tensile properties of PCL.

Los resultados del experimento expuesto revelan que una vez que se ha alcanzado el esfuerzo de fluencia, el esfuerzo que el material sufre se reduce hasta aproximadamente 12 MPa. Según Ragaert et al (2014): “El esfuerzo no incrementa hasta que se alcanza una elongación de 150 mm”. Este comportamiento lo que indica es que la deformación plástica del material se propaga muy rápidamente una vez que se ha iniciado.

3.3.2 Propiedades de flexión:

Una de las partes esenciales de la investigación en cuestión incluyó la determinación de las propiedades de flexión de la policaprolactona. En este caso, las probetas se montaron en una estructura para realizar una flexión en 3 puntos del material. La deflexión a la que se sometió el material tuvo un máximo de 6.4 mm a una tasa de deformación de 2 mm/min. Al observar la gráfica 3.2 se pueden apreciar los resultados de las pruebas a la flexión.



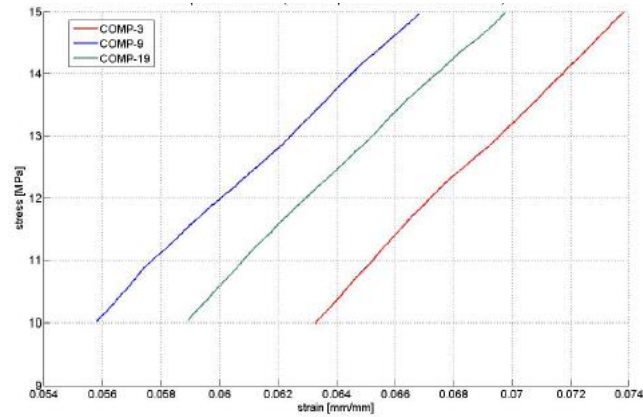
Gráfica 3.2. Prueba de la flexión del PCL.

Fuente: Ragaert et al (2014). Load-deflection curves for the flexural testing.

Según la gráfica anterior, al considerar el área comprendida entre la marca de 2 N y 10 N y sus valores respectivos en el eje X, se puede llegar a la conclusión de que el módulo de flexión del material es de 414 MPa.

3.3.3 Resistencia a la compresión:

En el caso de la prueba para determinar el esfuerzo de compresión percibido por el material, se utilizó una velocidad de compresión de 0.5 mm/min y una distancia de compresión de 0.25 mm. El módulo de compresión fue determinado como una pendiente la zona lineal en la curva de esfuerzo-deformación. Al observar la gráfica 3.3 se pueden apreciar los resultados de la prueba de compresión. El módulo de compresión se determinó que corresponde a 455 MPa. (Ragaert, Cardon, De Baere, & Degrieck, 2014)



Gráfica 3.3. Prueba de compresión del PCL.

Fuente: Ragaert et al (2014). The stress-strain curves for compression, with compensation frame.

3.3.4 Condiciones que afectan las propiedades mecánicas del PCL:

La policaprolactona es un material cuyas propiedades mecánicas se ven afectadas por condiciones como la temperatura y tasa a la que se le aplica un esfuerzo. Un estudio realizado por Kurniawan et al (2011) revela como parámetros como por ejemplo el esfuerzo de fluencia del material y el módulo de tensión cambian al variar las condiciones mencionadas anteriormente.

En el experimento que se realizó, se le aplicó una prueba de resistencia a la tracción a varias probetas de PCL. En el experimento se tomó la lectura de la curva de esfuerzo-deformación del PCL al variar la tasa con la que se deforma el material y la temperatura a la cual se lleva a cabo el experimento. En la tabla 3.1 se pueden apreciar los resultados de la prueba.

Tabla 3.1 Propiedades mecánicas del PCL con diversas temperaturas y tasas de deformación

Strain rate (mm/min)	Temperature (°C)	Yield strength (MPa)	Tensile modulus (MPa)	Strain at yield (%)
5	23	14.66 ± 1.26	107.02 ± 3.99	28.3 ± 4.11
0.1	23	12.86 ± 0.82	90.14 ± 4.56	33.21 ± 0.92
0.01	23	12.19 ± 0.78	87.7 ± 5.05	30.73 ± 0.81
5	37	9.73 ± 0.53	80.8 ± 3.74	25.61 ± 1.02
0.1	37	8.42 ± 0.09	71.42 ± 0.54	23.42 ± 0.91
0.01	37	8.37 ± 0.18	68.45 ± 0.39	22.28 ± 0.53

Fuente: Kurniawan et al (2011). *Elastic properties of PCL*.

En esta tabla se puede ver cómo cada uno de los parámetros de esfuerzo de fluencia, módulo de tensión y la deformación de fluencia se ven afectados. Las propiedades mecánicas del PCL a una temperatura similar a la del cuerpo humano (37° C) presentan un valor más pequeño que el que se registra cuando se tiene una temperatura ambiental de 23 °C.

Kurniawan et al (2011) indican: “De manera general la rigidez del PCL es proporcional a la tasa de deformación e inversamente proporcional a la temperatura.”

En el caso de los resultados presentados en la tabla anterior, se puede notar como al disminuir la tasa de deformación de 5 mm/min a 0.01 mm/min, el esfuerzo de fluencia y la rigidez del material se ven disminuidos en un 18 %. Por otra parte, cuando la temperatura se incrementa a 37°C estos mismos parámetros se disminuyen en un 34% y en un 25% respectivamente. Según Kurniawan et al (2011): “Estos cambios se deben a que tanto la temperatura como la tasa de deformación causan un cambio en la fricción interna en las fases amorfa y cristalina del material.” En otras palabras, la fricción incrementa a medida que la tasa de deformación incrementa, de modo que reduce la movilidad de las cadenas poliméricas. En contraste, la fricción se ve disminuida a medida que la temperatura incrementa debido a que el calor permite que las cadenas poliméricas se reacomoden.

Al considerar lo que este estudio ha revelado es que se puede establecer la razón por la cual distintos autores llegan a reportar valores distintos para las propiedades elásticas de la policaprolactona. Al comparar los resultados que se anotan en el experimento llevado a cabo por Ragaert et al (2014) con el llevado a cabo por Kurniawan et al (2011) la temperatura ambiente, se puede notar que el primero indica que el esfuerzo de fluencia a tensión es de 17 MPa, mientras que el segundo reporta tres valores de 14.66 MPa, 12.86 MPa y 12.19 MPa.

4 Capítulo 4. Estudio del proceso de fabricación actual.

La obtención del microfilamento de PCL, actualmente se logra a través de un proceso que se constituye de dos fases. La primera etapa de la fabricación llega a producir un filamento de grosor promedio de 2.85 mm. Por otro lado, en la segunda fase se llega a obtener un microfilamento con un grosor menor a 0.1 mm.

4.1 Primera Fase:

En esta etapa se parte de una materia prima en forma granular. Los granos se introducen en una tolva que desemboca sobre un tornillo sin fin. El material se va extruyendo por acción del tornillo sin fin a través de una boquilla con un perfil circular de 2.87 mm. El filamento que se obtiene de la extrusora a su vez es tensionado por un mecanismo de ruedas de arrastre para posteriormente ser enrollado en una carrucha rotatoria. En la figura 4.1 se puede apreciar una representación del mecanismo de arrastre utilizado.

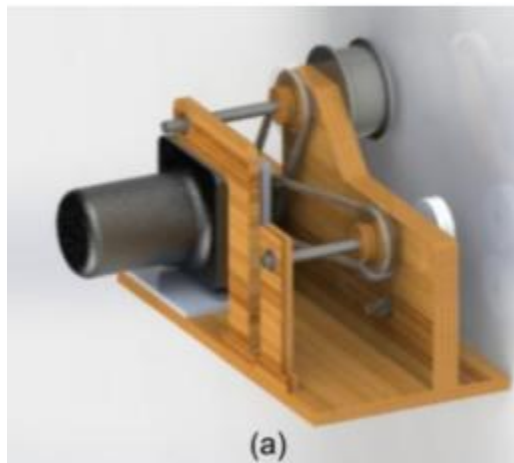


Figura 4.1 Sistema de arrastre

Fuente: Corrales, R. et al (2018). Diseño del mecanismo de arrastre.

Al analizar el mecanismo presentado anteriormente se pueden identificar los elementos mecánicos que conforman el sistema, los cuales se enlistan a continuación:

- Motor CD
- Rodillos de arrastre
- Ejes
- Carrucha
- Poleas
- Bandas elásticas.

Al estudiar el diseño anterior se determina que el principio de funcionamiento que se implementa consiste en hacer que el eje del motor gire a una velocidad determinada. Este al estar acoplado a una polea impulsora y bandas elásticas hace que el rodillo y la carrucha giren a la misma tasa que el motor. Según se ha reportado en el informe redactado por Cordero et

al, se registra que los filamentos que se obtienen a través del uso del diseño presentado anteriormente miden 3 m con un grosor promedio de 2.85 ± 0.15 mm.

Al analizar el proceso que se sigue para obtener el filamento mencionado anteriormente, se determina que los parámetros que gobiernan el grosor de este filamento son:

- Temperatura
- Tasa de extrusión
- Tensión mecánica aplicada
- Perfil de la boquilla de la extrusora.

Los parámetros anteriores se deben ajustar dependiendo del material que se esté tratando para optimizar la calidad y producción del filamento. Por un lado, la temperatura es un parámetro de gran importancia a considerar ya que es el que va a determinar el punto en el que el material que se desea extruir se va a fundir. Si este parámetro no se ajusta de manera adecuada podrían darse consecuencias que van a afectar de manera adversa la producción de filamento. Tales efectos incluyen daños a la máquina extrusora o filamento con áreas irregulares debido a que no todo el material se ha fundido. Una tasa de extrusión inadecuada podría traer efectos similares a los de una temperatura equivocada. Por otra parte, la tensión mecánica con la que el material se arrastra al salir de la extrusora también afectará el grosor y uniformidad del filamento obtenido. Esto es debido a que cuando este sale de la boquilla de la extrusora, se encuentra en un estado gomoso debido a la temperatura a la que se encuentra. En este estado, los materiales presentan propiedades mecánicas con valores inferiores a los que se reportan a temperatura ambiente, de modo que los esfuerzos de fluencia se pueden alcanzar con mayor facilidad. Por esta razón una tensión mecánica afecta de manera proporcional el grosor del filamento. Finalmente, el grosor de la boquilla de la extrusora va a determinar el grosor inicial del filamento. Este va a experimentar un aumento en su diámetro por efectos de la expansión térmica del material, sin embargo, será un valor cercano al de la boquilla.

4.2 Segunda fase:

La segunda etapa que se sigue en el laboratorio para obtener un microfilamento de un grosor menor a 0.1 mm es llevar a cabo una segunda extrusión del material obtenido en la primera etapa y posteriormente un estirado manual.

El filamento que se obtuvo en la fase anterior se impulsa de manualmente a través de una boquilla caliente de una impresora 3D. El fin de esta tarea es lograr una segunda reducción del diámetro del filamento para pasar de un grosor aproximado de 2.85 mm a un grosor aproximado de 0.4 mm. La razón para necesitar esta segunda reducción es que un filamento de PCL a temperatura ambiente requiere sobrepasar el esfuerzo de fluencia de 17 MPa para poderse deformar para obtener un microfilamento de 0.1 mm. Si se considera el área de 6.38 mm^2 del filamento, se necesitaría una fuerza de tensión aproximada de 108.5 N. Si se compara con un grosor de 0.4 mm, el cual presenta un área de 0.125 mm^2 , se requiere una fuerza de 2.136 N. El estirado manual se lleva a cabo debido a que no se cuenta con una boquilla que tenga un orificio igual o menor que 0.1 mm.

Los parámetros que gobiernan el grosor del microfilamento final son los mismos que se presentan en la primera etapa. En este caso los resultados presentarán una variabilidad más grande debido a que los parámetros, a excepción de la temperatura, dependen del operario que esté produciendo el microfilamento. Por un lado, la extrusión al ser manual hace que el grosor del filamento que se pretende que sea de 0.4 mm se vea afectado por la fuerza que la persona pueda ejercer al impulsar el filamento de 2.85 mm a través de la boquilla de la extrusora. De igual manera, cuando se hace el estirado para obtener el producto final, el grosor de este dependerá de la constancia en la fuerza aplicada por el encargado de esta tarea.

4.3 Deficiencias encontradas en el método actual

El primer aspecto que se considera que se debe mejorar es reducir la cantidad de etapas que conlleva la fabricación del microfilamento a una sola fase. De esta manera se podrían ahorrar recursos humanos, económicos y mejorar la disponibilidad de la impresora 3D. Al presenciar la producción del microfilamento se ha llegado a notar que se requieren 3 personas para llevar a cabo la fabricación. La asistencia que estas personas pueden brindar se ve reducida al necesitar asignarse un tiempo semanal de aproximadamente 16 horas para la producción del microfilamento. Reducir la cantidad de personas y tiempo requerido para realizar la tarea de fabricación se ve reflejado en una optimización de estos recursos. Por otro lado, se ha identificado que se hace un uso inadecuado de la impresora 3D marca “Ultimaker 2”. Éste es un insumo que tiene un costo de \$2500. Si bien el fabricante no especifica una vida útil del sistema, se debe considerar que se trata de un modelo que actualmente es obsoleto, al cual no se le puede brindar soporte técnico. En el caso de este equipo, su disponibilidad es nula debido a que se está destinando únicamente para extruir manualmente el filamento grueso. Dado que la máquina se está sometiendo a un uso para el cual no fue diseñada, se espera que eventualmente se presenten fallas, las cuales, si resultasen ser subsanables, implicarán un gasto económico por parte de la institución.

Otro aspecto que se considera que se debe mejorar es el mecanismo de arrastre del filamento. Al estudiar el diseño actual se han identificado varios factores que afectan de manera adversa las características dimensionales del filamento.

El primer componente que requiere de atención es el motor CD que se utiliza. Tal y como se especifica en el informe redactado por Cordero et al, se trata de un motor de 3/16 HP del cual se desconoce su edad, tiempo de uso y estado general de funcionamiento. Este es un motor que no cuenta con un lazo cerrado de control de velocidad por lo que la tasa con la que se tensiona el filamento no es constante. Al encender el motor y evaluar su comportamiento real, se puede notar que este se detiene o baja su velocidad de forma intermitente. En este caso se recomienda la adquisición de un motor de corriente directa nuevo que posea un codificador acoplado al eje de modo que se puede hacer un lazo de control para la velocidad. A su vez se hace necesario el uso de un microcontrolador que se encargue de llevar a cabo el control de velocidad bajo carga y ante perturbaciones.

El segundo aspecto que requiere de atención son las bandas elásticas que se han utilizado. Cabe resaltar que para escoger la banda adecuada se debe llevar a cabo el proceso de diseño mecánico necesario ya que, de lo contrario, estas se estirarán o romperán con

facilidad. En el proceso de diseño para escoger una banda se debe tomar en cuenta la distancia entre los centros de las poleas que se emplearán. Es un proceso iterativo al final del cual se puede llegar a seleccionar la banda adecuada que considera un factor de seguridad definido por el diseñador. En el caso del sistema que se está evaluando no se especifica el criterio que se ha seguido para el dimensionamiento de las bandas. Al poner a funcionar el sistema se puede evidenciar el hecho de que las bandas se han estirado, por lo que se necesita cambiarlas o diseñar un sistema de acople al motor diferente.

El tercer aspecto que se considera que se debe atender es la tasa de extrusión del filamento. Al hacer una inspección visual de la extrusora se puede determinar que esta no posee una demarcación de las diferentes velocidades a las que se puede extruir el filamento. El control de extrusión consta de una perilla que aumenta o disminuye la velocidad con la que gira el tornillo sin fin que impulsa la materia prima a través de la boquilla. Es necesario poder determinar la velocidad con la que el material sale de la máquina de manera que se pueda documentar las capacidades de la máquina, así como calibrar la velocidad con la que las ruedas deben de arrastrar el filamento.

En resumen, se determina que los parámetros que se necesitan regular para poder obtener el filamento deseado son:

- Temperatura
- Tasa de extrusión
- Tensión mecánica aplicada
- Perfil de la boquilla de la extrusora.

Para lograr esto se recomienda prestar atención a los siguientes aspectos del método de fabricación:

- Cantidad de etapas requeridas para la fabricación del filamento.
- Motor CD utilizado.
- Método de control de velocidad.
- Acople del motor con las ruedas.
- Determinar tasa de extrusión de la máquina.

5 Capítulo 5. Propuestas a solución

5.1 Descripción general de propuestas de solución

Antes de llegar a seleccionar una vía de solución al proyecto planteado, se debe considerar que las mismas se proponen dentro del marco de los recursos disponibles o accesibles por parte del laboratorio de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales del ITCR. En este caso, el proceso que se desea automatizar es uno que en la actualidad es manual, que a su vez da resultados los cuales los investigadores han determinado que no son aceptables. En el capítulo 3 se identificaron varios métodos de fabricación de filamentos de PCL. En resumen, se tiene:

- Electrohilado.
- Deposición de material fundido.
- Extrusión de materia prima en forma granular.

Tabla 5.1 Comparación de técnicas de fabricación de filamentos.

	Electrohilado	DMF	Extrusión
Ventajas	Filamentos de grosor uniforme. Principio de funcionamiento sencillo de diseñar.	Método adaptable para fabricar andamios a partir de los filamentos.	Ya se cuenta con el insumo de la extrusora. Método adaptable para filamentos del grosor requerido. Ya se cuenta con la materia prima (PCL) en forma granular.
Desventajas	Materia prima (PCL) necesita estar disuelta. Fuente de tensión de 7kV (no se cuenta con este insumo). Filamentos más delgados de lo requerido.	Materia prima (PCL) debe ser en forma de filamento. Esta técnica no asegura un grosor uniforme de filamentos. Filamentos no son lo suficientemente delgados.	Se requiere del diseño de un sistema adicional para la reducción del grosor del filamento.

Fuente: Autor. Word.

Al ver la tabla 5.2 se pueden apreciar las ventajas y desventajas que presentan cada una de las técnicas de fabricación de filamentos que se han presentado anteriormente en el documento. Al considerar cada una de las opciones, se escoge la técnica de la extrusión. Se llega a esta decisión porque esta es la técnica que finalmente es más factible a la hora de generar un diseño y eventualmente construir. Las opciones se han valorado desde un punto de vista tanto funcional como económico. El método de extrusión y posterior reducción del grosor es el que se considera que cumple con las expectativas del Laboratorio de Mecánica de Materiales. A continuación, se describirán los requerimientos y tres propuestas para diseñar un sistema que provea al laboratorio con un microfilamento con las características dimensionales requeridas.

5.2 Requerimientos del sistema:

Para plantear una solución adecuada es necesario estructurar y definir de forma clara las metas que se deben cumplir. Por esta razón es que se hace la lista de requerimientos del sistema. Estos son los parámetros que se deben considerar para obtener una solución efectiva al problema. Para ilustrar el principio que se va a seguir a la hora de generar los requerimientos, propuestas a solución y desarrollo de cálculos se adjunta la figura 5.1. En ella se puede apreciar un diagrama de bloques general con las secciones que conformarán el sistema completo.

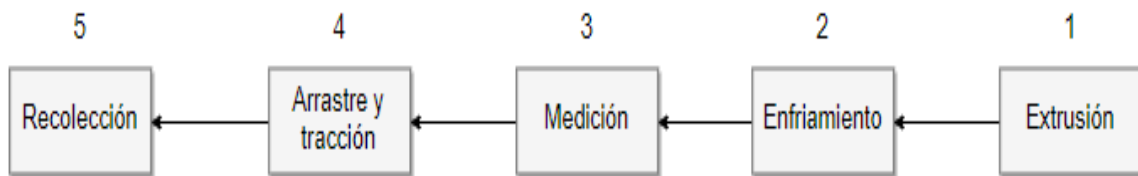


Figura 5.1 Diagrama de bloques general del sistema

Fuente: Autor. Word.

A continuación, se presenta la lista de requerimientos que definen las expectativas por parte del Laboratorio de Mecánica de Materiales a cumplir:

1. Debe ocupar un área menor a dos metros cuadrados.
2. Se debe obtener el microfilamento final por el método de reducción de grosor por estiramiento del material.
3. Se contará con un mecanismo de encendido/apagado.
4. El mecanismo de arrastre debe proporcionar una tensión constante.
5. Se contará con un sistema de enfriamiento para el microfilamento obtenido.
6. Todos los componentes electrónicos deben alimentarse desde una única fuente de tensión.
7. El sistema deberá de ser capaz de operar de manera continua hasta que el operario decida detener su funcionamiento.
8. El sistema funcionará en un rango de temperatura ambiental entre 10 °C a 35 °C.
9. El sistema podrá ser utilizado por un usuario sin conocimiento técnico con ayuda de un manual.
10. El sistema tendrá un mecanismo de paro de emergencia.
11. En todo momento se producirá una única línea de filamento.
12. La programación de los parámetros de funcionamiento se hará por computadora.
13. Los parámetros de funcionamiento se visualizarán por computadora cuando se requiera.
14. No se debe causar interferencia con el funcionamiento de otros dispositivos que se encuentren cercanos al sistema.
15. Debe existir un mecanismo para recolectar el microfilamento obtenido.
16. El mecanismo de recolección no debe de afectar la calidad del microfilamento.
17. La altura máxima del sistema no debe sobrepasar la medida de dos metros.

Tabla 5.2 Lluvia de ideas

Aspecto	Observaciones	Propuestas
Mecanismo de arrastre	Este subsistema debe tensionar el filamento con una fuerza constante para que su grosor final sea uniforme.	Acoplar un motor CD o motor a pasos, con control de velocidad a un sistema de ruedas o rodillos de arrastre.
		Acoplar un motor CD o un motor a pasos, con control de velocidad a una carrucha rotatoria.
		Diseñar un sistema con un par de carruchas rotatorias. Cada una se acoplará a un motor CD con control de velocidad. Ambas girarán a velocidades constantes distintas para estirar el filamento.
Enfriado del filamento	El filamento sale de la boquilla de la máquina extrusora a una temperatura menor a la de su punto de fusión, sin embargo, la temperatura es lo suficientemente alta como para que todavía sea moldeable. Para evitar defectos en el filamento final, éste debe enfriarse.	Pasar el filamento con el grosor deseado a través de una pileta llena de agua.
		Usar un abanico para soplar aire frío al filamento con el grosor deseado.
		Verter un chorro de agua sobre el filamento una vez que se ha conseguido el grosor requerido.
		Dejar que el filamento se enfríe con el aire a temperatura ambiente.
Medición del grosor del filamento	Es recomendable revisar que el grosor del filamento sea menor a 0.1 mm.	Utilizar un indicador digital o de aguja para medir el grosor del filamento.
		Utilizar un micrómetro láser para medir el grosor del filamento.
		Utilizar un vernier digital para medir el grosor del filamento (Requiere de diseño de montura)
		Medir el grosor del filamento a través de micrografías.
Método de control de velocidad	Los motores que se empleen deben de tener un control de velocidad para que el filamento que se obtiene sea uniforme	Codificador rotatorio
		Sensor de velocidad de efecto Hall
		Interruptor infrarrojo
Alimentación eléctrica	Todos los componentes electrónicos deben alimentarse con una única fuente de tensión.	Usar una fuente de alimentación CD ajustable de laboratorio.
		Diseñar un circuito de potencia rectificador de señal.

Fuente: Autor. Word.

5.3 Candidatos a solución

5.3.1 Propuesta 1

El principio que se seguirá en esta propuesta se basa en someter el PCL a un proceso de termo conformado. En este caso el conformado mecánico consiste en estirar el filamento hasta que su grosor sea igual o menor a 0.1 mm. Esta técnica se sustenta en el hecho de que los polímeros termoplásticos pueden calentarse y llevarse a un estado en el cual el material a pesar de estar en un estado sólido se ha suavizado lo suficiente como para que se pueda moldear y estirar con facilidad.

El primer candidato a solución que se presenta cuenta con un mecanismo de arrastre conformado por dos rodillos de arrastre, uno de los cuales se acopla a un motor CD. Para que el grosor del filamento sea uniforme se debe asegurar que la tensión es constante. Esto se logra si el motor gira de manera constante sin importar la carga. Se propone diseñar un sistema de control automático para controlar la velocidad del motor. La medición de la velocidad se realizará con un microcontrolador al cual se le conectará como entrada un codificador de cuadratura que medirá la velocidad angular del motor CD. El microcontrolador determinará la velocidad angular instantánea del motor, cada 100 milisegundos, al considerar la cantidad de cuentas que ha contado por unidad de tiempo.

La segunda parte de la propuesta que se debe considerar es el método de enfriamiento del filamento. Como se mencionó anteriormente, el filamento final se obtiene gracias a un proceso de termo conformado mecánico, sin embargo, el material al estar en un estado suave y moldeable es susceptible a sufrir deformaciones por factores externos al sistema. Por esta razón es que se debe enfriar en el momento en que se sabe que ha alcanzado el grosor deseado. La propuesta que se presenta es utilizar una pileta llena de agua a temperatura ambiente a través de la cual se pasará el filamento.

Otra parte importante del sistema es la manera en que se monitoreará el grosor y uniformidad del filamento. Se propone utilizar un indicador digital ya que provee una precisión de 0.001 mm y la lectura del dato es más confiable dado que no depende de la destreza del operario.

La alimentación del sistema se realizará mediante una placa acondicionadora de señal. Ésta se diseñará para que pueda proveer dos tensiones distintas, una de 12 V y otra de 5V. La razón para tener dos tensiones diferentes es previendo que la mayoría de los componentes electrónicos se alimentan con las tensiones mencionadas anteriormente.

Finalmente se incorpora un sistema de recolección del microfilamento. Este sistema estará formado por una carrucha rotatoria que se acoplará a un motor CD. El giro de esta carrucha debe ser lento para no tensionar ni deformar el cable.

Si se aprecia la figura 5.2 se puede ver una representación preliminar de la propuesta.

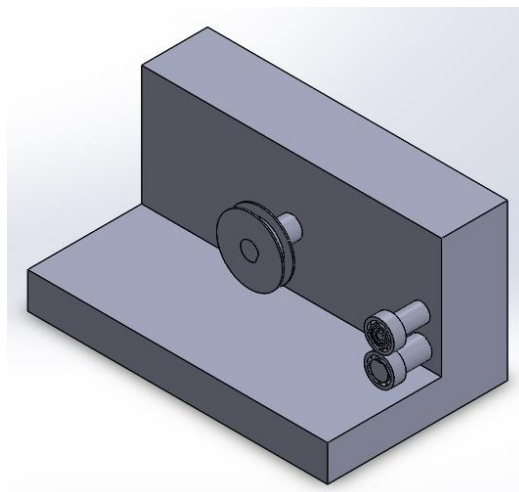


Figura 5.2 Propuesta 1

Fuente: Autor. Solidworks

Tabla 5.3 Cotización preliminar del candidato 1

Componente	Cantidad	Costo unitario	Insumo por adquirir
Motor CD	2	\$12.95	X
Carrucha	1	\$10.99	-
Interruptor óptico	1	\$2.50	X
Indicador digital	1	\$218.95	X
Circuito acondicionador de señal	1	\$16.52	-
Pileta para agua	1	\$9.26	-
Acrílico para ensamble	1	\$9.26	X
Rodillos	2	\$10.40	X
Eje	3	\$4.95	X
Rodamiento	4	\$12.35	X
TOTAL		\$378.53	\$349.02

Fuente: Autor. Word.

5.3.2 Propuesta 2

El principio de funcionamiento de esta propuesta se basa de igual manera que la propuesta 1 en someter el PCL a un proceso de termo conformado mecánico. En este caso se partirá de una carrucha de filamento de PCL grueso que ha sido fabricada con anterioridad.

El mecanismo de arrastre estará formado por dos carruchas rotatorias. Una de ellas contiene el filamento grueso que se deberá estirar, la segunda carrucha es en la cual se va a

enrollar el microfilamento. Ambas carruchas girarán a velocidad constante, sin embargo, una se moverá más rápido que la otra. Esta diferencia de velocidades angulares va a causar una tensión en el filamento de modo que este se estirará hasta alcanzar el diámetro requerido. El control de la velocidad de ambos motores se realizará mediante codificadores de cuadratura. Un microcontrolador calculará la velocidad angular cada milisegundo al tomar en cuenta la cantidad de cuentas registradas por unidad de tiempo por parte de cada codificador.

Esta propuesta incluye un mecanismo para soplar aire caliente a la cámara en la cual se encuentra una de las carruchas rotatorias. El propósito de este subsistema es el de suavizar el filamento para que el estirado requiera menos torque y el grosor obtenido sea uniforme. Para construir este mecanismo se propone utilizar un abanico que soplará aire a una resistencia caliente.

El filamento debe enfriarse a medida que sale de la cámara caliente ya con el grosor deseado. Para este propósito se propone utilizar una pileta llena con agua para enfriar el filamento y asegurar que factores externos no van a causar irregularidades. El filamento se introducirá en el agua a través de un sistema de poleas.

El método mediante el cual se va a monitorear el grosor del filamento es a través del uso de un indicador digital. De igual manera que en la propuesta 1, se diseñará una montura para que el indicador pueda ubicarse en el camino de enrollado. Este instrumento de medición nuevamente ha sido seleccionado debido a que presenta una precisión de 0.001 mm.

La alimentación eléctrica del sistema se realizará con una fuente de alimentación CD ajustable. Esta alternativa se escoge debido a que es un insumo con el que el laboratorio ya cuenta.

Al ver la figura 5.3 se puede apreciar una representación del sistema propuesto.

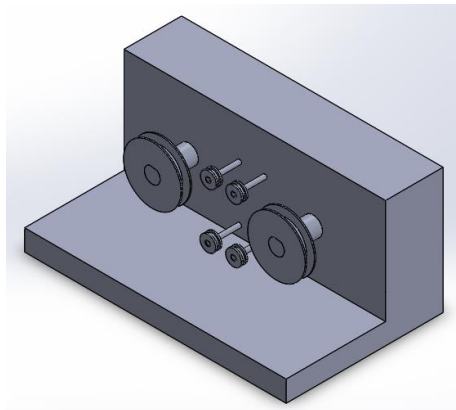


Figura 5.3 Propuesta 2

Fuente: Autor. Solidworks

Tabla 5.4 Cotización preliminar propuesta 2

Componente	Cantidad	Costo unitario	Insumo por adquirir
Motor CD	2	\$12.95	X
Eje	2	\$4.95	X
Rodamiento	2	\$12.35	X
Carrucha	2	\$10.99	-
Lámina de acrílico	1	\$9.26	X
Codificador	2	\$5.50	X
Abanico	1	\$6.99	X
Resistencia de potencia	1	\$1.25	X
Pileta para agua	1	\$9.26	X
Fuente de alimentación	1	\$89.95	-
Indicador digital	1	\$218.95	X
TOTAL		\$419.14	\$307.93

Fuente: Autor. Word.

5.3.3 Propuesta 3

El mecanismo de arrastre para esta propuesta consiste en acoplar un motor CD a una carrucha rotatoria. En esta carrucha es donde se enrollará y recolectará el filamento. Para asegurar que el microfilamento será de grosor constante se debe incorporar un lazo de control de velocidad para el motor utilizado. En este caso el control se implementará haciendo uso de un microcontrolador al cual se le conectará un codificador de cuadratura. Este codificador se acoplará al eje del motor de modo que se conocerá la velocidad angular al saber la cantidad de cuentas que se lleva por unidad de tiempo.

La medición del filamento se llevará a cabo utilizando un indicador de aguja. Es necesario diseñar una montura adecuada para poder medir el grosor del filamento a medida que el mismo va avanzando. Por otro lado, el enfriamiento del microfilamento se realizará por medio de un abanico que se colocará en una etapa en la cual ya se ha obtenido el grosor y uniformidad deseada. De esta forma se asegura que el microfilamento cumple con lo especificado por el laboratorio.

La alimentación del sistema se dará por medio de un circuito acondicionador de señal que será diseñado para que pueda dar la tensión necesaria a cada uno de los componentes del sistema. La fuente de poder será el tomacorriente al cual llega la energía que provee la compañía de energía de Cartago.

Si se aprecia la figura 5.4 se puede ver una representación del preliminar del sistema.

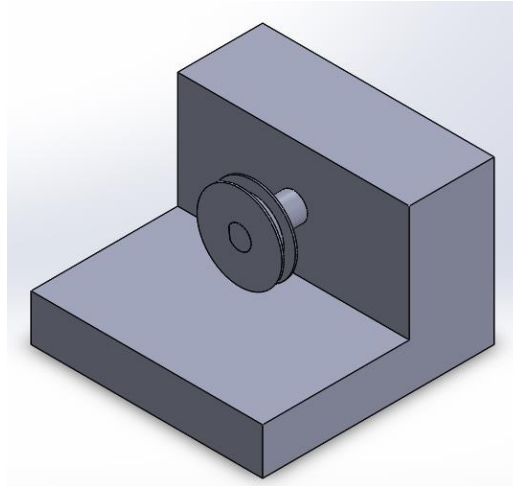


Figura 5.4 Propuesta 3.

Fuente: Autor. Solidworks.

Tabla 5.5 Cotización preliminar propuesta 3

Componente	Cantidad	Costo unitario	Insumo por adquirir
Motor CD	1	\$12.95	X
Codificador de cuadratura	1	\$24.81	X
Indicador de aguja	1	\$207.04	-
Extensión	1	\$5.31	X
Transformador 110 V/24V	1	\$13.95	X
Capacitor electrolítico de 2200 uF/ 50V	1	\$1.75	X
Diodos	4	\$0.20	X
Regulador 12 V	1	\$0.75	X
Abanico	1	\$6.99	X
Acrílico para ensamble	1	\$9.26	X
Carrucha	1	\$10.99	-
Eje	1	\$4.95	X
Roles	4	\$12.35	X
TOTAL		\$313.7	\$313.7

Fuente: Autor. Word.

5.4 Comparación de propuestas:

A continuación, se presentan las tablas 5.6, 5.7 y 5.8 en las cuales se presentan las ventajas y desventajas de las propuestas 1, 2 y 3 respectivamente.

Tabla 5.6 Ventajas y desventajas de propuesta 1

Aspecto	Propuesta	Ventajas	Desventajas
Mecanismo de arrastre	Rodillos de arrastre	Es una alternativa económica. Es un ensamble sencillo de diseñar.	Se requiere de un mecanismo adicional para recolectar el microfilamento. Se requiere del diseño de 3 ejes para montar los rodillos y la carrucha de recolección.
Sensor para el control automático	Codificador de cuadratura	Ya viene incorporado al eje del motor. Brinda una lectura de velocidad muy precisa.	Este insumo no se encuentra en el país.
Enfriado	Pileta llena de agua	El laboratorio ya cuenta con este insumo. Es un método sencillo para enfriar rápidamente el microfilamento.	La pileta con la que se cuenta ocupa la mitad del espacio.
Medición	Indicador digital	Brinda la resolución adecuada (0.001 mm). Los datos se pueden exportar hacia la computadora.	Requiere del diseño de una montura para su uso. Errores en el diseño de la montura se podrían traducir en una lectura errónea. Requiere de un cable adicional para exportar datos.
Alimentación eléctrica	Circuito acondicionador de señal	Se provee de una fuente de alimentación propia para el sistema.	Se requiere de una inversión económica para obtener el circuito.

Fuente: Autor. Word.

Tabla 5.7 Ventajas y desventajas de propuesta 2.

Aspecto	Propuesta	Ventajas	Desventajas
Mecanismo de arrastre	Dos carruchas rotatorias	Se pueden almacenar filamentos de varios grosores. Ya se cuenta con este insumo	Se requiere del diseño de dos ejes para montar las carruchas y acoplar los motores.
Sensor para el control automático	Codificador	Su acople puede ser directo al eje del motor.	Resolución del sensor no es ajustable. Si el motor cuenta con caja reductora, la carcasa de este tendría que abrirse para acoplar el sensor al eje del motor.
Enfriado del filamento	Pileta con agua	El laboratorio ya cuenta con este insumo. Es un método sencillo para enfriar rápidamente el microfilamento.	La pileta con la que se cuenta ocupa la mitad del espacio disponible.
Medición del filamento	Indicador digital	Brinda la resolución adecuada (0.001 mm). Los datos se pueden exportar hacia la computadora	Requiere del diseño de una montura para su uso. Errores en el diseño de la montura se podrían traducir en una lectura errónea. Requiere de un cable adicional para exportar datos.

Alimentación eléctrica	Fuente de tensión CD del laboratorio	Ya se cuenta con este insumo. Es un equipo que ha sido diseñado y probado por el fabricante.	Es un equipo de uso general por lo que su uso no se destina exclusivamente para este sistema.
------------------------	--------------------------------------	---	---

Fuente: Autor. Word.

Tabla 5.8 Ventajas y desventajas de propuesta 3

Aspecto	Propuesta	Ventajas	Desventajas
Mecanismo de arrastre	Carrucha rotatoria	Ya se cuenta con este insumo. Provee un método de recolección y arrastre simultáneo.	Requiere del diseño de un eje acoplar la carrucha al motor.
Sensor para el control automático	Codificador rotatorio de cuadratura	Su acople puede ser directo al eje del motor.	Resolución del sensor no es ajustable. Si el motor cuenta con caja reductora, la carcasa de este tendría que abrirse para acoplar el sensor al eje del motor.
Enfriado del filamento	Abanico	Es un dispositivo de bajo costo. Su colocación no requiere del diseño de estructuras adicionales.	La perturbación inducida por efecto del viento podría introducir irregularidades en el filamento.
Medición del filamento	Indicador de aguja	Ya se cuenta con este insumo. Brinda la resolución necesaria. (0.001 mm)	Su naturaleza analógica hace que la lectura del grosor dependa del operario. No se pueden exportar los datos digitalmente.

Alimentación eléctrica	Circuito acondicionador de señal.	Se provee de una fuente de alimentación propia para el sistema.	Se requiere realizar una inversión económica para adquirir todos los componentes.
------------------------	-----------------------------------	---	---

Fuente: Autor. Word.

5.5 Selección de propuesta final

Al comparar las ventajas y desventajas de cada una de las propuestas descritas anteriormente se escoge a la propuesta 1 como la que se diseñará en el desarrollo de este proyecto. La razón por la cual se escoge es por el hecho de que esta propuesta es la que presenta el mecanismo más adecuado para tensionar el filamento y obtener el grosor deseado. Al comparar los mecanismos de arrastre y estiramiento se puede notar que la propuesta 1 presenta un método de recolección y arrastre separados. Estos al ser independientes presentan la ventaja de que el funcionamiento de cada uno se puede ajustar para cumplir con los parámetros de velocidad que se estimen adecuados para cada uno. Los componentes necesarios para el desarrollo de esta propuesta son los que presentan el gasto más bajo en comparación con las demás propuestas. Por otro lado, el diseño y principio de funcionamiento de esta propuesta presentan el menor grado de complejidad, lo que se traduce en menos variables que tomar en cuenta.

6 Capítulo 6. Diseño

6.1 Descripción General:

El diseño de la propuesta escogida se detallará en este capítulo. Se describirá el proceso de selección y dimensionamiento de cada uno de los componentes y subsistemas.

La propuesta seleccionada incluye dos bloques (mecánico y electrónico) que se deberán integrar para el correcto funcionamiento del sistema mecatrónico. El bloque mecánico se encargará de conformar el mecanismo de arrastre, el cual es el que finalmente será el que tensionará el filamento y obtendrá el grosor deseado. Este subsistema se compone de las siguientes partes:

- Carcasa
- Rodillos
- Rodamientos
- Carrete

Por otro lado, el subsistema electrónico será aquel que deberá efectuar un control sobre los componentes mecánicos. El control automático que se diseñará tendrá la función de mantener cada uno de los componentes operando de manera estable. Las partes que conforman a este subsistema son:

- Motores CD
- Driver de motor CD
- Codificador
- Microcontrolador

6.2 Pruebas realizadas previo al diseño del sistema:

6.2.1 Sistema de control de velocidad para motor sin codificador incorporado:

En el caso de este proyecto, se va a evaluar la posibilidad de diseñar un método para medir la velocidad angular de un motor que no posee un codificador incorporado. La velocidad angular del motor se va a determinar al contar la cantidad de veces que un haz de luz infrarrojo se interrumpe por unidad de tiempo. Para lograr lo anteriormente descrito se va a acoplar un ensamble mecánico que incluye un eje, un piñón y una rueda con agujeros a un motor CD. El eje del motor CD va a tener un engrane el cual debe impulsar un piñón. Este piñón estará montado sobre un eje en el cual a su vez lleva una rueda con agujeros montada. Se debe establecer una relación entre el engrane y el piñón de manera que, por cada vuelta del motor, el piñón y la rueda con agujeros den un número determinado de giros. En el caso de este diseño se ha determinado que la relación será de 1:4. De esta manera se asegura que por cada milisegundo se tiene una cuenta lo suficientemente representativa para poder dar una lectura de la velocidad del motor.

El primer paso para diseñar este sistema es diseñar los engranes que se van a utilizar. Para ello se debe definir arbitrariamente:

- Ángulo de presión
- Número de dientes

- Diámetro de paso

Una vez que se ha escogido un valor para los parámetros anteriormente mencionados es que se puede proceder a definir el resto de las características que definen por completo el engrane que se está diseñando. Tales parámetros son:

- Diámetro base
- Módulo
- Addendum
- Dedendum
- Claro
- Espesor del diente.

En el caso del engrane de este sistema los parámetros que de los que se ha partido son:

1. Ángulo de presión: 20°
2. Número de dientes: 36
3. Diámetro de paso: 80 mm

En la tabla 6.1 se puede ver un resumen de las ecuaciones que definen cada uno de los parámetros mencionados:

Tabla 6.1 Ecuaciones de un engrane

Parámetro	Abreviatura	Ecuación	Valor calculado (mm)
Diámetro base	db	$db = d * \cos(\phi)$	75.17
Módulo	m	$m = \frac{d}{N}$	2.22
Addendum	a	a=m	2.22
Dedendum	b	$b = 1.25 * a$	2.7778
Claro	c	$c = b - a$	0.5556
Espesor	t	$t = \frac{\pi * m}{2}$	3.4906

Fuente: Autor. Word.

Una vez que se calcularon los valores que definen la geometría del engrane, se procede a hacer el diseño de este en el programa de computadora “Solidworks”. Al consultar la figura 6.1 se puede ver el resultado final de dibujar la involuta que define el perfil del diente del engrane.

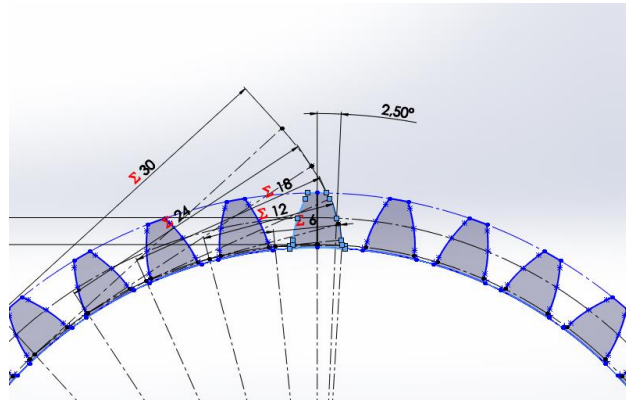


Figura 6.1 Dibujo del perfil del diente.

Fuente: Autor. Solidworks.

En la figura 6.2 se puede ver una representación tridimensional del engrane que se ha diseñado con las ecuaciones mostradas en la tabla 5.1

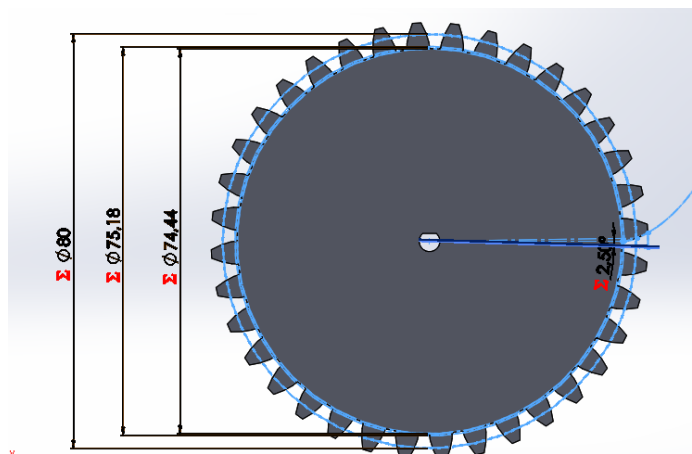


Figura 6.2 Engrane con diámetro de paso 80 mm

Fuente: Autor. Solidworks.

El sistema de control requiere del juego de engranes ya que, si la rueda con agujeros se acoplase directamente al eje del motor, la cuenta que se obtendría cada milisegundo no sería lo suficientemente representativa para hacer un cálculo de la velocidad instantánea del motor. Por esta razón es que se debe hacer un juego de engranes, de modo que al hacer una relación 1:4 se puede obtener una cuenta por unidad de tiempo más grande.

Al seguir el mismo procedimiento de diseño descrito anteriormente es que se puede obtener el piñón que conserva el mismo módulo que el engrane. En este caso es necesario que el diseño del piñón considere un ángulo de presión igual que el del engrane. En la tabla 6.2 se pueden apreciar los valores de los parámetros que definen al piñón.

Tabla 6.2 Ecuaciones del piñón

Parámetro	Abreviatura	Ecuación	Valor calculado (mm)
Diámetro base	db	$db = d * \cos(\phi)$	18.79
Módulo	m	$m = \frac{d}{N}$	2.22
Addendum	a	a=m	2.22
Dedendum	b	$b = 1.25 * a$	2.7778
Claro	c	$c = b - a$	0.5556
Espesor	t	$t = \frac{\pi * m}{2}$	3.4906

Fuente: Autor. Word.

Al ver la tabla anterior se puede ver que la mayoría de los parámetros que definen al piñón son iguales que los del engrane. Esto se debe a que para que el mecanismo engrane-piñón funcione adecuadamente, estos tienen que guardar la misma proporción en sus medidas. En la figura 6.3 se puede apreciar una representación tridimensional del piñón diseñado.

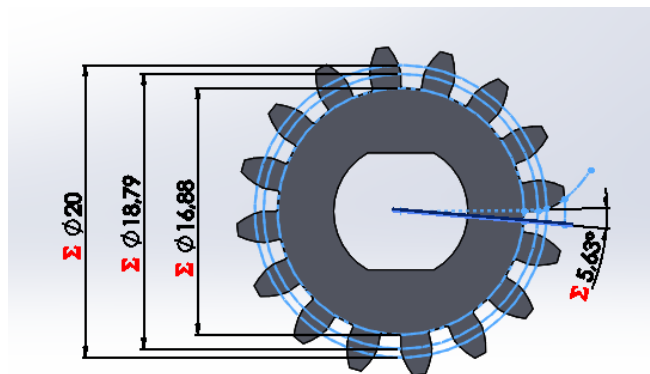


Figura 6.3 Piñón con diámetro de paso de 20 mm.

Fuente: Autor. Solidworks.

Una vez que se ha diseñado el juego de engranes, se debe diseñar el eje sobre el cual se va a montar el piñón y la rueda con agujeros. Para poder definir la geometría del eje, primero se deben escoger los rodamientos sobre los que este irá montado. La razón de tomar este orden de diseño es debido a que los rodamientos se pueden encontrar con diámetros ya definidos, mientras que las barras de metal de las que se forman los ejes se pueden maquinarse y ajustar a las medidas de los rodamientos.

En este caso después de hacer una búsqueda de los rodamientos y barras de acero disponibles, se escogen dos rodamientos con un diámetro de pista interna de 8 mm. Dada esta dimensión se efectúa el diseño del eje. Para esto se escoge una barra de acero SAE 4140 de 10 mm de grosor (Esfuerzo de fluencia 60-74 MPa), dado que este material presenta una

alta tenacidad, dureza y resistencia mecánica. A esta se le hacen dos reducciones (9,2 mm y 8 mm). En la sección que tiene un diámetro de 9,2 mm se hace un fresado para generar dos superficies planas. La intención de esto es poder generar una geometría que permita montar el piñón y la rueda con agujeros de modo que estos no se deslicen respecto al eje cuando esta gira. Las reducciones a 8 mm se utilizan para que el eje se pueda montar en los rodamientos. Si bien la medida de 9.2 mm se ha escogido de manera arbitraria, al hacer la comprobación de esfuerzos en las figuras 6.4 y 6.5 se puede notar como la barra ha de resistir la carga de los engranes los cuales si se fabrican a partir de acrílico transparente representarán 0.32 N. En la figura 6.6 se puede ver una representación tridimensional del eje diseñado.

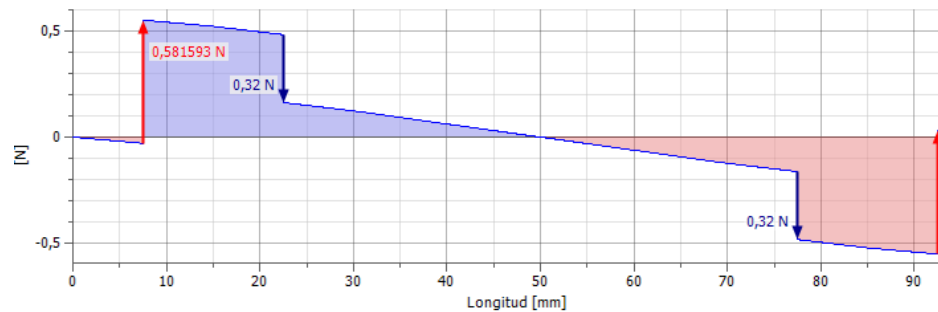


Figura 6.4 Diagrama de esfuerzo cortante

Fuente: Autor. Inventor

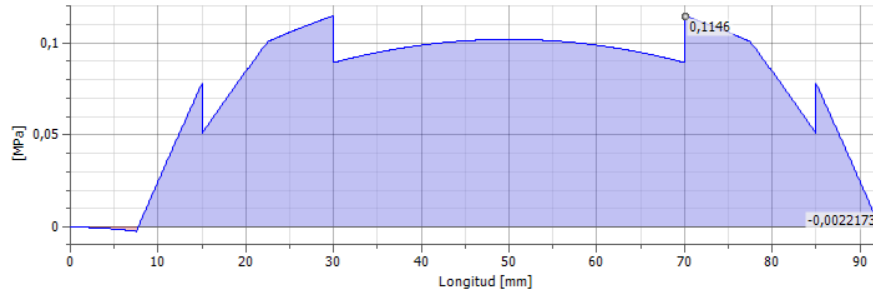


Figura 6.5 Gráfica de esfuerzo a flexión

Fuente: Autor. Inventor.

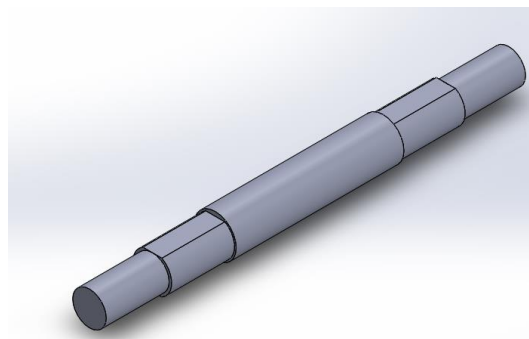


Figura 6.6 Eje del sistema de control

Fuente: Autor. Solidworks.

Para poder medir la velocidad angular, como se ha mencionado anteriormente, se va a hacer uso de una rueda con agujeros. Esta rueda consta de un arreglo circular de agujeros rectangulares. La geometría del agujero del centro se hace de modo que se puede montar sobre el eje del sistema. En este caso se ha escogido utilizar una rueda con 55 agujeros. Al considerar que la relación de los engranes es de 1:4, se deduce que por cada vuelta del eje del motor se va a tener una cuenta total de 220. Este número de agujeros se ha obtenido de manera arbitraria. La cantidad de agujeros y diámetro de la rueda se ajustarán de manera empírica al realizar las pruebas para desarrollar el control de velocidad del motor. En la figura 6.7 se puede ver una representación de la rueda que se ha diseñado.

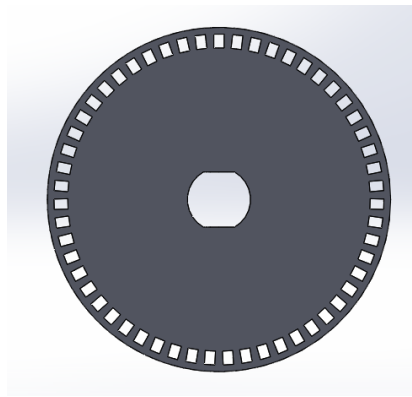


Figura 6.7. Rueda con agujeros

Fuente: Autor. Solidworks.

El motor que va a impulsar todo el sistema se ha determinado que será un motor CD con alimentación a 12 V. En este caso según la hoja de datos del motor se sabe que es capaz de proveer de un torque de 1.3 Nm y considerando que el brazo de palanca que se genera por efecto del radio del engrane es de 40 mm, se determina al dividir el torque entre el brazo de palanca que se va a proveer de una tensión mecánica de 31.25 N. El grosor del filamento a medida que sale de la extrusora es de 2.87 mm, por lo que al efectuar el cálculo del esfuerzo que este percibirá por efecto del motor, se obtiene un valor de 4.83 MPa. Normalmente el esfuerzo de fluencia del filamento de PCL es de aproximadamente 17 MPa, sin embargo, como se presentó en el capítulo 3, este presentará propiedades mecánicas con un valor menor al encontrarse a una temperatura cercana a los 70°C. Al haber realizado una prueba de concepto en el laboratorio, la cual consistió en estirar el filamento con la fuerza humana, se llegó a la conclusión de que es posible estirarlo sin requerir del uso de algún mecanismo en específico. En la figura 6.8 se puede apreciar el resultado de la prueba de concepto que se ha llevado a cabo.

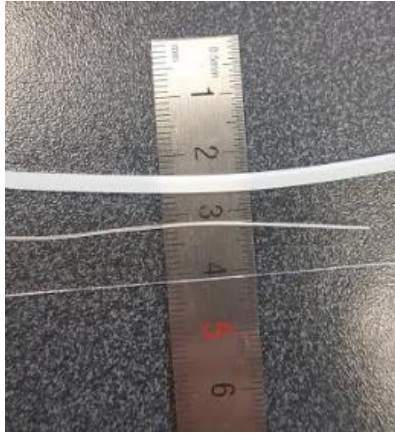


Figura 6.8 Prueba de concepto 1

Fuente: Autor. Word.

Se ha estimado que las características que este motor presenta son suficientes para poder estirar el filamento a través del diseño en cuestión.

Una vez que se han escogido cada uno de los componentes para este subsistema electrónico, se procede a diseñar un ensamble del conjunto. En la figura 6.9 es posible apreciar una representación computarizada del sistema electrónico. Posteriormente a este diseño es que se comenzará a hacer el diseño del lazo de control y modelado de la planta.

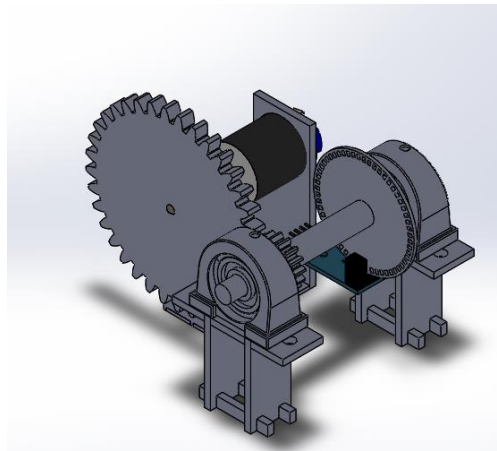


Figura 6.9 Ensamble sistema de control

Fuente: Autor. Solidworks.

Una vez que se diseñó este sistema, se procedió a armar un modelo para probar la viabilidad de este. En la figura 6.10 se puede apreciar el mecanismo ensamblado.

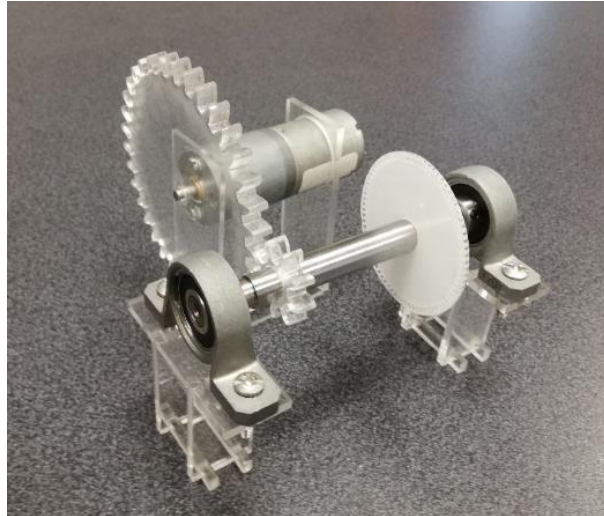


Figura 6.10 Sistema de medición de velocidad

Fuente: Autor. Word.

Al realizar pruebas al sistema diseñado, se determinó que no es una opción viable. Se llega a esta conclusión debido a que al realizar la lectura de velocidad es evidente que esta no es aceptable debido a su inestabilidad. Al ver la figura 6.11 se puede apreciar el resultado de leer la velocidad angular del motor cada segundo.

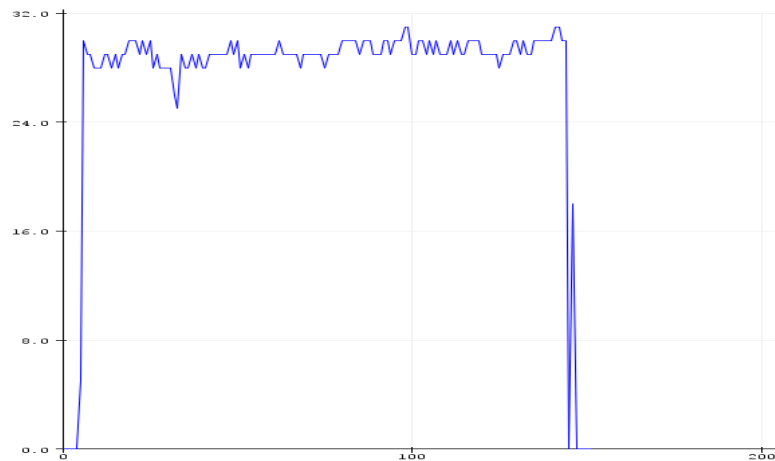


Figura 6.11 Lectura de velocidad cada 1000 ms.

Fuente: Autor. Arduino IDE.

Para poder lograr un buen control de velocidad es necesario realizar un muestreo de la velocidad varias veces a lo largo de un segundo. En este caso se escogió un tiempo de muestreo de 100 ms. Al apreciar la figura 6.12 se puede apreciar la lectura de velocidad cada 100 ms.

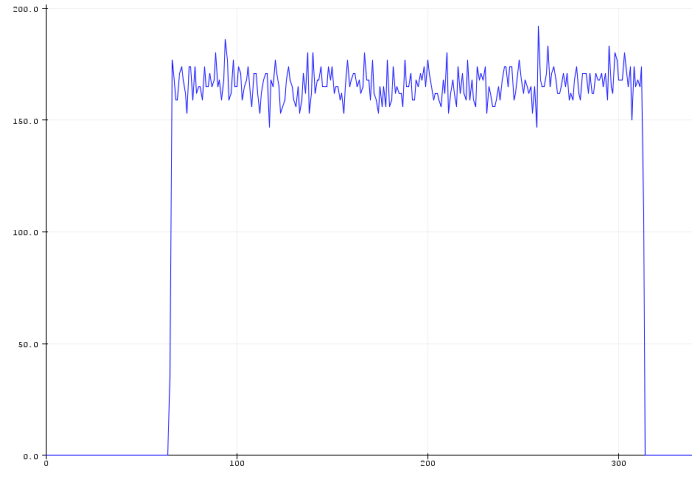


Figura 6.12 Lectura de velocidad cada 100 ms.

Fuente: Autor. Arduino IDE.

Al comparar las gráficas se puede notar que la lectura obtenida cada segundo presenta un comportamiento más estable que la que se realiza cada 100 ms. Cabe destacar que a pesar de que se puede notar una tendencia en la oscilación de las mediciones, estas no resultan ser lo suficientemente precisas como para intentar lograr un control de velocidad para el motor. Por esta razón es que se procede a diseñar el sistema utilizando un motor CD con un codificador de cuadratura incorporado.

6.2.2 Medición de tasa de extrusión actual.

Es necesario determinar a qué tasa se extruye el filamento, debido a que la extrusora no especifica un sistema de unidades. La tasa a la que se extruye el filamento depende de la velocidad a la que se ponga a operar el motor de la máquina y el tamaño de la boquilla. En este caso se ha hecho la medición para determinar la tasa de extrusión que se utiliza en el proceso actual de fabricación de filamentos. Para determinar este valor se hizo una marca en el chasis de la extrusora para definir en qué punto se pone a operar el motor. La prueba que se llevó a cabo consistió en hacer una marca en una porción de filamento extruido. A partir de esa marca se extruye material durante 30 segundos y se hace una segunda marca en el filamento. De esta manera se puede llegar a deducir la tasa a la que se fabrica el filamento al considerar el volumen obtenido por unidad de tiempo. En la tabla 6.3 se pueden apreciar los datos obtenidos a partir de la prueba descrita anteriormente.

Tabla 6.3 Datos para tasa de extrusión

Número de muestra	Grosor (MM)
1	3,47
2	3,5
3	3,46
4	3,44

5	3,46
6	3,44
7	3,55
8	3,66
9	3,74
10	3,75
11	3,76
12	3,74
13	3,71
14	3,72
15	3,75
16	3,75
17	3,74
18	3,7
19	3,7
20	3,67
21	3,67
23	3,68
24	3,67
25	3,67
26	3,68
27	3,61
28	3,57
29	3,55
30	3,58
31	3,6
32	3,61
33	3,62
34	3,65
35	3,64
Cantidad de muestras	35
Desviación Estándar	0,098063605
Promedio	3,632 mm

Tiempo de extrusión	30 s
Longitud del Filamento	35 cm
Volumen	3626,18 mm ³
Caudal	120,87 mm ³ /s

Fuente: Autor. Excel.

6.3 Diseño mecánico de la máquina

El primer paso que se sigue para diseñar el ensamble mecánico del sistema reductor de grosor de filamentos es hacer un esquema general de componentes necesarios para así determinar cuales se deben dimensionar de primero. A partir de este dimensionamiento se distribuirá el resto de las partes del conjunto mecánico. A continuación, se presenta un listado de los componentes que conforman esta sección:

- Chasis
- Ejes para rodillos
- Eje para carrete
- Rodillos
- Rodamientos

Es importante que el filamento que se va a estirar se someta a la menor cantidad de perturbaciones posibles. Para esto se busca que el vector fuerza que se encarga del estiramiento del filamento tenga una componente únicamente en el plano horizontal. Para esto se toman las medidas de la extrusora de manera que se puede conocer espacialmente la posición de la boquilla. En este caso al efectuar la medición se determina que la altura a la que se debe de colocar la fuerza de tensión es de 125 mm desde el apoyo de la máquina.

6.3.1 Rodillos:

En este proyecto, la solución que se diseña involucra un sistema de arrastre tipo llanta conformado por un par de rodillos. El filamento que se estirará debe formar una tangente horizontal con cada uno de los rodillos. Dado que se conoce que el punto de tangencia debe encontrarse a 125 mm de altura, se sabe que la ubicación de los ejes de los rodillos y las dimensiones de estos dependerán del diámetro de los rodillos. Para poder generar los planos mecánicos que indican las dimensiones finales de los ejes, primero se debe escoger el rodillo que se montará sobre este. Esto es debido a que el rodillo es un componente que se adquiere ya fabricado por lo que sus medidas son fijas. Es en función de este que se determinarán las dimensiones necesarias para cada uno de los ejes.

Al indagar con diferentes proveedores se determinó que los rodillos que se utilizarán tendrán un diámetro externo de 36 mm y un diámetro interno de 13.97 mm. Por otro lado, es de vital importancia que la superficie de los rodillos no sea totalmente rígida. Esto se debe a que, si esta no presenta la flexibilidad adecuada, el filamento se deformará y se aplanará. Si

el rodillo presenta una superficie con una consistencia gomosa, se podrá traccionar sin problemas dado que el material del recubrimiento es el que cede. En la tabla 6.10 se puede apreciar una comparación de diferentes materiales con los cuales es posible recubrir los rodillos.

Tabla 6.4 Materiales para recubrimiento de rodillos.

	Propiedades	Aplicaciones
Poliuretano	Alta resistencia al desgaste y abrasión. Alta elasticidad frente a altas durezas. Gran resistencia al desgarre y cizallamiento. Resistencia al agua, aceite y grasa.	Confección de partes de maquinaria: Guías, topes, cilindros rodillos, engranajes, collarines hidráulicos Revestimientos: Rodillos, Hormigoneras
Caucho	Soporta cargas y tensiones mecánicas elevadas. Gran elasticidad que permite grandes deformaciones del material. Resistente al desgaste por proyección de partículas de granulometría fina	Troquelado de juntas y confección de piezas de uso general en contacto con agua, aceites oxidantes y no oxidantes y acetonas. Revestimiento de rodillos.
EDPM	Alta resistencia al envejecimiento e intemperie. Resiste temperaturas entre -40° C a 120c°C. Alta resistencia a productos químicos inorgánicos o corrosivos.	Troquelado de juntas y confección de piezas de uso general en contacto con agua, ácidos oxidantes y no oxidantes. Revestimiento de rodillos

Silicón	<p>Este material es inoloro, insípido y no da soporte al desarrollo de bacterias.</p> <p>Resiste químicos que incluyen ácidos, oxidantes, amoniaco y alcohol.</p>	<p>Prótesis y aparatos quirúrgicos.</p> <p>Aislamiento de cables</p> <p>Conducción de gases y líquidos calientes.</p> <p>Barnices aislantes</p> <p>Pinturas industriales.</p>
---------	---	---

Fuente: Elaplas.*Elastómeros* [tabla]. Extraído de : <http://www.elaplas.es/>. Word.

Al analizar las características presentadas en la tabla anterior, se determina que la mejor opción para recubrir la superficie de los rodillos es el Silicón. La razón por la cual se escoge es que es el material menos costoso y fácil de encontrar en el mercado, además de que es un material lijable por lo que se facilita un eventual proceso de rectificación para brindar la cilindridad adecuada. También se prefiere dado que, al igual que el PCL, es un material biocompatible por lo que eventuales partículas que se puedan adherir al filamento no causarán problemas a la hora de hacer la inoculación celular.

Para poder hacer el recubrimiento primero se debe adquirir un cilindro cuyo diámetro interno vaya a tener el grosor final del rodillo. Dicho cilindro funcionará como molde para llevar a cabo el recubrimiento. Es necesario asegurar que el rodillo a recubrir sea concéntrico con el molde. Para lograr esto se recomienda utilizar anillos cuyo diámetro interno sea el del rodillo y diámetro externo sea el del molde. Una vez que el rodillo se ha introducido en el molde junto con los anillos, se debe inyectar el silicón en el área que se desea recubrir. Es importante que el material se deje curar por lo menos 5 días para asegurar que el recubrimiento se haga de manera exitosa. Es importante tomar en cuenta que el silicón se adhiere a la superficie del molde, por lo que antes de inyectar el material, se debe colocar una capa de vaselina en la superficie interna del molde. Por otro lado, también se debe tomar en cuenta que el silicón se endurece con el aire, por lo que no se debe tapar el molde.

Una vez que el silicón ha secado, es necesario llevar a cabo un proceso de rectificación. Esto se debe a que el rodillo podría no ser perfectamente cilíndrico, por lo que en la zona donde se hizo el recubrimiento habrán quedado zonas más gruesas que otras. Para solventar este problema se recomienda lijar la superficie del silicón hasta que esta tome la geometría adecuada. Para que el lijado se dé de manera uniforme se debe utilizar un bloque de madera que tenga el mismo grosor que el espacio entre el rodillo y el sobre de madera. A dicho bloque se le adhiere una lija y se va introduciendo paulatinamente debajo del rodillo. El motor debe estar funcionando a máxima velocidad para acelerar el proceso de lijado. A medida que el rodillo gire, la parte más gruesa se irá desgastando hasta que quede a nivel con

el resto de la superficie. Este es un procedimiento que se debe llevar a cabo con ambos rodillos para obtener los mejores resultados a la hora de poner a funcionar el sistema final.

6.3.2 Ejes:

Una vez que se han determinado las características dimensionales de los rodillos se procede a diseñar los ejes sobre los que estos se montarán. Se escoge el rodamiento de bolas con un diámetro interno de 8 mm y externo de 12 mm para montar sobre una chumacera. En este caso, se van a fabricar dos ejes iguales para cada uno de los rodillos y uno para montar el carrete.

Los ejes por fabricar deben de incluir espacios para montar:

- Dos rodamientos.
- Un rodillo
- Un acople para motor.

Si se aprecia la figura 6.13 se puede ver una representación tridimensional de los ejes propuestos para los rodillos. Por criterio del diseñador, se ha escogido un ajuste forzado medio para el juego entre el rodillo y el eje. Esto es para asegurar que el primero no presentará movimiento rotacional respecto al segundo.

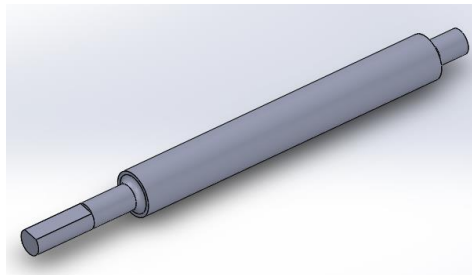


Figura 6.13 Eje para rodillos.

Fuente: Autor. Solidworks.

Por otro lado, en la figura 6.14 se puede apreciar una representación generada por computadora del eje sobre el cual se montará el carrete.

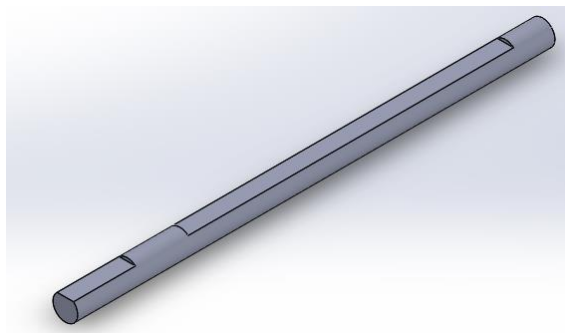


Figura 6.14 Eje para carrete.

Fuente: Autor. Solidworks.

En la figura 6.15 y 6.16 se puede apreciar el análisis de carga estático para los ejes sobre los que se montarán los rodillos.

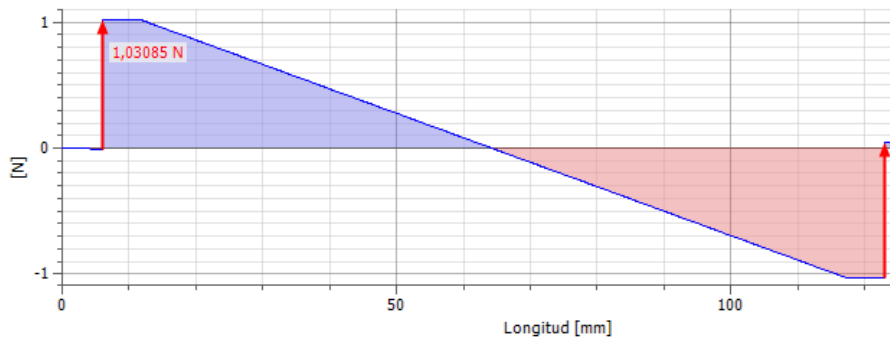


Figura 6.15 Diagrama de esfuerzo cortante eje para rodillos.

Fuente: Autor. Inventor.

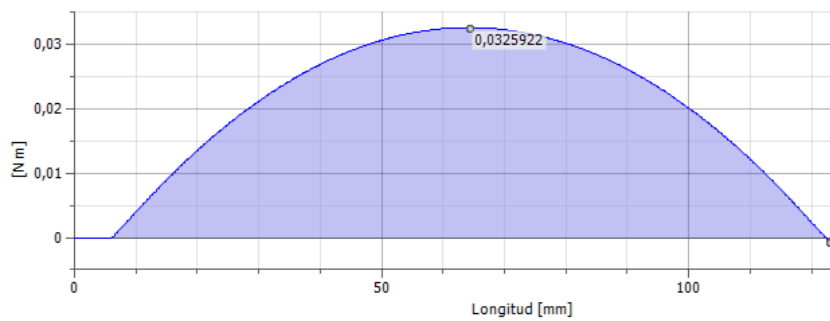


Figura 6.16 Curva de momento flector de eje para rodillo.

Fuente: Autor. Inventor.

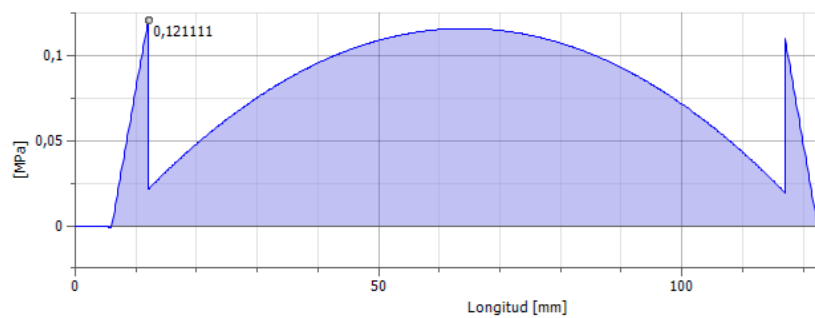


Figura 6.17 Esfuerzos percibidos por el eje para rodillos.

Fuente: Autor. Inventor.

Al considerar la figura anterior se puede conocer que el esfuerzo mínimo que debe de poder resistir la barra a partir de la cual se fabricarán los ejes es de 0.1211 MPa. Se puede notar al analizar la gráfica de esfuerzos que existe un concentrador de esfuerzos en cada uno de los escalonamientos. Como precaución se hace un redondeo con radio de 2 mm para reducir el concentrador y evitar una eventual falla del material.

Por otro lado, al analizar las figuras 6.18 y 6.19 se puede ver el análisis estático para el eje sobre el cual se montará el carrete.

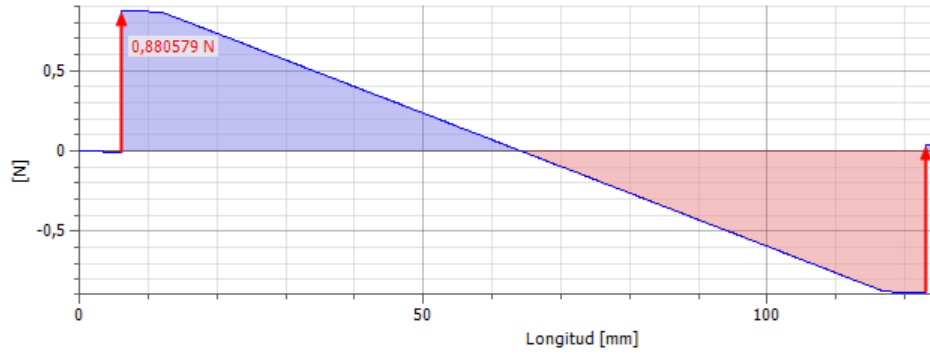


Figura 6.18 Diagrama de esfuerzo cortante eje para carrete.

Fuente: Autor. Inventor.

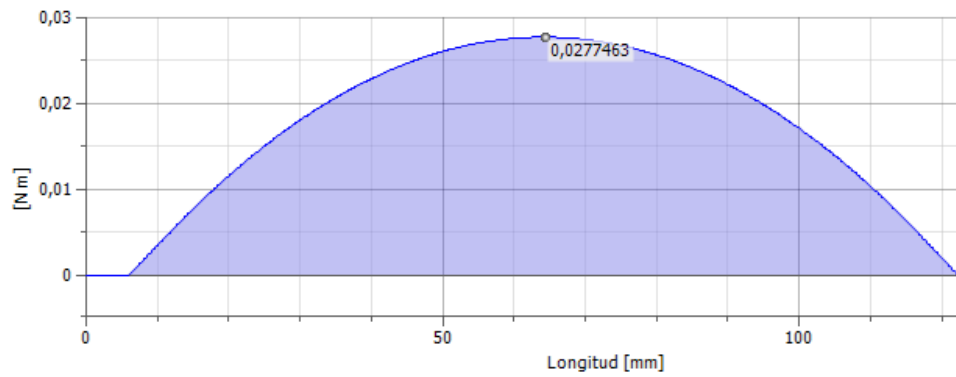


Figura 6.19 Curva de momento flector para eje carrete.

Fuente: Autor. Inventor.

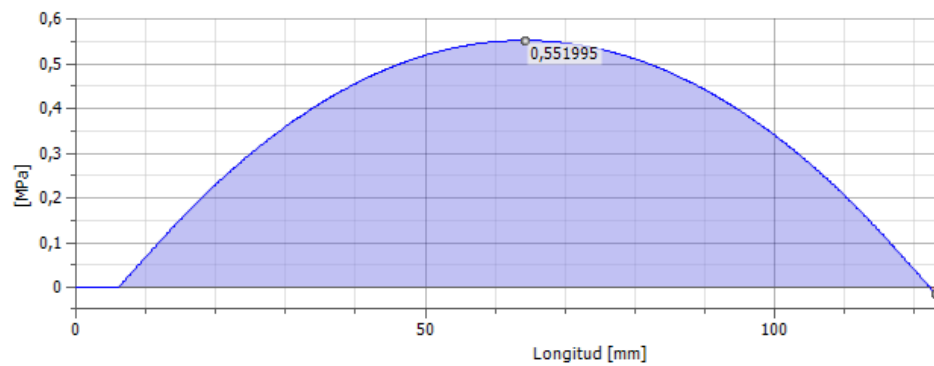


Figura 6.20 Esfuerzos percibidos por el eje para carrete

Fuente: Autor. Inventor.

Al analizar la gráfica 6.19 se puede notar que esta barra no presenta concentradores de esfuerzo considerables. Por esta razón se sabe que el esfuerzo mínimo que se debe poder resistir es de 0.552 MPa. A partir de los esfuerzos mostrados en los análisis estáticos se busca el material adecuado para fabricar la barra. A continuación, en la tabla 6.11 se puede apreciar una comparación entre tres materiales diferentes que se han considerado para fabricar los ejes.

Tabla 6.5 Materiales para fabricar ejes.

Material	Características	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Esfuerzo Último (MPa)	Módulo Elástico (GPa)
Acero AISI 1020	Este es un acero que presenta una alta maquinabilidad, alta resistencia y ductilidad. Debido a su bajo contenido de carbono, es resistente al endurecimiento por inducción o por exposición a la flama.	294.74	394.72	200
Acero AISI 1030	Este es un acero que presenta una resistencia y dureza moderada. Se puede endurecer y fortalecer a través del trabajo en frío.	440	525	190-210
Duraluminio	Esta es una aleación del aluminio que se caracteriza por ser resistente y de bajo peso. Es un material suave, dúctil y fácil de trabajar a temperatura ambiente. Es posible forjar y extruir en varias formas, perfiles y productos.	470	730	73.1

Fuente: AZOM. *Material Directory* [tabla] Extraído de: <https://www.azom.com/> Word.

Después de sopesar las características de cada uno de estos materiales, se escoge el Duraluminio. La razón por la cual este resulta ser el material más apto es por el hecho de que presenta una alta resistencia mecánica, baja densidad lo que se traduce en menor peso y posee una maquinabilidad adecuada.

Finalmente, se hace una simulación de esfuerzos para cada uno de los ejes con el fin de corroborar que el eje diseñado no presentará alguna falla debido a la carga a la que se ve sometido.

Al analizar las figuras presentadas anteriormente se puede notar que ambos ejes presentan secciones a las cuales se les debe de hacer un planeado. La razón para introducir esta geometría en la barra es para facilitar el acople entre estas y sus motores respectivos los cuales presentan una geometría similar. De esta manera se evita tener que maquinar los ejes con ajustes determinados. Esto se traduce en un ahorro económico dado que la fabricación de estos se hace más sencilla.

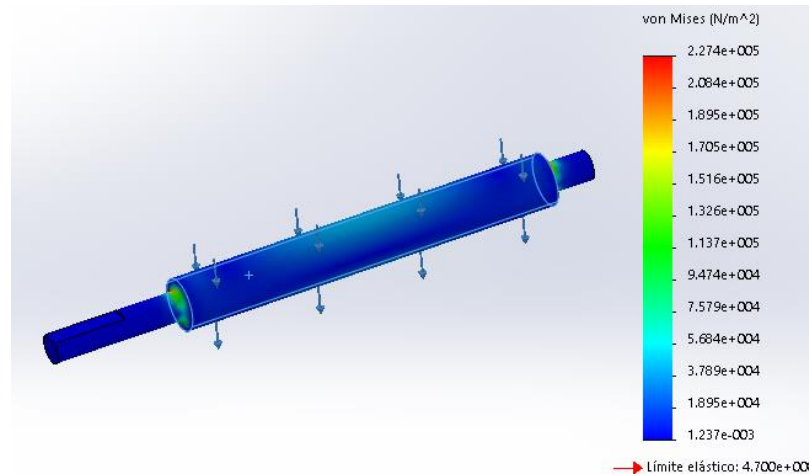


Figura 6.21. Simulación de esfuerzos eje para rodillos

Fuente: Autor. Solidworks.

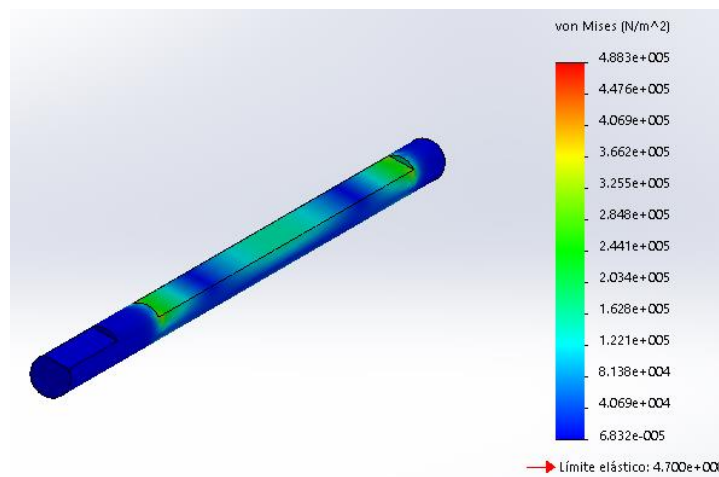


Figura 6.22 Simulación de esfuerzos eje para carrete.

Fuente: Autor. Solidworks.

Al analizar tanto las figuras 6.21 y 6.22 se puede notar como los esfuerzos más altos se encuentran en los escalonamientos. Si bien se trata de un concentrador de esfuerzo, se puede apreciar también el hecho de que no se sobrepasa el límite elástico, por lo que la pieza no sufre deformaciones permanentes debido a la carga.

Otro aspecto importante por analizar en los elementos diseñados como los ejes y acoples es la resistencia a la torsión. Este es un punto de interés dado que estos elementos se van a encontrar en constante rotación. Si bien se tiene libertad de movimiento a lo largo del eje sobre el que giran, siempre es necesario considerar el caso más crítico el cual será que el motor llegue a transmitir todo el par que le es posible. Si se analiza la figura 6.23, 6.24 y 6.25 se puede apreciar una simulación de los esfuerzos debido a la torsión a la que se somete cada una de las piezas.

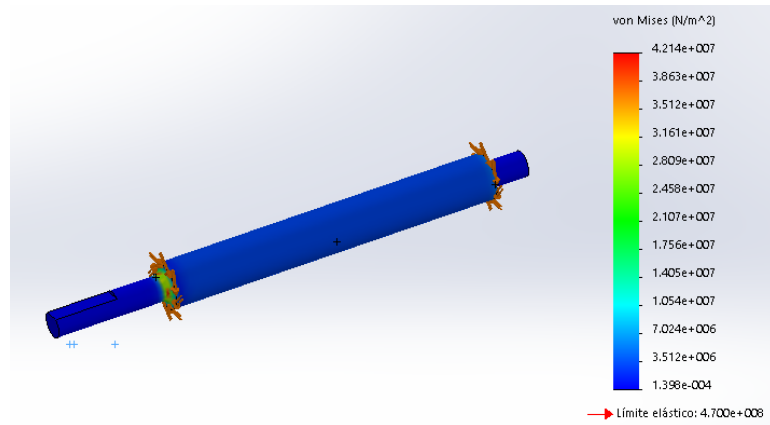


Figura 6.23 Simulación de esfuerzos torsionales en eje para rodillos.

Fuente: Autor. Solidworks.

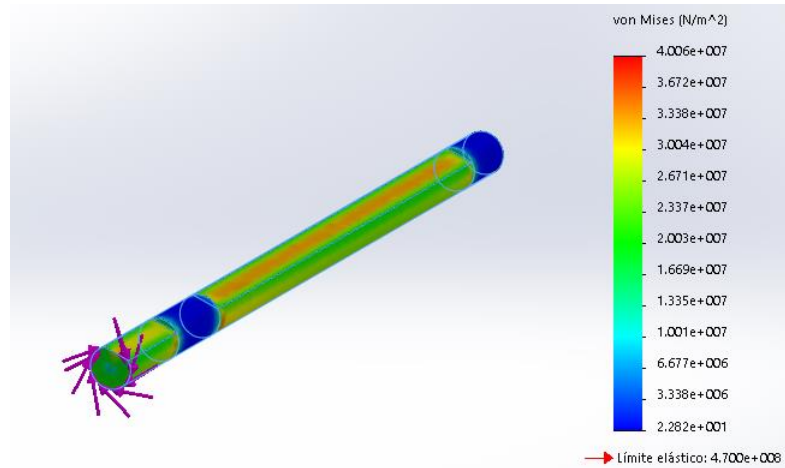


Figura 6.24 Simulación de esfuerzos torsionales en eje para carrete

Fuente: Autor. Solidworks.

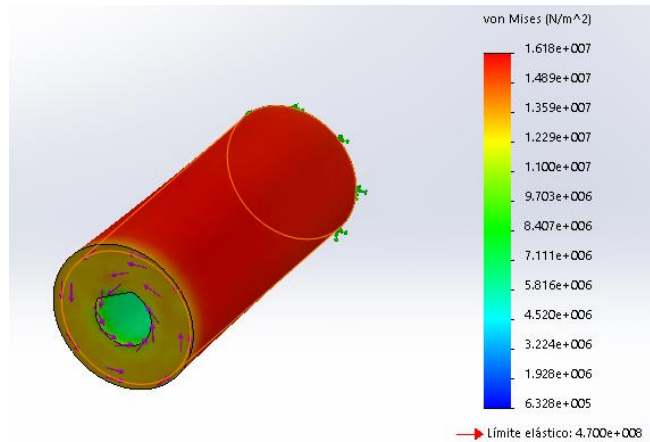


Figura 6.25 Simulación de esfuerzos torsionales en acople de motor.

Fuente: Autor. Solidworks.

Al analizar las figuras anteriores se puede notar que, considerando que se fabriquen de duraluminio, en los tres casos no se sobrepasa el límite elástico del material. Al tomar en cuenta la leyenda de colores, es fácil ver en qué zonas se muestra la mayor concentración de esfuerzos.

En el caso del eje sobre el cual se montarán los rodillos, se puede notar que la mayor concentración de esfuerzo torsional se presenta en los escalonamientos. Por otro lado, al ver la figura 6.24 se puede notar como esta barra presenta la más alta concentración en las zonas donde se ha dispuesto que se maquine un planeado. Finalmente, en el acople de los motores, al ser una superficie uniforme, el esfuerzo más grande se localizará a lo largo de todo el elemento.

6.3.3 Análisis de Fatiga:

En el caso de los ejes es necesario hacer una comprobación de fatiga debido a que se ven sometidos a movimientos cíclicos. Para calcular el factor de seguridad con el que se cuenta, se tomará en cuenta el criterio de Soderberg el cual se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \quad (22)$$

Donde σ_a es el esfuerzo alternante, σ_m es el esfuerzo medio, n es el factor de seguridad, S_e es la resistencia a la fatiga y S_{ut} es el esfuerzo de fluencia del material.

Debido a la forma en la que se ensamblará el sistema, se sabe que el esfuerzo medio será de 0 MPa ya que la carga proviene únicamente del peso del rodillo o carrete. Se diseñará para que ambos ejes puedan trabajar bajo el caso más crítico el cual es sosteniendo el peso de los rodillos. Partiendo del análisis estático que se ha presentado anteriormente, se puede notar que el esfuerzo alternante más grande al que se verá sometido cada eje sobre el que se montan los rodillos es de 121 kPa y 550 kPa para el eje que sostiene el carrete.

Por otra parte, es necesario considerar los diferentes factores que afectan a la resistencia de fatiga del material con el que se está trabajando. En la siguiente expresión se muestran todos los factores de corrección de Marin que llevan al valor adecuado para el cálculo del factor de seguridad.

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S_e'$$

Donde:

- K_a : factor de superficie
- K_b : factor de tamaño
- K_c : Factor de temperatura 1
- K_d : Factor de temperatura 2
- K_e : Factor de confiabilidad
- K_f : Factores varios
- S_e' : Límite de resistencia.

Dado que ambos ejes presentan el máximo esfuerzo en las secciones donde el diámetro es de 8 mm, se sabe que los factores en ambos casos serán iguales. En la siguiente tabla se especifican los valores que corresponden a cada uno de los ejes en cuestión:

Tabla 6.6 Factores de corrección para la resistencia a la fatiga

Factor	Valor
Ka	Maquinado en Frío: 1.0673
Kb	2.79mm<d<51mm: 0.9926
Kc	Flexión: 1
Kd	20°C<T<50°C: 1
Ke	90%: 0.897
Kf	1
Se'	235 MPa

Fuente: Autor. Word.

Al hacer la multiplicación de todos los factores de corrección, se obtiene que la resistencia a la fatiga del material para los ejes en cuestión es de 223.3 MPa.

Al resolver la ecuación 22 con los valores calculados, se obtiene que el factor de seguridad contra la fatiga para los ejes para rodillos es de $n = 1942$ y para el eje para carrete es de $n = 427$. En ambos casos se tiene un factor que indica que los ejes se encuentran sobredimensionados. Esto se debe a la alta resistencia a la fluencia del material relativo a la carga con la que se está trabajando la cual es de 1.67 N máximo. Una manera en la que se puede tratar de reducir dicho factor de seguridad es buscar un material que presente un esfuerzo a la fluencia menor, como por ejemplo un plástico como el ABS que presenta un esfuerzo de fluencia de 70 MPa. Una segunda alternativa para evitar el sobredimensionado es fabricar un par de rodillos con un diámetro interno de 5 mm. De esta manera los ejes se maquinan con un diámetro acorde a los rodillos y el factor de seguridad disminuye. La razón principal por la que en este proyecto se ha escogido el duroaluminio radica en que es el material a partir del cual es más rápido y económico fabricar cada uno de los ejes.

6.3.4 Chasis:

Una vez que se han diseñado y escogido los rodillos, ejes y rodamientos a utilizar, se procede a diseñar el chasis de la máquina. Esta va a ser la estructura sobre la cual se van a montar todos los componentes mecánicos y electrónicos del sistema. Esta consiste en varias placas sujetadas las unas con las otras por medio de angulares L, tornillos y tuercas de manera que se puede levantar y sostener el sistema completo. La forma que este subconjunto va a tomar será tal que formará dos espacios separados. Uno de ellos se va a encontrar expuesto dado que es donde se posicionarán los rodillos y el carrete. Este debe de ser tal que sea fácil montar y desmontar el carrete sobre el cual se enrollará el filamento estirado. También debe incluir una estructura sobre la cual se montarán los rodamientos, los cuales deben quedar alineados unos con otros. Por otra parte, se contará con un espacio cerrado dentro del cual se colocarán los motores y los componentes electrónicos del sistema. Es necesario que sea un

espacio cerrado debido a que se requiere que los componentes electrónicos se encuentren protegidos de factores ambientales para asegurar que el equipo funcionará con seguridad. Al apreciar la figura 6.26 se puede ver una representación generada por computadora del chasis de la máquina diseñada.

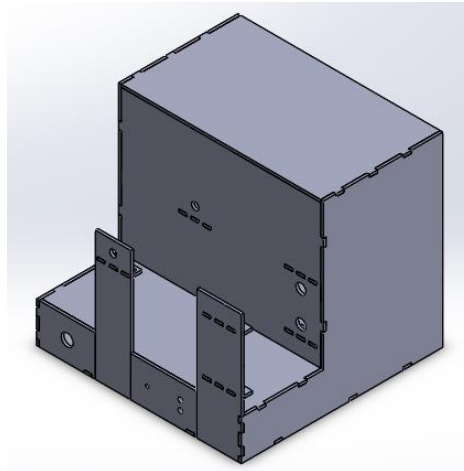


Figura 6.26 Chasis de la máquina

Fuente: Autor. Solidworks.

El material por utilizar para fabricar los paneles que conforman al chasis será del mismo material del que se fabricarán los ejes. Al analizar la figura 6.27 se puede apreciar una simulación de esfuerzos debido a la carga que el chasis estará soportando.

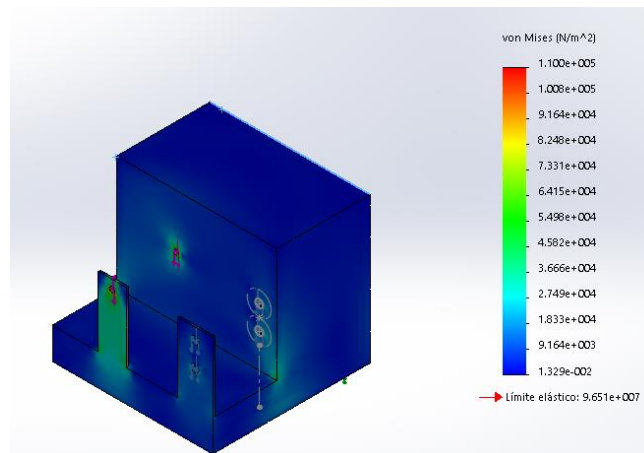


Figura 6.27 Simulación de esfuerzos en chasis de máquina.

Fuente: Autor. Solidworks.

Se puede notar que no se sobrepasan los esfuerzos de fluencia del material escogido, por lo que es seguro armar el sistema sobre esta estructura. Los planos mecánicos de cada uno de los componentes se pueden consultar en la sección de anexos. En la figura 6.28 y 6.29 se puede apreciar una representación de la máquina totalmente ensamblada.

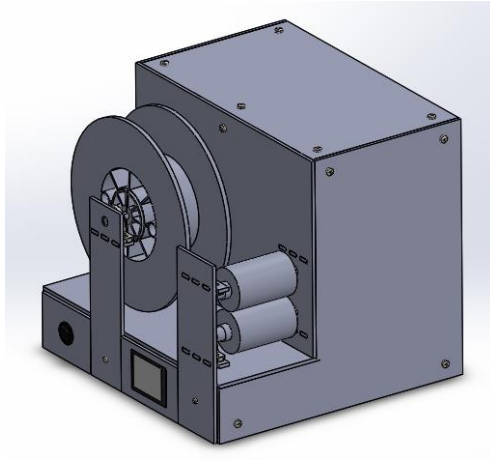


Figura 6.28 Sistema ensamblado.

Fuente: Autor. Solidworks.

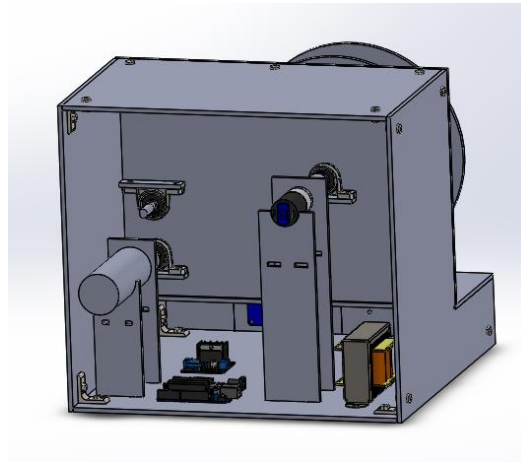


Figura 6.29 Vista interna del sistema ensamblado

Fuente: Autor. Solidworks.

El ensamble completo se podrá apreciar en la sección de anexos donde se incluyen cada uno de los planos, una lista de partes y una vista en explosión del sistema.

6.4 Sistema Electrónico:

El primer paso que se sigue es diseñar el sistema electrónico. Este contempla tanto el circuito de alimentación de los componentes electrónicos, así como el control del motor y la lectura del sensor de velocidad. A continuación, se muestra un resumen de los componentes principales de este sistema, el proceso de selección de cada uno se detalla en las secciones subsecuentes:

- Motor CD .
- Codificador de cuadratura.
- Microcontrolador.
- Fuente de alimentación

- Driver de motor CD

6.4.1 Fuente de alimentación:

La primera parte del sistema que se diseña es la fuente de alimentación para todos los componentes electrónicos. Para el diseño se considera que cada uno de los elementos a utilizar tiene tensiones de alimentación cuyos valores son de 12V o de 5V. La fuente tiene que ser tal que la tensión necesaria se pueda obtener del tomacorriente que se encuentra en la pared del laboratorio. Dado que el valor que normalmente se puede obtener de la red eléctrica es de 110 V de corriente alterna, se determina que es necesario diseñar un circuito acondicionador de señal ya que los componentes electrónicos a utilizar solo funcionan con corriente directa.

Considerando lo anteriormente dicho se procede con el diseño de un circuito reductor y rectificador de señal. Para ello se escoge utilizar un transformador, un puente de diodos y un capacitor electrolítico. El transformador escogido es marca Miyako modelo L-575. Este recibe en la bobina primaria recibe una tensión de 110 V AC y en la bobina secundaria entrega 24 V AC. Cabe resaltar que posee una derivación central de la cual es posible obtener 12 V AC. La corriente que este puede suplir es de 2 A la cual es suficiente para suplir la demanda que el sistema electrónico va a requerir. La señal de salida presenta la cualidad de que todavía es de corriente alterna, es decir, tiene un semiciclo positivo y un semiciclo negativo. Al ver la figura 6.30 se puede apreciar una simulación de la salida del secundario del transformador.

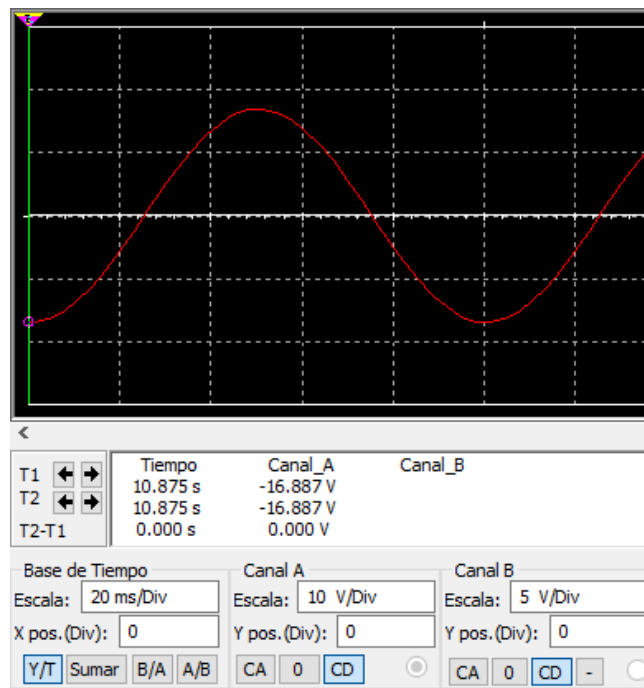


Figura 6.30 Señal en la bobina secundaria del transformador

Fuente: Autor. Multisim

El siguiente paso es convertir cada uno de los semiciclos en señales con valor positivo. Para lograr esto se conecta un puente de diodos a la salida de la bobina secundaria del

transformador. Al apreciar la figura 6.31 se puede ver una simulación de la señal al pasar por el puente de diodos.

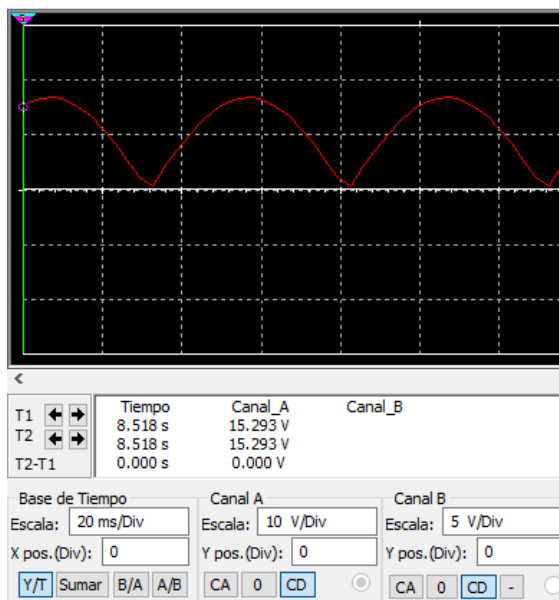


Figura 6.31 Señal obtenida del puente de diodos.

Fuente: Autor. Multisim.

Una vez que se han obtenido todos los semiciclos positivos se debe conectar un capacitor con una constante de carga tal que permita rectificar la señal oscilatoria. En este caso se ha escogido un capacitor electrolítico de 2200 uF. Al analizar la figura 6.32 se puede apreciar el efecto que surge conectar el capacitor a la salida del puente de diodos.

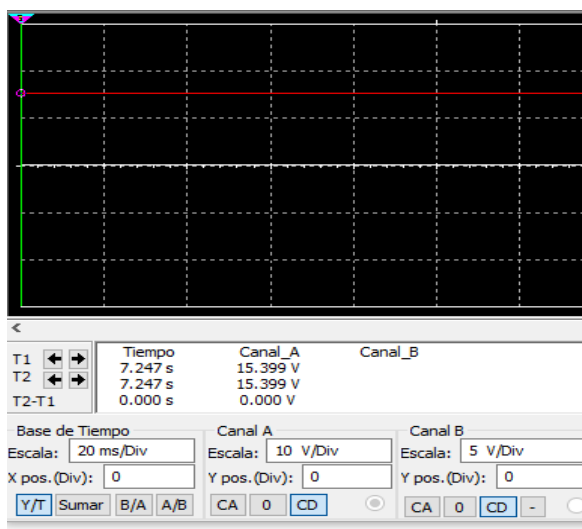


Figura 6.32 Señal Rectificada

Fuente: Autor. Multisim.

El paso final para obtener el circuito de acondicionamiento de señal es incorporar dos reguladores de tensión, uno de 12V y otro de 5V. Nótese que cada uno de estos componentes requiere en su entrada una tensión mayor a la que deben de entregar. Según la hoja del

fabricante, tanto el regulador LM7805 y el LM7812 son capaces de recibir una entrada de hasta 25V. En la figura 6.33 se puede apreciar la simulación de salida de cada uno de los reguladores.

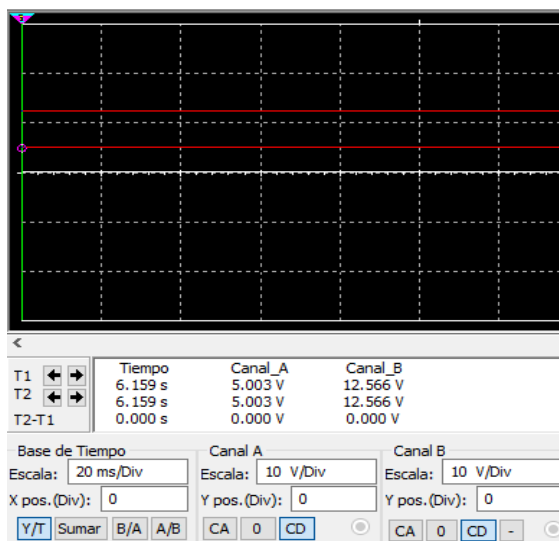


Figura 6.33 Señal de salida del circuito acondicionador de señal

Fuente: Autor. Multisim.

Finalmente, al ver la figura 6.34 se puede apreciar el esquema del circuito diseñado.

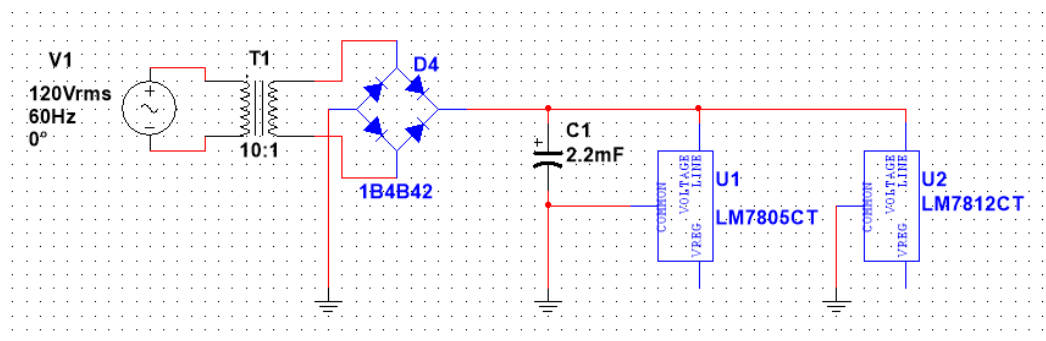


Figura 6.34 Circuito acondicionador de señal.

Fuente: Autor. Multisim.

6.4.2 Sistema de control:

El sistema electrónico deberá incluir un lazo de control de modo que se pueda tener un motor CD con un giro constante. La razón por la cual se requiere que este tenga giro constante es porque el conformado mecánico por tensión al que se va a someter el filamento de PCL tiene que ser a una tasa constante. Si el motor puede mantener una velocidad angular definida bajo carga, entonces se puede decir que ese va a transmitir un torque, que, de igual manera, es constante.

6.4.2.1 Selección del motor.

Para poder determinar el motor que puede tensionar el filamento de manera adecuada es necesario determinar el torque mínimo requerido. La ecuación que define el valor del torque viene dada a continuación:

$$\tau = r * F * \sin \theta \quad (1)$$

Donde r es el brazo de palanca, F la fuerza aplicada y Θ es el ángulo que se forma entre el vector fuerza y el brazo de palanca.

Para poder determinar el torque se tiene que obtener la fuerza con la que se debe tensionar el filamento para obtener la reducción del diámetro que se busca. Tal y como se presentó en el marco teórico, el PCL es un material cuyas propiedades mecánicas cambian drásticamente a medida que la temperatura cambia. En este proyecto se trabaja con el material a una temperatura a 70°C ya que esta es la temperatura con la que sale de la boquilla de la extrusora. La fuerza que se requiere va a ser aquella que haga que el filamento sobrepase el esfuerzo de fluencia a esta temperatura. Este esfuerzo no es un valor que se conozca debido a que las propiedades mecánicas del material no se encuentran reportadas para cada una de las temperaturas, por lo que no es posible llevar a cabo una simulación. Además, no es un valor que se pueda extrapolar partiendo de valores conocidos. Para solventar este problema se ha llevado a cabo una prueba para poder determinar de manera aproximada la fuerza que se le debe aplicar al material. En esta prueba se puso la extrusora a producir filamento de 3.63 mm de grosor promedio a una tasa constante de 120 mm³/s. Posteriormente el filamento se acopla a un dinamómetro y este es tensionado hasta obtener una deformación plástica. En la tabla 6.4 se pueden apreciar los datos recopilados de este experimento.

Tabla 6.7 Datos recopilados del experimento

Número de muestra	Grosor (mm)
1	0,71
2	0,62
3	0,73
4	0,63
5	0,65
6	0,71
7	0,72
8	0,7
9	0,61
10	0,71
11	0,69
12	0,71

13	0,67
14	0,71
15	0,7
16	0,72
17	0,69
18	0,7
19	0,72
20	0,79
21	0,71
Cantidad de muestras	21
Desviación estándar	0,040819
Promedio	0,695238

Fuente: Autor. Excel.

Después de haber utilizado el dinamómetro en esta prueba se llegó a la conclusión de que se necesitaron 0.1 N para lograr la reducción del diámetro del filamento. De la tabla anterior se puede notar que las medidas tomadas presentan una desviación estándar de 0.0408, lo cual indica que la dispersión de las medidas no es alta. Por otro lado, se puede concluir que partiendo de un grosor de 3 mm se puede obtener un filamento de grosor promedio de 0.69 mm. En este proyecto se requiere obtener un filamento con un grosor máximo de 0.1 mm por lo que considerando los resultados mostrados anteriormente se deduce que se necesita partir de un grosor más pequeño. Se propone utilizar una boquilla de aluminio con un orificio de 0.3 mm. Esta recomendación se hace debido a que 0.3 mm es la broca comercial más pequeña que existe. Por otro lado, en cuanto al material para fabricar dicha boquilla, se escoge duroaluminio debido a que presenta una alta maquinabilidad, lo que reduce la probabilidad de que la broca se rompa y por ende la dificultad de hacer el orificio.

Al analizar los datos obtenidos anteriormente se puede conocer el esfuerzo de fluencia del material a 70 °C. La ecuación que relaciona el esfuerzo con la fuerza aplicada se presenta a continuación:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Al considerar la fuerza de 0.1 N y el grosor promedio de 3.63 mm se puede llegar a despejar el esfuerzo de fluencia del material. En este caso se tiene que el esfuerzo es de 9.6 MPa. Finalmente, con el dato registrado por el dinamómetro se puede despejar el torque mínimo que el motor CD debe poder entregar para deformar el material. En este caso el radio de los rodillos que se van a utilizar es de 45.72 mm. Al despejar el torque necesario partiendo de la fuerza de 0.1 N y un brazo de palanca de 22.86 mm se obtiene que se requiere un torque mínimo de 0.002286 Nm. Se debe tomar en cuenta que el motor debe de incluir un codificador incorporado al eje para poder hacer un lazo cerrado para el control de velocidad.

Al realizar la prueba de extrusión con la boquilla de 1 mm de diámetro se determinó que el filamento sale con una velocidad lineal de 1.16 cm/s. Se sabe que a esta velocidad se obtiene un filamento que presenta un grosor de aproximadamente 1 mm. Para poder obtener un grosor de 0.1 mm es necesario que los rodillos arrastren el filamento a una velocidad lineal de 10 cm/s. Al traducir esta velocidad lineal a velocidad angular tomando en consideración el diámetro de los rodillos se obtiene que los motores deben girar a 20 RPM. El motor que se escoge para acoplar a los rodillos que tensionarán el filamento es el motor de 76 RPM de la serie 5200 que incluye un codificador de cuadratura acoplado a su eje. Este es un motor que registra un torque de parada de 14.12 Nm y un codificador con una cuenta de 3000 eventos por revolución. Si se consulta la sección de anexos se puede encontrar la hoja de especificaciones de dicho motor. En la figura 6.35 se puede ver una imagen del motor seleccionado.



Figura 6.35 Motor 76 RPM

Fuente: 76 RPM Sur Gear motor [imagen] Extraído de : <https://www.servocity.com/76-rpm-spur-gear-motor-w-encoder>

Según la propuesta presentada, se requiere usar un motor adicional para hacer girar el carrete sobre el cual se recolectará el filamento fabricado. En este caso se recomienda hacer uso de un motor idéntico al que se ha presentado anteriormente, ya que se sabe que será capaz de mover la carga del carrete al ser esta menor que la que experimentará por efecto del contacto entre los rodillos y el filamento, además de que se puede implementar un lazo cerrado de control para la velocidad.

Para regular la velocidad de los motores seleccionados se hará uso de un driver con doble puente H con una corriente máxima de 2A. Esta es una placa a la cual se le pueden conectar dos motores CD, los cuales son controlados por medio de un microcontrolador a través de los pines de entrada y de control. El microcontrolador dictará el sentido de giro que el motor tomará al poner uno de los pines de entrada en alto y otro en bajo. Por otra parte, la velocidad se regula mediante una señal PWM que el microcontrolador envía al pin de control. La placa va a transmitir dicho PWM al motor en un rango de tensión que va entre 0V a 12V.

Esta tensión de 12 V CD máximos se obtiene a partir de la alimentación propia de la placa. En la figura 6.36 se puede apreciar una imagen de la placa que se va a utilizar. En la sección de anexos se puede consultar el diagrama de conexión eléctrico.

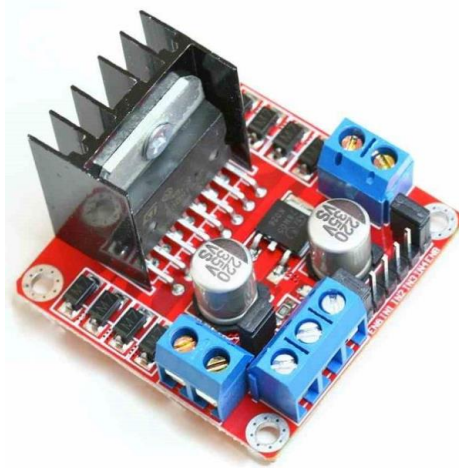


Figura 6.36 Driver con doble puente H para control dual de motor CD

Fuente: *1298 Dual H-Bridge Motor Driver* [Imagen]. Extraído de:
<https://www.microjpm.com/products/1298-dual-h-bridge-motor-driver-red/>

6.4.3 Filamentos Resultantes Teóricos

Al realizar la prueba de extrusión con la boquilla de 1 mm de diámetro se determinó que el filamento sale con una velocidad lineal de 1.16 cm/s. Se sabe que a esta velocidad se obtiene un filamento que presenta un grosor de aproximadamente 1 mm. Para poder obtener un grosor de 0.1 mm es necesario que los rodillos arrastren el filamento a una velocidad lineal de 10 cm/s. Al traducir esta velocidad lineal a velocidad angular tomando en consideración el diámetro de los rodillos se obtiene que los motores deben girar a 20 RPM.

6.4.4 Control de velocidad:

Para asegurar que el filamento se va a tensionar a una tasa constante, es necesario que el motor gire a una velocidad constante. Para lograr esto se diseña un lazo de control de velocidad para el motor. En este caso se trata de un motor CD que es capaz de alcanzar una velocidad angular máxima de 76 RPM que incluye un codificador de cuadratura acoplado al eje.

El primer paso para poder diseñar un control de velocidad es obtener un modelo teórico del comportamiento del motor. En la figura 6.37 se puede apreciar un esquema del circuito equivalente de un motor CD.

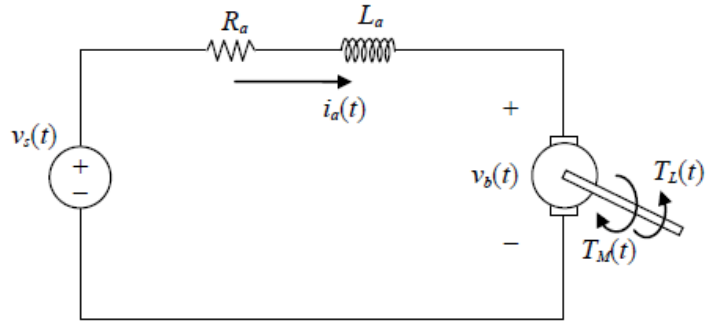


Figura 6.37 Circuito equivalente de un motor CD

Fuente: Chen, Y. (2015) DC motor.

De este circuito se puede apreciar que el motor tiene una entrada de tensión de cuyo valor depende el giro del eje del motor. En la tabla 6.5 se pueden apreciar los parámetros que gobiernan el comportamiento de un motor CD.

Tabla 6.8 Parámetros del modelo de un motor CD

Parámetro	Símbolo
Momento de inercia	J
Constante de fricción	B
Constante de fuerza contra electromotriz	Ke
Constante de torque	Kt
Resistencia de armadura	R
Inductancia eléctrica	L

Fuente: Autor. Word.

Al aplicar la ley de tensión de Kirchoff en el circuito equivalente del motor CD se puede obtener la siguiente ecuación:

$$R_a * i_a(t) + L_a * \frac{di_a(t)}{dt} + v_b(t) = v_s(t) \quad (3)$$

Donde $i_a(t)$ es la corriente de armadura del motor, $v_b(t)$ es la tensión contra electromotriz y $v_s(t)$ es la fuente de tensión eléctrica. La tensión contra electromotriz es proporcional a la velocidad angular del rotor. Esta relación se puede expresar de la siguiente manera:

$$v_b(t) = K_b * \omega(t) \quad (4)$$

Donde K_b es la constante contra electromotriz

El torque que el motor es capaz de proveer es proporcional a la corriente de armadura. El torque se puede obtener al multiplicar la corriente de armadura por un factor constante K_t . Al ver la siguiente ecuación se puede apreciar la relación anteriormente descrita:

$$T(t) = K_t * i(t) \quad (5)$$

Al considerar las igualdades mencionadas anteriormente es que se pueden llegar a escribir las siguientes ecuaciones que definen el comportamiento de un motor CD

$$R_a * i_a(t) + L_a * \frac{di_a(t)}{dt} + k_b * \omega(t) = v_s(t) \quad (6)$$

$$T_M(t) = k_t * i_a(t) \quad (7)$$

El motor CD se utiliza para mover una carga determinada. Es necesario considerar el comportamiento dinámico de esta para poder llegar a escribir las ecuaciones de espacio de estado. De acuerdo con la segunda ley de Newton la expresión que describe la dinámica del sistema es dada por la siguiente expresión:

$$J_M * \frac{d\omega(t)}{dt} + B_M * \omega(t) = k_t * i_a(t) \quad (8)$$

Donde J_M es el momento de inercia del rotor y B_M es el coeficiente de fricción.

Para obtener el espacio de estados, se escogen las variables $x_1(t) = i_a(t)$ y $x_2(t) = \omega(t)$ se pueden obtener las siguientes ecuaciones:

$$R_a * x_1(t) + L_a * \dot{x}_1(t) + k_b * x_2(t) = v_s(t) \quad (9)$$

$$J_M * \dot{x}_2(t) + B_M * x_2(t) = k_t * x_1(t) \quad (10)$$

Al reordenar las ecuaciones anteriores se obtienen las siguientes ecuaciones de estado:

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{R_a}{L_a} * x_1(t) - \frac{k_b}{L_a} * x_2(t) + \frac{1}{L_a} * v_s(t) \quad (11)$$

$$\dot{x}_2(t) = \frac{k_t}{J_M} * x_1(t) - \frac{B_M}{J_M} * x_2(t) \quad (12)$$

$$y(t) = x_2(t) \quad (13)$$

De las ecuaciones anteriores se pueden escribir las matrices del sistema:

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{k_b}{L_a} \\ \frac{k_t}{J_M} & -\frac{B_M}{J_M} \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$B = \begin{pmatrix} 1 \\ L_a \\ 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$C = (0 \quad 1) \quad (16)$$

Se han empleado diversos métodos para determinar los parámetros que gobiernan el comportamiento del motor CD que se recomienda utilizar en el diseño de este sistema. Por un lado, la resistencia de armadura se obtuvo a través de la medición de la resistencia eléctrica directamente en los cables que conectan a la armadura del motor. Para determinar la inductancia primeramente se debe determinar la impedancia a una tensión específica. Para esto, se conecta una fuente de tensión alterna a los cables del motor y se mide la corriente que circula. La relación que se sigue se puede ver en la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{V}{I} \quad (17)$$

Donde Z es la impedancia del motor, V es la tensión de fase aplicada y I es la corriente medida. Seguidamente se despeja la reactancia a partir de los valores conocidos de impedancia y resistencia siguiendo la siguiente ecuación:

$$X_L = \sqrt{Z^2 - r^2} \quad (18)$$

Donde XL es la reactancia inductiva del motor, Z es la impedancia y r es la resistencia del motor. Finalmente, la inductancia se obtiene al dividir la reactancia calculada entre la frecuencia de la red eléctrica. La ecuación para obtener la inductancia es la siguiente:

$$L = \frac{X_L}{2\pi 60} \quad (19)$$

En el caso del momento de inercia, se utilizará el que se obtiene de la carga que se acoplará al motor dado que es significativamente más grande que el que se obtiene a partir del rotor del motor. Por otra parte, la constante de tensión contra electromotriz del motor se obtiene al igualar la potencia eléctrica del motor a la potencia mecánica en Watts. La ecuación que relaciona las potencias mencionadas anteriormente es:

$$\sqrt{3} * E * I = \frac{2\pi}{60} * N * \frac{T}{12} * 1.356 \quad (20)$$

Al reacomodar la ecuación anterior se puede llegar a obtener la constante de torque del motor la cual se define de la siguiente manera:

$$k_b = \frac{E}{N} = 0.00684 * \frac{T}{I} \quad (21)$$

La constante de torque del motor, a su vez se puede obtener de la expresión para la constante de la tensión contra electromotriz. El término que divide el torque entre la corriente es el que da el valor a la constante del torque. Una manera de expresar esta relación se puede apreciar a continuación:

$$k_t = \frac{k_b}{0.011827} \quad (22)$$

La constante de fricción que se debe considerar en el modelo de este motor de corriente continua se obtiene a partir de los valores reportados para los rodamientos que se utilizarán en el mecanismo al cual se acoplará el motor. En la tabla 6.6 se pueden apreciar los parámetros obtenidos para el motor que se recomienda utilizar en el mecanismo de este sistema.

Tabla 6.9 Parámetros calculados para motor CD

Parámetro	Valor
Momento de inercia	$3.7581 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{Kg}$
Constante del torque del motor	6.03865 V/RPM
Constante de tensión contra electromotriz	0.07142 lb-in/A
Resistencia de armadura	0.4Ω
Inductancia	0.1876 H
Constante de fricción	0.16

Fuente: Autor. Word.

En la figura 6.38 se puede apreciar una simulación de la respuesta a lazo abierto de la plaza ante el escalón.

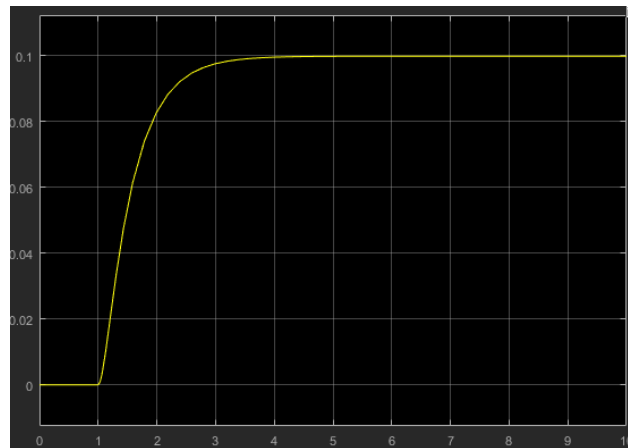


Figura 6.38 Respuesta a lazo abierto del motor CD

Fuente: Autor. Matlab.

6.4.5 Control:

Para llevar a cabo el control de la planta mostrada en la sección anterior se diseñará un controlador PID. La razón para escoger este método de control es por su sencillez y efectividad a la hora de usar. También se debe tomar en cuenta que el sistema será utilizado por operarios que no poseen un conocimiento técnico respecto al diseño y calibración de sistemas de control. El PID es un método que permite que personas que no conocen los fundamentos de un sistema de control sean capaces de calibrar las constantes en caso de ser necesario.

El primer paso que se sigue para diseñar un control PID es evaluar la respuesta a lazo abierto de la planta. En este caso se seguirá el proceso de diseño de Ziegler-Nichols. En la figura 6.39 se puede apreciar la respuesta a lazo abierto de la planta con una recta tangente al punto de inflexión.

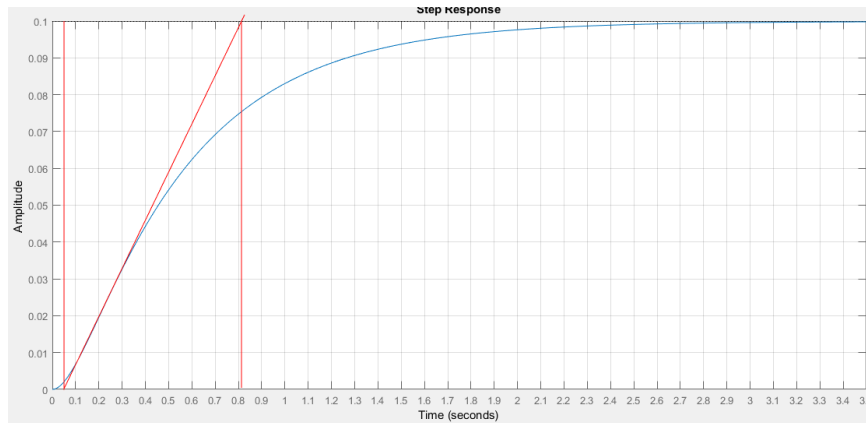


Figura 6.39 Respuesta a lazo abierto de motor CD.

Fuente: Autor. Matlab.

De la figura anterior se puede notar como el tiempo muerto de la planta es de 0.05 s. Esto se puede saber al tomar la lectura en el tiempo desde que se inicia la respuesta hasta el punto donde se interseca con la recta tangente al punto de inflexión. Por otra parte, se puede obtener la constante de tiempo del sistema al medir la distancia entre los extremos de la recta tangente al punto de inflexión. Cabe destacar que dicha recta se extiende a lo largo de la amplitud del impulso. En este caso se puede determinar que la constante de tiempo del sistema es de 0.76 s. Finalmente, se puede determinar que la ganancia estática K tiene un valor de 0.1 ya que dicho parámetro en este caso equivale a la amplitud del impulso. En siguiente ecuación se puede apreciar la estructura de un PID ideal calculado por el método de Ziegler-Nichols.

$$PID(s) = K_p * \left(1 + \frac{1}{T_i * s} + s * T_d \right) \quad (21)$$

En la tabla 6.7 se puede ver las relaciones que hay que tomar en cuenta para poder determinar cada uno de los parámetros K_p , T_i y T_d necesarios para el diseño del controlador PID.

Tabla 6.10 Fórmulas para parámetros de PID

Parámetro	K_p	T_i	T_d
Fórmula	$\frac{1.2}{K} * \frac{T}{L}$	$2 * L$	$0.5 * L$
Valor calculado	182.4	0.1	0.025

Fuente: Autor. Word

Se puede notar que el PID mostrado anteriormente es una expresión impropia dado que el numerador es un orden mayor que el denominador. Finalmente, para poder utilizar un PID real, se debe tomar en cuenta que es necesario incluir un polo adicional, al cual se le

llama polo parásito. Para poder hacer una simulación adecuada del comportamiento de la planta a lazo cerrado utilizando un controlador PID, se utiliza el bloque PID que Simulink incluye en su librería. Este es un bloque al cual se le pueden ajustar cada una de las constantes K_p , K_i y K_d de modo que la respuesta de la planta se ajuste a las condiciones que el diseñador especifique. En el caso del motor CD que se estará utilizando en este proyecto se ha dispuesto que se tendrá un tiempo de asentamiento menor a 2 segundos, un sobre impulso máximo de un 5% y un error de estado estacionario de un 0%. En la figura 6.40 se puede apreciar el lazo de control de la planta.

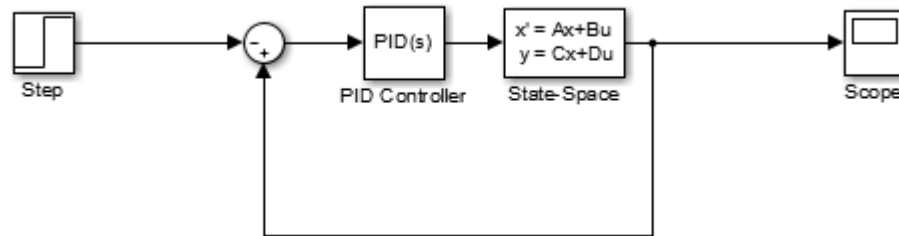


Figura 6.40 Lazo de control de motor CD.

Fuente: Autor. Matlab.

Al ingresar a las funciones del bloque PID de Simulink se puede ajustar la respuesta de la planta para que cumpla con los criterios de diseño establecidos previamente. En la tabla 6.8 se puede ver una toma de los valores que se pueden ajustar utilizando la herramienta de Simulink.

Tabla 6.11 Parámetros ajustables de un PID

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	-123.121	-52.4461
I	-306.3166	-125.6598
D	-10.5213	-4.3885
N	586.1182	972.7141
Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	0.341 seconds	0.701 seconds
Settling time	1.28 seconds	1.98 seconds
Overshoot	4.87 %	3.25 %
Peak	1.05	1.03
Gain margin	Inf dB @ Inf rad/s	Inf dB @ Inf rad/s
Phase margin	81.5 deg @ 5.13 rad/s	77.8 deg @ 2.49 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

Fuente: Autor. Matlab

Finalmente, en la figura 6.41 se puede ver de forma gráfica la simulación de la respuesta del motor utilizando el método de control descrito anteriormente.

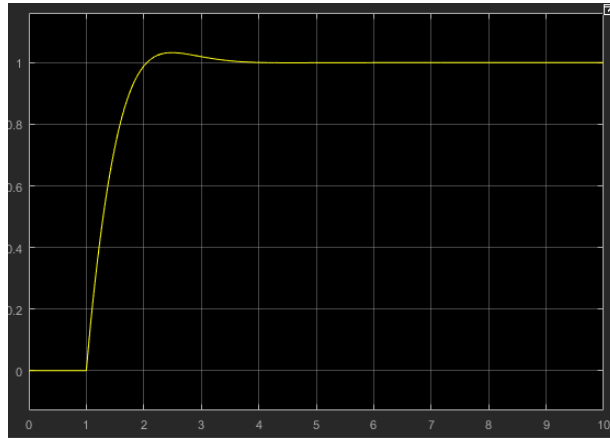


Figura 6.41 Respuesta a lazo cerrado de la planta

Fuente: Autor. Matlab.

6.4.6 Interfaz Humano-Máquina:

Parte de los requerimientos establecidos para el sistema que se está diseñando es que se debe incluir un interruptor para la energía total del sistema y un botón de inicio y paro. Para incorporar el botón de inicio y paro del sistema, se utilizará una interfaz gráfica HMI. En este caso se ha escogido una pantalla táctil marca Nextion de 2.4 pulgadas. Esta es una pantalla programable que es compatible con la placa de desarrollo Arduino Uno que se utilizará. En esta pantalla se desplegarán varios botones e indicadores que serán de utilidad para el usuario. Por un lado, se presenta el botón de inicio y paro. Tal y como su nombre lo indica, este se encargará de habilitar el funcionamiento del sistema. También se incorporan botones para aumentar o disminuir la velocidad de los motores de los rodillos y carrete por separado. En la pantalla además se muestra información que indica la velocidad a la que los motores se encuentran girando. En la figura 6.42 se puede ver una representación de lo que se mostrará en la pantalla HMI.

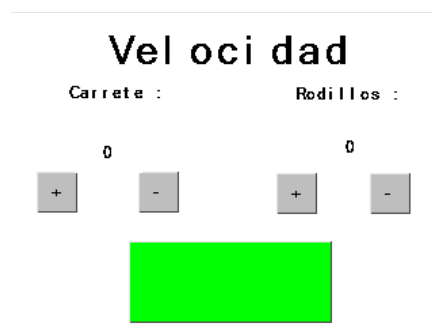


Figura 6.42 Interfaz humano-máquina

Fuente: Autor. Nextion Editor.

6.4.7 Medición del filamento resultante

Para poder medir el grosor del filamento que se va fabricando y poder ajustar la velocidad de los motores, se recomienda utilizar algún instrumento de medición que sea capaz de dar una resolución de por lo menos 0.01 mm. En este caso si bien un pie de rey puede proveer tal resolución, es más conveniente optar por una alternativa que no requiera de un diseño de montura complicado. En la tabla 6.9 se puede ver una comparación de distintos dispositivos que son capaces de dar una medición adecuada del filamento.

Tabla 6.12 Comparación de dispositivos de medición

Dispositivo	Ventajas	Desventajas
Vernier	Bajo costo Resolución adecuada	Requiere de diseño de montura Entra en contacto con el filamento
Micrómetro Láser	No entra en contacto con el filamento Se puede posicionar en cualquier parte del proceso de extrusión Brinda la más alta resolución	Alto costo
Indicador Digital	Resolución adecuada Costo medio	Entra en contacto con el filamento

Fuente: Autor. Word

Al comparar las diferentes posibilidades para realizar la medición del grosor del filamento en tiempo real, se opta por escoger un indicador digital con contactos de rodillos. Se considera que es la mejor opción debido a que brinda una alta resolución en sus mediciones, es de un costo accesible y no requiere de un diseño de montura complicado para posicionar en la línea de producción del microfilamento. En la figura 6.43 se puede apreciar el indicador digital marca “Mitutoyo” modelo “543-791” al cual se le puede acoplar una punta de contacto de rodillo del mismo fabricante.



Figura 6.43 Indicador digital

Fuente: Mitutoyo Absolute Indicator. [imagen] Extraído de: <https://ecatalog.mitutoyo.com/cmimages/003/320/543-791.jpg>. Word.

7 Capítulo 7. Resultados

7.1 Resultados Experimentales

En este proyecto se realizó el diseño de un sistema mecatrónico que es capaz de fabricar microfilamentos de policaprolactona que tienen un grosor igual o menor a 0.1 mm. Para probar que el diseño propuesto efectivamente funciona se realizó la construcción de un prototipo con el cual se fabricaron microfilamentos de PCL. En la tabla 7.1 se puede apreciar el resultado de la medición de 5 tramos de 20 cm cada uno tomando una lectura cada centímetro.

Tabla 7.1 Resultados experimentales

Número de medida	Número de muestra (mm)				
	1	2	3	4	5
1	0,06	0,07	0,06	0,06	0,07
2	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07
3	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07
4	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07
5	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07
6	0,05	0,06	0,05	0,06	0,08
7	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07
8	0,06	0,05	0,06	0,07	0,07
9	0,07	0,05	0,06	0,07	0,07
10	0,07	0,05	0,07	0,07	0,06
11	0,06	0,05	0,06	0,07	0,07
12	0,06	0,05	0,06	0,06	0,07
13	0,06	0,06	0,08	0,07	0,08
14	0,05	0,06	0,05	0,08	0,07
15	0,06	0,06	0,06	0,08	0,08
16	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07
17	0,06	0,07	0,06	0,06	0,07
18	0,07	0,07	0,06	0,06	0,07
19	0,07	0,06	0,06	0,06	0,07
20	0,08	0,06	0,06	0,06	0,07
Desviación Estándar	0,0069585	0,006407233	0,006048053	0,006708204	0,00447214
Valor Promedio	0,062	0,059	0,0605	0,0665	0,071

Fuente: Autor. Excel.

Al analizar la tabla anterior se pueden apreciar los resultados experimentales del proyecto. Dado que se trata de un proceso físico no ideal, se sabe que los datos finales siempre van a presentar una cierta dispersión. Por esta razón se incluyen no solo las lecturas del grosor, sino indicadores como la desviación estándar y el grosor promedio. En el caso de este

proyecto una de las finalidades era obtener filamentos que presentasen un grosor máximo de 0.1 mm y que además fueran regulares. Esta regularidad se define como una desviación estándar menor a 0.01mm. Al considerar los datos recopilados, se puede concluir que los filamentos sí cumplen con las características dimensionales requeridas dado que su valor promedio en cada uno de los casos presentados es menor a 0.1 mm y su desviación estándar indica que el grosor de los filamentos no presenta una variación que se considere inaceptable al ser esta menor a 0.01 mm. Por esta razón se considera que el diseño del sistema mecatrónico propuesto es efectivo y soluciona la problemática planteada.

7.2 Análisis Financiero.

En este apartado se detallará el costo de la implementación del sistema diseñado y se dará una perspectiva del beneficio que el laboratorio percibe de poner en funcionamiento la máquina.

7.2.1 Costo.

En la tabla 7.2 se pueden apreciar todos los componentes que no requieren maquinado alguno. Se puede apreciar el precio cantidad en que se requieren.

Tabla 7.2 Costo de componentes por adquirir

Ítem	Marca/Modelo	Unidades	Precio en dólares	Precio en colones
Motor CD de 76 RPM con Codificador	Servocity	1	54.56	32 000
Motor CD de 60 RPM	RK-370CC-14230	1	12.95	7 595
Driver Dual para motor CD	RED L298 Dual H Bridge	1	7.60	4 457
Convertidor DC-DC	LM2596 Step-Down Buck converter	1	4.95	2 903
Microcontrolador	Arduino Uno	1	25.95	15 220
Interfaz Humano-Máquina (HMI)	Nextion 2.4 pulg	1	21.95	12 874
Capacitor Electrolítico 2200 uF / 50V	Hong	1	1.75	1026
Rectificador	KBL608	1	1.35	791
Transformador	Miyako LP-575	1	11.20	6 569
Rodamiento	8 mm montura vertical	6	31.20	18 330

Pernos	M4, acero con tuerca	26	1.27	750
Pernos	M3, acero con tuerca	30	1.27	750
Rodillos	Toyman 1295	2	5.07	3 000
TOTAL	-	73	181.07	106 265

Fuente: Autor. Word.

Si se aprecia la tabla 7.3 se puede apreciar el desglose del costo de cada una de las partes que requieren maquinado.

Tabla 7.3 Costo de partes que requieren maquinado (Prototipo)

Ítem	Material	Unidades	Costo en colones
Eje para rodillo	Duraluminio	2	41 450
Eje para carrete	Duraluminio	1	20 720
Acople para motor 76 RPM	PLA	1	370
Acople para motor 60 RPM	PLA	1	370
Montura carrete	PLA	1	1 800
Chasis	Plywood	7	2 000
Montura motor 76 RPM	Plywood	1	250
Montura motor 60 RPM	Plywood	1	250
TOTAL	-	15	67 210

Fuente: Autor. Word.

Al sumar los costos totales de las tablas 7.2 y 7.3 se puede obtener que el costo total del proyecto es de 173 475 colones. Actualmente el laboratorio utiliza de forma inadecuada varios recursos para obtener los microfilamentos de PCL. Por un lado, se utiliza una impresora 3D como extrusora para obtener un filamento delgado. Este filamento delgado es el que se estira manualmente para obtener el microfilamento deseado. Cabe destacar que este procedimiento presenta una pérdida de un 66 % aproximadamente. Tomando en cuenta que un frasco de 500 g de policaprolactona tiene un costo de \$ 240, se estaría tratando de una pérdida económica de \$ 158.4 con cada frasco que se adquiere. Por otro lado, se tiene un desaprovechamiento del recurso humano disponible ya que se destinan 3 asistentes durante 16 horas a la semana para producir el filamento.

Con la implementación del sistema automático diseñado se estima que el único tramo que se desperdicia son los primeros 100 cm que salen de la extrusora. Tomando en cuenta que se cuenta con una boquilla con un diámetro de 1 mm y que la densidad del material es

de 1.145 g/cm³, se calcula que la cantidad de material que se desperdicia es de 0.9 g. Esto implica que se da un aprovechamiento de 99,82 % partiendo de un frasco de 500 g. Esta es una pérdida que no se puede eludir dado que siempre tiene que pasar un lapso mientras que el filamento se extruye inicialmente y este disminuye su diámetro hasta medir menos de 0.1 mm. En el caso de este proyecto no se puede establecer un indicador que muestre una proyección del retorno de la inversión debido a que el laboratorio no presenta alguna actividad lucrativa. Como se ha establecido anteriormente, el beneficio más grande que se percibe es que se obtiene un uso más efectivo de los recursos económicos que se destinan para el laboratorio por parte del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Por otro lado, se solventa un problema crítico dado que, con la máquina diseñada, se pueden obtener las probetas (filamentos en este caso) necesarias para continuar con la investigación de “Desarrollo de un Sistema de Estudios In-Vitro adaptable en equipo de Pruebas Dinámicas”.

Los resultados anteriores se obtuvieron a partir de un prototipo que se armó de manera adicional al diseño del sistema. Si se consulta la figura 7.1 se puede ver dicho prototipo junto al resto de componentes de la línea de fabricación de microfilamento.

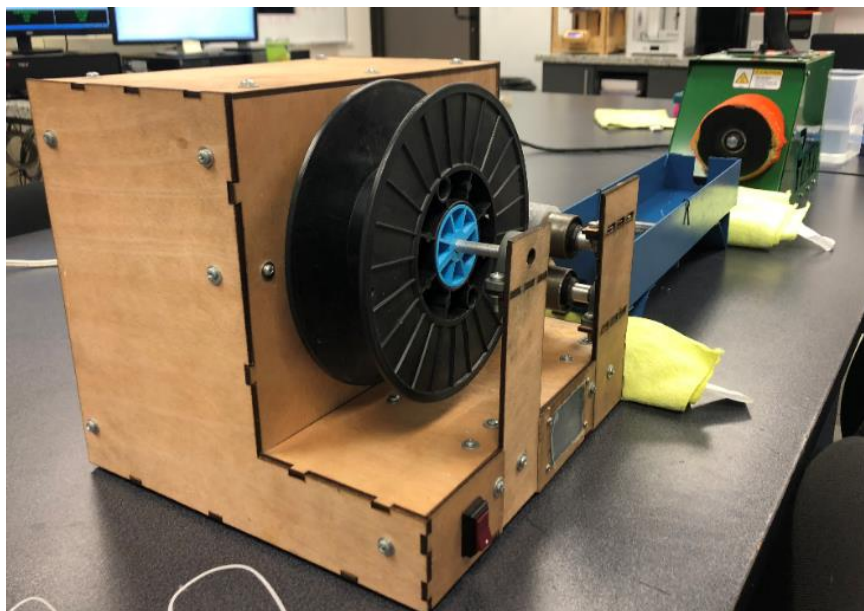


Figura 7.1 Sistema completo

Fuente: Autor. Word.

8 Capítulo 8. Conclusiones y Recomendaciones

8.1 Conclusiones

- a) Se entregó al laboratorio de la Escuela de Ciencia e Ingeniería de los Materiales del ITCR un diseño de un sistema mecatrónico que es capaz de fabricar microfilamentos con las características dimensionales requeridas.
- b) El diseño propuesto resulta ser de fácil uso para los asistentes e investigadores del laboratorio gracias a una interfaz humano-máquina táctil que es intuitiva de usar.
- c) El sistema de control propuesto puede ser calibrado por los investigadores y asistentes del laboratorio en caso de implementarse alguna mejora en el futuro.
- d) Se realizó un análisis económico del proyecto, el cual demuestra que la implementación del sistema diseñado se traduce en un mejor aprovechamiento de los recursos económicos debido al poco desperdicio que implica.

8.2 Recomendaciones

- a) Diseñar un sensor de medición óptico de bajo costo para medir en tiempo real el grosor del filamento sin que este entre en contacto con alguna superficie que pueda introducir perturbaciones.
- b) Mejorar el diseño de la pileta de agua para que el filamento pueda entrar y salir de una columna de agua de manera directa y sin tener que pasar por poleas.
- c) Fabricar una boquilla para la extrusora que tenga un grosor de 0.3 mm de manera que se facilite la obtención del grosor requerido

9 Bibliografía

- Barreda, S. (2015). *PLAN DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN LA CONFIABILIDAD (R.C.M.) EN LA EDAR DE NULES-VILAVELLA*. Castelló de la Plana: Universitat I Jaume. Obtenido de http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/128127/TFG_2015_BarredaBeltranS.pdf?sequence=1
- Eldridge, D., & Whitton, Z. (9 de enero de 2012). Plastic Filament Extrusion System for Use with a 3D Printer. Vancouver, British Columbia, Canadá: University of British Columbia. Obtenido de <https://open.library.ubc.ca/media/download/pdf/52966/1.0074472/1>
- Hutmacher, D. W. (2000). Scaffolds in tissue engineering bone and cartilage. *Elsevier*, 21(24), 2529-2543. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142961200001216?via%3Dihub>
- Kurniawan, D., Nor, F. M., Lee, H. Y., & Lim, J. Y. (2011). Elastic properties of polycaprolactone at small strains are significantly affected by strain rate and temperature. *Engineering in Medicine*, 1016-1020. doi: 10.1177/0954411911413059
- Langer, R., & Vacanti, J. (1993). Tissue engineering. *Science*, 260(5110), 920-926. doi:10.1126/science.8493529
- Lipponen, M. (5 de junio de 2015). *Designing extrusion die for 3D filament manufacturing*. Obtenido de theseus: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/96364/slutarbete%20matti%20lipponen%20final.pdf;sequence=1>
- Martins, A., Reis, R., & Neves, N. (2008). Electrospinning: processing technique for tissue engineering scaffolding. *Maney*, 1-19.
- Moubray, J. (2004). MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD (RCM). *RCM2*. Obtenido de http://www.mantenimientoplanificado.com/art%C3%ADculos_rcm_archivos/RCM2%20EXPLICACION.pdf
- Park, S. H., Kim, T. G., Kim, H. C., Yang, D.-Y., & Park, T. G. (2008). Development of dual scale scaffolds via direct polymer melt deposition and electrospinning for applications in tissue regeneration. *Acta Biomaterialia*, 4(5), 1198-1207. doi:doi.org/10.1016/j.actbio.2008.03.019
- Ragaert, K., Cardon, L., De Baere, I., & Degrieck, J. (2014). Bulk mechanical properties of thermoplastic poly- ϵ -caprolactone. *Research Gate*, 1-6. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/270509196>
- Roldán Vasco, S., Vargas Isaza, C. A., Mejía Suaza, M. L., Zapata Giraldo, J., & Moncada Acevedo, M. E. (2016). *Ingeniería de tejidos y aplicaciones*. (I. T. Metropolitano, Ed.) Instituto Tecnológico Metropolitano. Obtenido de https://books.google.co.cr/books?id=e8Y3DwAAQBAJ&dq=degradacion+a+granel&hl=es&source=gbs_navlinks_s

- Sabino, M., Loaiza, M., Dernowsek, J., Rezende, R., & Da Silva, J. (2017). TÉCNICAS PARA LA FABRICACIÓN DE ANDAMIOS POLIMÉRICOS CON APLICACIONES EN INGENIERÍA DE TEJIDOS. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 120-146.
- Woodruff, M. A., & Hutmacher, D. W. (2010). The return of a forgotten polymer— Polycaprolactone. *Progress in Polymer Science*, 1-40. Obtenido de <https://pdfs.semanticscholar.org/ca1d/aa7f1183ac8d09f50891b7bb92873772f9d2.pdf>

10 Anexos

A1. Manual de usuario

Este es un sistema cuya función es tensionar y recolectar filamento proveniente de una extrusora. Este sistema posee dos motores los cuales se han acoplado uno a un carrete para recolectar el filamento resultante y otro acoplado a un par de rodillos los cuales se encargan de arrastrar y tensionar el filamento. En la figura A1 se puede apreciar una representación de ambas partes.

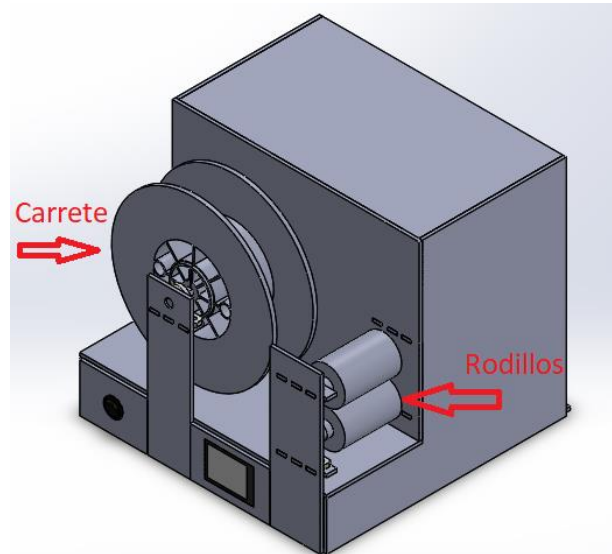


Figura A 1 Carrete y Rodillos

Fuente: Autor. Solidworks

Operación:

Para poner a funcionar la máquina primero se debe encender el interruptor principal. Este se encarga de dar alimentación interna a todo el sistema. Al pasar a la posición de encendido se debería de encender la pantalla de interfaz humano-máquina. En la figura A2 se pueden apreciar cada uno de los dispositivos de manejo del sistema, donde se marca como número 1 el interruptor principal y como número 2 la pantalla HMI.

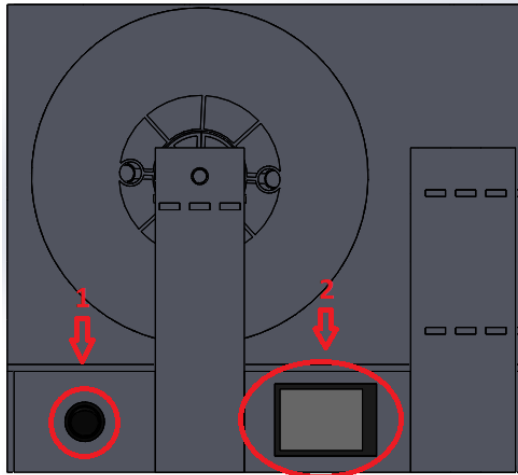


Figura A 2 Interruptor y pantalla HMI

Fuente: Autor. Solidworks.

La interfaz humano-máquina o HMI es la terminal a través de la cual se manejará el dispositivo. En ella se pueden apreciar tres leyendas:

- Velocidad
- Carrete
- Rodillos

Esto lo que indica es que desde aquí se puede ajustar la velocidad angular de tanto el carrete como los rodillos por separado. Para poder comenzar a variar las velocidades de los motores primero se debe habilitar el sistema. Para esto se debe oprimir el botón verde que se despliega en la parte central inferior de la pantalla. El sistema está listo para comenzar a operar una vez que dicho botón cambia a color rojo. Como se ha mencionado anteriormente, este es el botón que habilita el funcionamiento del sistema, por lo que si se oprime mientras este se encuentra en operación, va a deshabilitar el funcionamiento de los motores poniéndolos con velocidad 0, más no corta la alimentación eléctrica del dispositivo. En la figura A3 se puede apreciar una imagen de lo que la interfaz debería mostrar al usuario.

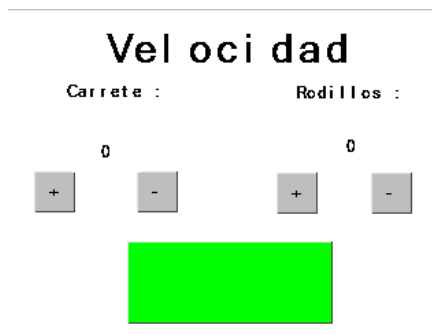


Figura A 3 Interfaz HMI

Fuente: Autor. Nextion Editor

Cabe destacar que en el caso de este dispositivo la velocidad para el motor del carrete se muestra como el ciclo al que se ajusta el PWM del microcontrolador y la velocidad para los rodillos se muestra en cuentas por unidad de tiempo. En ambos casos es un valor que puede ir desde 0 hasta 255, siendo 0 velocidad de parada y 255 velocidad máxima para cada uno de los motores. Para aumentar la velocidad de cada uno de los motores se debe oprimir el botón que muestra el símbolo de suma “+” y para disminuirla se debe oprimir el botón que muestra el símbolo de resta “-”.

Cargar filamento:

Para fabricar filamento es indispensable contar con una extrusora y una pileta de agua. Antes de encender el tornillo de la extrusora, se debe encender el sistema de arrastre del filamento. Se recomienda inicialmente poner los rodillos a girar con una velocidad de 20 y el carrete con un PWM de 40. Una vez que se encuentran en operación se puede encender el tornillo sin fin de la extrusora. En este punto comenzará a salir filamento de la boquilla que se tenga acoplada. Este se debe guiar lentamente con la mano pasándolo por la pileta llena de agua (sin estirarlo) hasta que la punta alcance los rodillos y estos lo comiencen a arrastrar. Una vez que la punta del filamento ha pasado a través de los rodillos, esta se debe adherir al carrete que se encuentra en movimiento.

A partir de este punto se debe bajar la velocidad de la extrusora al valor mínimo. Una vez logrado esto ya se puede comenzar a variar la velocidad de los rodillos del sistema de arrastre para poder alcanzar el grosor del filamento que se desea. Se recomienda ir subiendo la velocidad tanto de los rodillos como del carrete paulatinamente hasta que se pueda apreciar que el filamento fabricado posea las características dimensionales deseadas. Se recomienda hacer uso de un micrómetro digital con puntas de rodillo para poder conocer el grosor que el filamento presenta en tiempo real.

Descargar filamento:

Para poder recolectar el filamento que se ha fabricado, se debe retirar el carrete de la máquina. Para lograr esto se debe retirar el tornillo que se encuentra en el frente de la máquina y que mantiene en posición el panel sobre el cual se monta el eje del carrete. En la figura A4 se puede ver la ubicación de dicho tornillo.

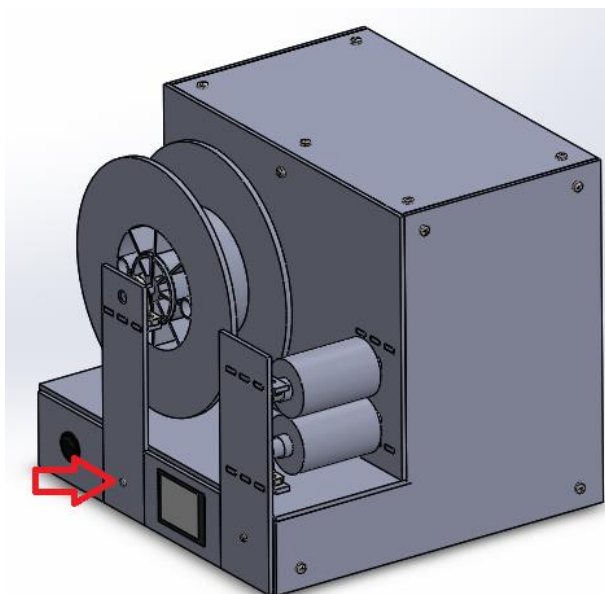


Figura A 4 Tornillo de sujeción carrete

Fuente: Autor. Solidworks.

En caso de que el dispositivo de arrastre presente alguna falla o comportamiento anómalo, se debe consultar el programa de mantenimiento preventivo para poder detectar fallas funcionales e identificar posibles causas, efectos y acciones correctivas.

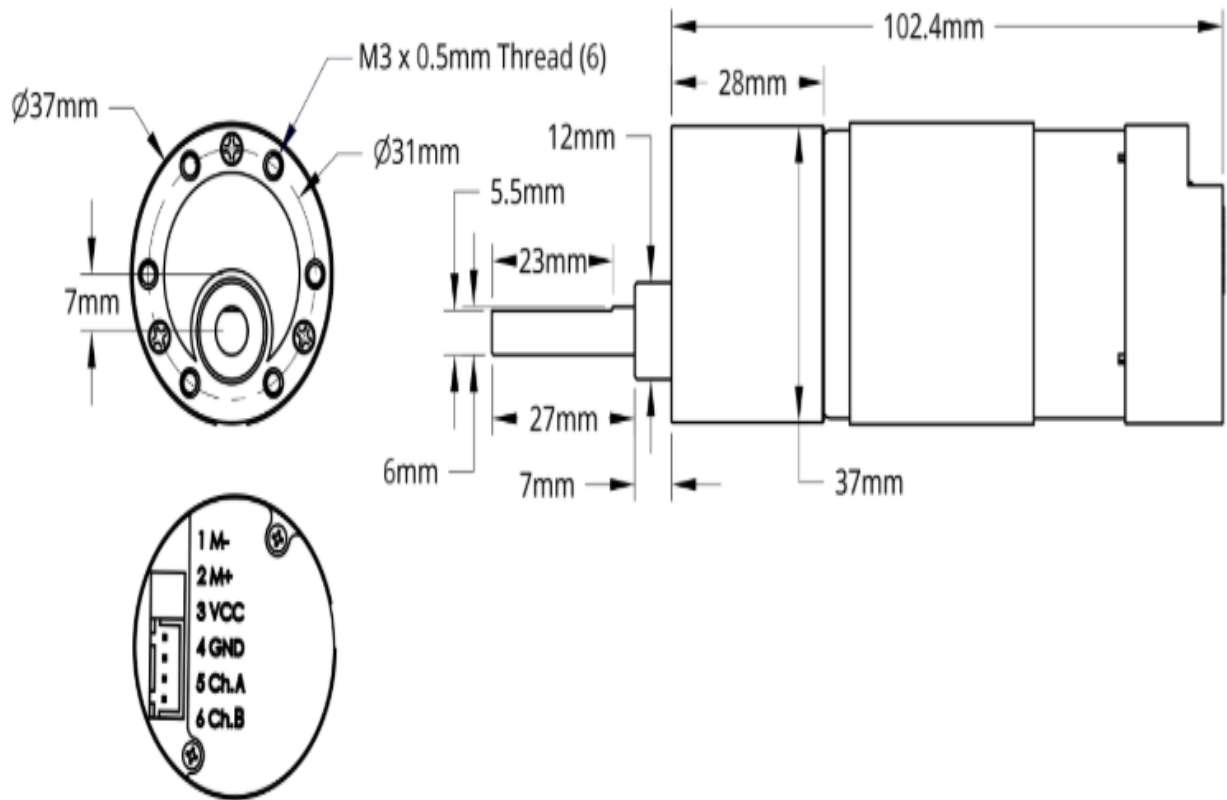
A2. Plan de Verificación

Plan de Verificación			Resultados	
Aspecto	Requerimiento	Descripción de la prueba	Cumple	No Cumple
Partes a incluir en el sistema	Sistema cuenta con mecanismo de encendido/apagado	Sistema debe encender y apagar al accionar el interruptor principal		
	Sistema cuenta con mecanismo de paro de emergencia	Sistema debe de operar o detenerse con botón para habilitar		
	Sistema cuenta con interfaz gráfica	Inspección Visual		
	Sistema cuenta con sistema de recolección de microfilamento.	Inspección Visual		
Fabricación de microfilamento	Microfilamento se obtiene por método de reducción de grosor por estiramiento del material	Inspección Visual		
	Mecanismo de arrastre proporciona tensión constante Solo hay una línea de producción	El filamento resultante no debe presentar bultos Inspección Visual		
	Sistema de recolección no afecta grosor del filamento	El sistema de recolección debe girar a una tasa menor que el de arrastre.		
Componentes electrónicos y programación	Debe existir una única fuente de alimentación eléctrica.	Inspección visual/ Debe existir un único transformador que alimenta al sistema.		
	La programación de los parámetros de funcionamiento se hace por computadora	El microcontrolador debe poder conectarse y programarse por medio de la computadora.		
	Los parámetros de funcionamiento se pueden visualizar por computadora	Se puede graficar la velocidad de los motores al conectar el microcontrolador a la computadora.		
Operación General	El sistema debe operar de forma continua hasta que un operario lo detenga	Los rodillos y carrete deben girar sin presentar intermitencia en su operación.		
	El operario debe poder manejar el sistema aun sin conocimiento técnico .	Se proveerá de un manual de uso al operario y este deberá poder utilizar el dispositivo sin complicaciones.		

A3. Plan de Validación

Plan de Verificación			Resultados	
Aspecto	Requerimiento	Descripción de la prueba	Cumple	No Cumple
Dimensiones del sistema	El sistema debe ocupar un área menor o igual a 2 metros cuadrados.	Se calculará el área que el dispositivo ocupa.		
	El sistema debe tener un longitud menor a 2 metros	Se medirá la longitud del dispositivo		
Microfilamento	El microfilamento resultante debe tener un valor promedio menor o igual a 0.1 mm	Se tomarán varias muestra y se calculará el valor promedio del microfilamento fabricado.		
	La desviación estándar de la muestras tomadas debe se menor a 0,01 mm	Se calculará la desviación estándar de las muestras fabricadas.		
Alimentación del sistema	El dispositivo debe funcionar con una alimentación primaria de 110 V AC	El dispositivo debe operar al conectarse a la red eléctrica.		
	Los circuitos y componentes internos deben funcionar a 12 V CD o 5 V CD	Una vez conectado el sistema, se medirán las alimentaciones internas de los componentes electrónicos.		

A4. Hoja de especificación de motor CD



SKU: 5200-0002-0107

Gearbox Style: Spur

No-Load Speed @ 12VDC: 76 RPM

No-Load Current @ 12VDC: 0.5A

Stall Torque @ 12VDC: 2,000 oz-in*

* Stalling or backdriving may cause geartrain damage

Stall Current @ 12VDC: 20.7A

Gear Ratio: 106.95:1

Gear Material: Metal

Motor Size: RS-555

Weight: 345g

Wire Length: 470mm

Encoder Shaft: 28 PPR (7 rises of channel A)

Gearbox Output Shaft: 723.24 PPR (180.81 rises of channel A)

A5. Código para microcontrolador

```
#include "Nextion.h"
#include <PID_v1.h>
#include <MsTimer2.h>
#include <Encoder.h>

double Setpoint=0;
int Aux=0;
int Setpoint2=0;
int Setpoint3=0;
uint32_t enable = 0;
int enable2 = 0;
int counter=0;
long newPosition=0;
Encoder myEnc(2,3);
int IN4 = 4;
int IN3 = 5;
int IN1 = 7;
int IN2 = 8;
int ENB2 = 9;
int ENB = 6;
double Input=0;
double Input2=0;
double Output=0;
double Output2=0;
double Kp=1, Ki=5, Kd=0.01;

PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);

NexButton mas = NexButton(0,3,"mas");
NexButton menos = NexButton(0,2,"menos");
NexButton mas2 = NexButton (0,9,"mas2");
NexButton menos2 = NexButton(0,10,"menos2");
NexDSButton Inicio = NexDSButton(0,6,"Inicio");
```

```

NexTouch *nex_touch_events[] ={

    &mas,|
    &menos,
    &mas2,
    &menos2,
    &Inicio,
    NULL
};

void masPushCallback(void *ptr)
{
    if (enable == 1){
        Setpoint2++;

        delay(10);
        Serial.print("Dato2.val=");
        Serial.print(Setpoint2);
        Serial.write(0xff);
        Serial.write(0xff);
        Serial.write(0xff);
    }
}

void menosPushCallback(void *ptr)
{
    if(enable== 1)
    {
        Setpoint2--;
        delay(10);
        Serial.print("Dato2.val=");
        Serial.print(Setpoint2);
        Serial.write(0xff);
        Serial.write(0xff);
        Serial.write(0xff);
    }
}

void mas2PushCallback(void *ptr)
{
    if (enable == 1){
        Setpoint++;
        delay(10);
        Aux= (int)Setpoint;
        Serial.print("Dato3.val=");
        Serial.print(Aux);
        Serial.write(0xff);
        Serial.write(0xff);
        Serial.write(0xff);
    }
}

```



```

void menos2PushCallback(void *ptr)
{
    if(enable== 1)
    {
        Setpoint--;
        Aux=(int)Setpoint;
        delay(10);
        Serial.print("Dato3.val=");
        Serial.print(Aux);
        Serial.write(0xff);
        Serial.write(0xff);
        Serial.write(0xff);
    }
}

void InicioPushCallback(void *ptr)
{ digitalWrite(13, LOW);
  Inicio.getValue(&enable);
  if (enable == 0)
  {
      enable2=1;
      Setpoint=0;
      Aux=(int)Setpoint;
      Serial.print("Dato3.val=");
      Serial.print(Aux);
      Serial.write(0xff);
      Serial.write(0xff);
      Serial.write(0xff);
      Setpoint2=0;
      Serial.print("Dato2.val=");
      Serial.print(Setpoint2);
      Serial.write(0xff);
      Serial.write(0xff);
      Serial.write(0xff);
  }
  if (enable == 1)
  { enable2 = 0;
    } }

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  nexInit();

  mas.attachPush(masPushCallback);
  menos.attachPush(menosPushCallback);
  mas2.attachPush(mas2PushCallback);
  menos2.attachPush(menos2PushCallback);
  Inicio.attachPush(InicioPushCallback);

  myPID.SetMode(AUTOMATIC);
  myPID.SetTunings(Kp,Ki,Kd);
  myPID.SetSampleTime(5);
  myPID.SetOutputLimits(-255, 255);
  pinMode (ENB,   OUTPUT);
  pinMode (IN3,   OUTPUT);
  pinMode (IN4,   OUTPUT);
  pinMode (ENB2,  OUTPUT);
  pinMode (IN1,   OUTPUT);
  pinMode (IN2,   OUTPUT);
}

```

```
void loop() {  
  
    digitalWrite (IN3, LOW);  
    digitalWrite (IN4, HIGH);  
    digitalWrite (IN1, LOW);  
    digitalWrite (IN2, HIGH);  
    newPosition = myEnc.read();  
    counter=newPosition;  
    Input=counter;  
  
    if(abs(Input2-Input)<=1){  
        Input=Input2;  
    }  
  
    myPID.Compute();|  
  
    analogWrite(ENB,Output);  
    analogWrite(ENB2,Setpoint2);  
  
    myEnc.write(0);  
  
    Input2=Input;  
    Output2=Output;  
    Setpoint3=Setpoint;  
  
    delay(50);  
    nexLoop(nex_touch_events);  
  
}
```

A6. Plan de Mantenimiento



Programa Mantenimiento Preventivo

Realizado por: Bernal Cordero Umaña

Fecha: 14/10/2018 Versión 1.1

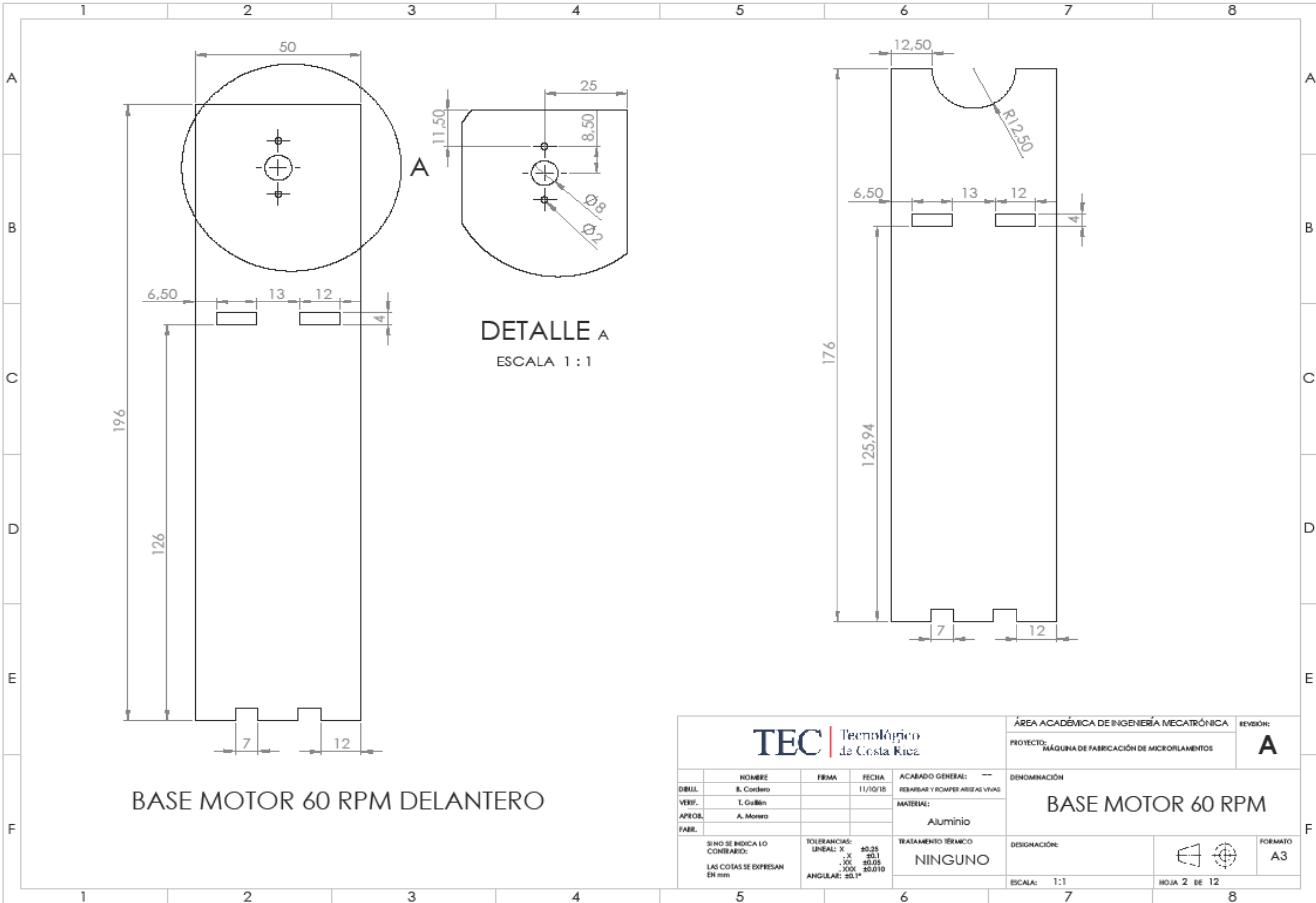
SISTEMA	Máquina de fabricación de microfilamentos					
Subsistema						
FUNCION	FALLA FUNCIONAL	MODO DE FALLA	EFFECTOS	CONSECUENCIAS		
1	Velocidad angular de los motores debe ser constante con una oscilación menor al 2 %.	El eje del motor no gira.	1 Motor desconectado del driver.	Microfilamento con grosor no uniforme	Operacional: Filamento se descarta debido a que presenta defectos.	
			2 Driver desconectado del microcontrolador.			
			3 Microcontrolador desconectado de la alimentación eléctrica			
			4 Circuito de acondicionamiento de señal dañado o desconectado			
			5 Tierras no compartidas			
	El eje del motor presenta oscilaciones en la velocidad de giro mayores a un 2 %.	2	1 Constantes del controlador PID fuera de sintonía.		Operacional: Pérdida económica por material desperdiciado	
			2 Codificador de cuadratura dañado o con interferencia.			
	El eje del motor gira únicamente a velocidad máxima.	3	1 Mala conexión del codificador de cuadratura.		Operacional: Retraso en tiempo de fabricación de microfilamento.	
			2 Programa equivocado cargado en el microcontrolador			
2	Convertidor CD-CD debe dar una salida de 12 V CD.	1	1 Potenciómetro de precisión desajustado	Daño al microcontrolador debido a sobrevoltaje.	Oculta: No se puede obtener el grosor más pequeño	
			2 Alimentación de convertidor CD-CD desconectada.			
	Tensión de salida no es constante.	2	1 Rectificador de señal dañado.	Daño al driver de motores CD debido a sobrevoltaje	Operacional: Pérdida económica y retraso por cambio de microcontrolador	
			2 Transformador dañado.			
			Baja velocidad de giro de los motores debido a subalimentación.	Operacional: Desperdicio de material		
3	Driver debe dar una tensión de salida comprendida en el rango de 0 a 12V proporcional al PWM que recibe.	1	1 Driver desconectado de alimentación de 12 V CD.	Sistema no puede producir microfilamentos	Operacional: Retraso en tiempo de fabricación de microfilamento.	
			2 Tierra no compartida con microcontrolador			
			3 Pines de control desconectados			
	Tensión de salida toma únicamente valor de 12 V.	2	1 Programa equivocado cargado en el microcontrolador	No se tiene control sobre el grosor del filamento que se produce.	Operacional: Solo solo se obtiene un único grosor de filamento	
			2 Pines de control mal conectados			
	Rango de tensiones de salida menor a 12 V CD.	3	1 Tensión de alimentación del driver menor a 12 V CD.	Rango de grosores de filamento que se pueden obtener se ve reducido	Oculta: No se puede obtener el grosor más pequeño	
			2 Caída de tensión debido a componente mal conectado.			
	4	Sistema no responde a entradas de usuario.	1	1 Cables de comunicación con microcontrolador desconectados	Velocidad de los motores no se puede regular	Operacional: No se puede fabricar filamento
				2 Tierra no compartida con microcontrolador		
Pantalla no enciende		2	1 Cables de alimentación de pantalla desconectados.			
			2 Terminal dañada.			
Pantalla intermitente		3	1 Falso contacto en cables de alimentación	Sistema no puede producir microfilamentos		
			2 No se suple la demanda de corriente.			
5	Rodillos deben arrastrar filamento al entrar en contacto	1	1 Ejes desalineados	Filamentos irregulares	Operacional: Filamento con defectos	
			2 Rodillos Desgastados			
	2 Rodillos arrastran de forma intermitente el filamento	1 Recubrimiento no es uniforme				

# Consecutivo	Acción proactiva	Frecuencia						Tiempo estimado tarea		Mano Obra requerida y costo estimado con cargas sociales		
		Semanal	Mensual	Bimensual	Trimestral	Semestral	Anual	Minutos	Horas	Asistente		
		52	12	6	4	2	1			Cantidad	Costo/ hora	Total
1,1,1	Verificar la conexión del motor con el driver			x				0	0,0833	1	600	49,98
1,1,2	Verificar la conexión del driver con el microcontrolador			x				0	0,0833	1	600	49,98
1,1,3	Verificar conexión de cable de alimentación del microcontrolador			x				0	0,0833	1	600	49,98
1,1,4	Verificar la tensión de salida del circuito de acondicionamiento de señal		x					0	0,0833	1	600	49,98
1,1,5	Verificar que las conexiones a tierra estén compartidas entre las diferentes placas.			x				0	0,0833	1	600	49,98
1,2,1	Graficar la respuesta del motor y verificar que sea estable, de lo contrario sintonizar constantes PID.		x					0	0,3333	1	600	199,98
1,2,2	Tomar lectura de velocidad del motor con PWM en 255 y verificar que marque 76 RPM.		x					0	0,1667	1	600	100,02
1,3,1	Verificar conexión eléctrica del codificador de cuadratura con el plano eléctrico del sistema.			x				0	0,0833	1	600	49,98
1,3,2	Cargar nuevamente el programa del sistema al microcontrolador				x			0	0,0833	1	600	49,98
2,1,1	Medir la salida del convertidor CD-CD y verificar que sea de 12 V, de lo contrario sintonizar el potenciómetro.		x					0	0,1667	1	600	100,02
2,1,2	Verificar que los cables de entrada del convertidor se encuentren conectados desde la placa acondicionadora de señal.			x				0	0,0833	1	600	49,98
2,2,1	Conectar osciloscopio a la salida del puente de diodos y verificar que la señal sea directa.		x					0	0,1667	1	600	100,02
2,2,2	Conectar osciloscopio a la salida del transformador y verificar que su salida sea alterna de 15 V.		x					0	0,1667	1	600	100,02
3,1,1	Verificar que el cable de alimentación de 12 V del driver se encuentra conectado			x				0	0,0833	1	600	49,98
3,1,2	Verificar que el cable de conexión a tierra se comparte con el microcontrolador			x				0	0,0833	1	600	49,98
3,1,3	Verificar con el plano de conexión eléctrica la conexión de los pines de control de los motores.			x				0	0,0833	1	600	49,98
3,2,1	Cargar nuevamente el programa del sistema al microcontrolador		x					0	0,0833	1	600	49,98
3,2,2	Verificar el orden de conexión de los pines de control			x				0	0,0833	1	600	49,98
3,3,1	Conectar un multímetro a la salida del convertidor CD-CD y verificar que marque 12 V CD.		x					0	0,1667	1	600	100,02
3,3,2	Verificar conexiones eléctricas con base en el plano de conexión eléctrica			x				0	0,0833	1	600	49,98
4,1,1	Verificar que los cables de comunicación TX y RX de la pantalla se encuentran correctamente conectados con el microcontrolador			x				0	0,0833	1	600	49,98
4,1,2	Ver que el cable de conexión a tierra se encuentra conectado correctamente.			x				0	0,0833	1	600	49,98
4,2,1	Ver que alimentación de la pantalla es de 5 V CD y que se encuentra correctamente conectada.		x					0	0,1667	1	600	100,02
4,2,2	Ver que la pantalla encienda y que esta se resetea al mismo tiempo que el microcontrolador.		x					0	0,0833	1	600	49,98
4,3,1	Verificar conexión de cables de alimentación y transmisión de datos.			x				0	0,0833	1	600	49,98
4,3,2	Comprobar que no existe algún componente adicional conectado			x				0	0,1667	1	600	100,02
5,1,1	Verificar alineamiento de los rodamientos	x						0	0,5	1	600	300
5,1,2	Recubrir nuevamente los rodillos				x			0	1	1	600	600
5,2,1	Rectificar rodillos				x			0	1	1	600	600

A7. Planos Mecánicos

	1	2	3	4	5	6	7	8					
A	Número de Elemento	Nombre de Parte	Cantidad						A				
	28	Ángulo L	10						B	27	Tornillo M4	20	B
	26	Tuerca M4	20						C	25	Rodamientos	6	C
	24	Base Rodamiento_3	2						D	23	Base Carrete	1	D
	22	Acople carrete	1						E	22	Carrete	1	E
	21	Eje para carrete	1						F	21	Eje para Rodillos	2	F
	20	Rodillos	2							20	Panel Rodamiento	1	
	19	Eje para Rodillos	2							19	Base rodamiento	2	
	18	Panel frente pantalla/interruptor	1							18	Panel frente pantalla/interruptor	1	
	17	Frente Agujeros	1							17	Fondo	1	
	16	Fondo	1							16	Base Rodamiento_2	2	
	15	Base Rodamiento_2	2							15	Acople motor 76 RPM	1	
	14	Acople motor 76 RPM	1							14	Base motor 76 RPM Delantera	1	
	13	Base motor 76 RPM Delantera	1							13	Base motor 76 RPM Trasera	1	
	12	Base motor 76 RPM Trasera	1							12	Motor 76 RPM	1	
	11	Motor 76 RPM	1							11	Motor 60 RPM	1	
	10	Motor 60 RPM	1							10	Base Motor 60 RPM Trasera	1	
	9	Base Motor 60 RPM Trasera	1							9	Base Motor 60 RPM Delantera	1	
	8	Base Motor 60 RPM Delantera	1							8	Acople motor 60 RPM	1	
	7	Acople motor 60 RPM	1							7	Tapa	1	
	6	Tapa	1							6	Sobre	1	
	5	Sobre	1							5	Panel Costado	2	
	4	Panel Costado	2							4			

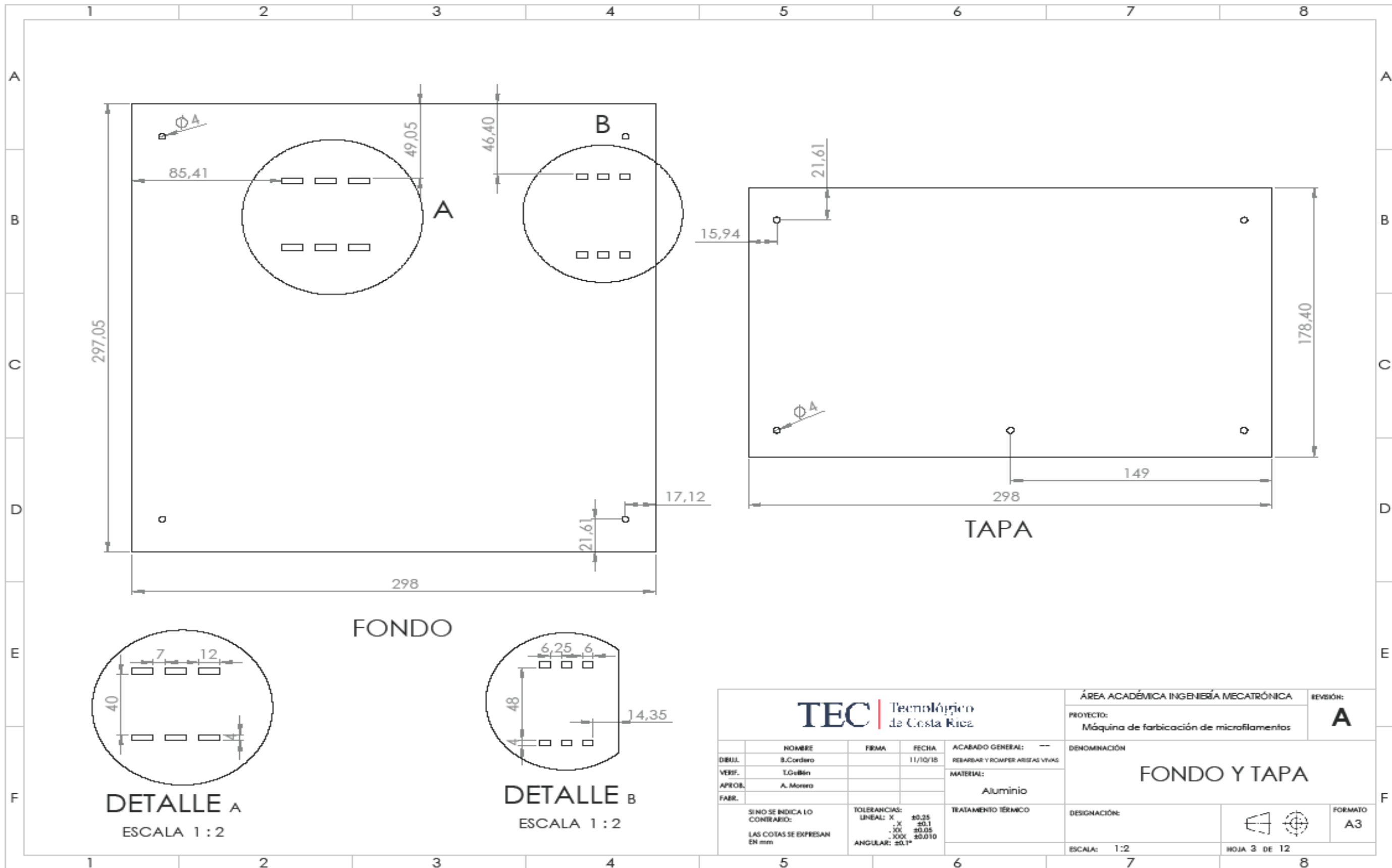
TEC Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:
				PROYECTO:		A
				MÁQUINA DE FABRICACIÓN DE MICROFILAMENTOS		
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	DENOMINACIÓN	
DIBUJ.	E. Cordero		11/10/18	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	VISTA EN EXPLOSIÓN	
VERIF.	T. Guillén			MATERIAL:	DESIGNACIÓN:	
APROB.	A. Moreno			TRATAMIENTO TÉRMICO	ESCALA: 1:5	
FABR.					HOJA 1 DE 12	
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm			TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.25 X ±0.1 XX ±0.05 XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°		FORMATO A3	



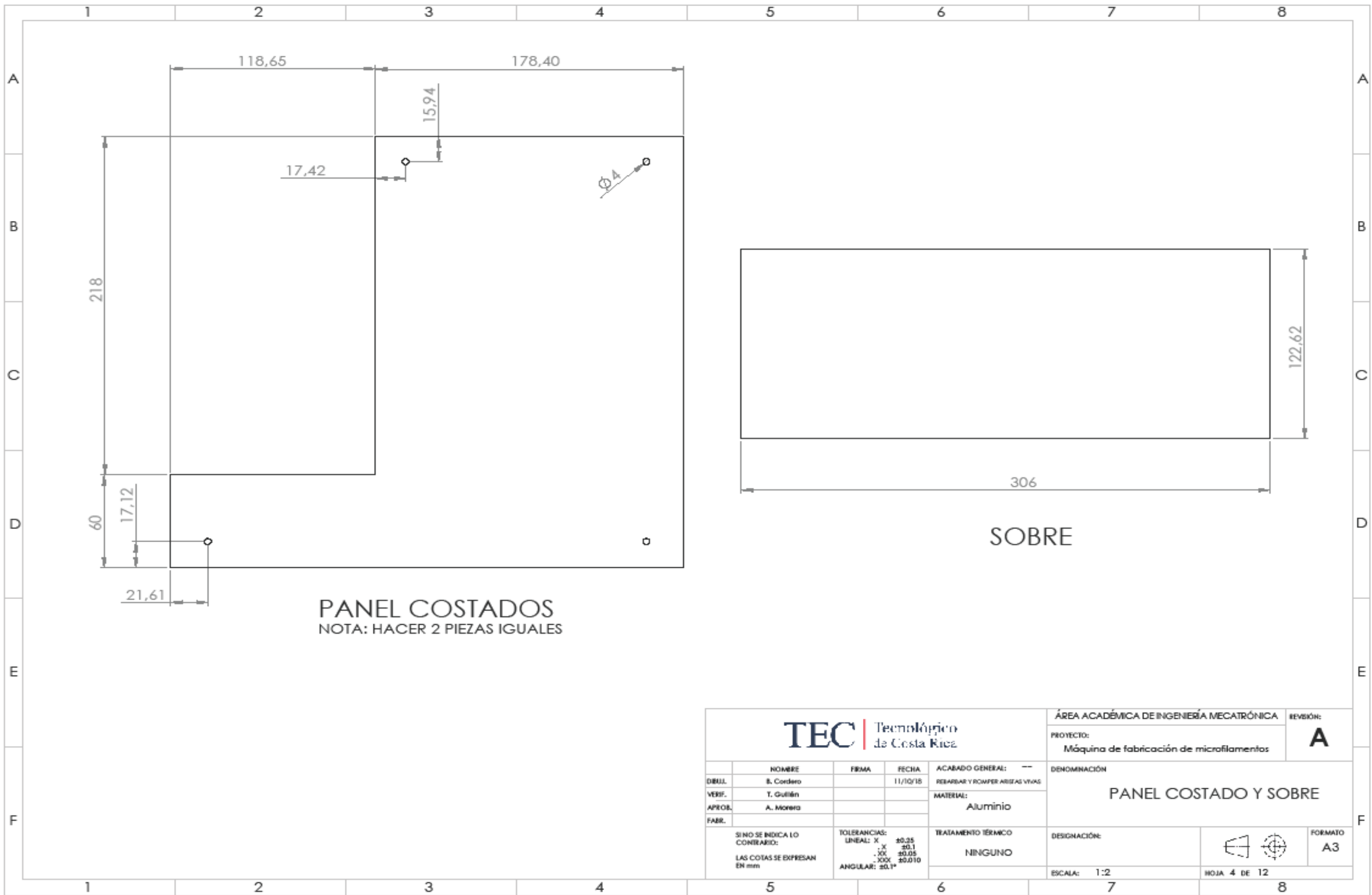
BASE MOTOR 60 RPM DELANTERO

DETALLE A
ESCALA 1:1

TEC Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:
				PROYECTO: MÁQUINA DE FABRICACIÓN DE MICRORLAMENTOS		A
DIBUJ. VERIF. APROB. FABR.	NOMBRE S. Cordero I. Guillén A. Moreno	FIRMA 	FECHA 11/10/15	ACABADO GENERAL: -- REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	DENOMINACIÓN BASE MOTOR 60 RPM	
SIN O SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm			TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.25 .X ±0.1 .XX ±0.05 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°	MATERIAL: Aluminio	TRATAMIENTO TÉRMICO NINGUNO	DESIGNACIÓN:
				ESCALA: 1:1		FORMATO A3
				HOJA 2 DE 12		



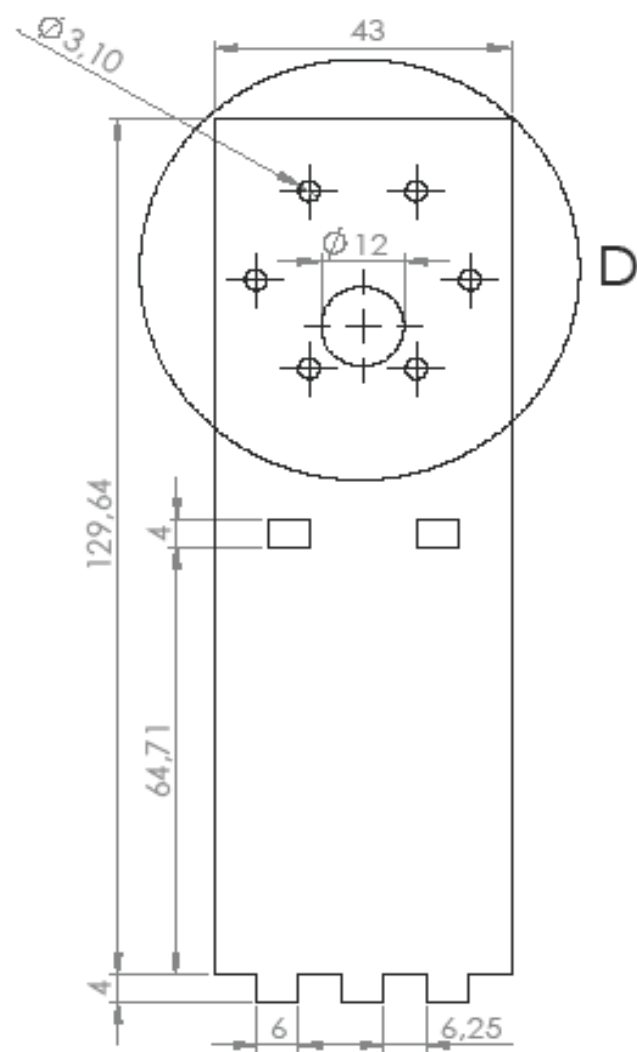
TEC Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:
				PROYECTO: Máquina de fabricación de microfilamentos		A
NOMBRE: S. Cordero FIRMA: [Signature] FECHA: 11/10/18 ACABADO GENERAL: --- REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS				DENOMINACIÓN: FONDO Y TAPA		
SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm				TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.25 .X ±0.1 .XX ±0.05 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°		TRATAMIENTO TÉRMICO: DESIGNACIÓN: ESCALA: 1:2
						FORMATO: A3
				HOJA 3 DE 12		



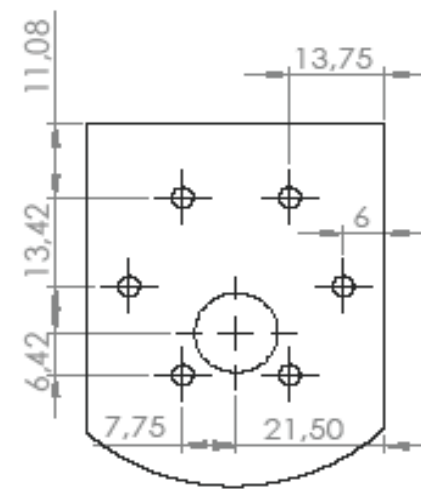
PANEL COSTADOS
 NOTA: HACER 2 PIEZAS IGUALES

SOBRE

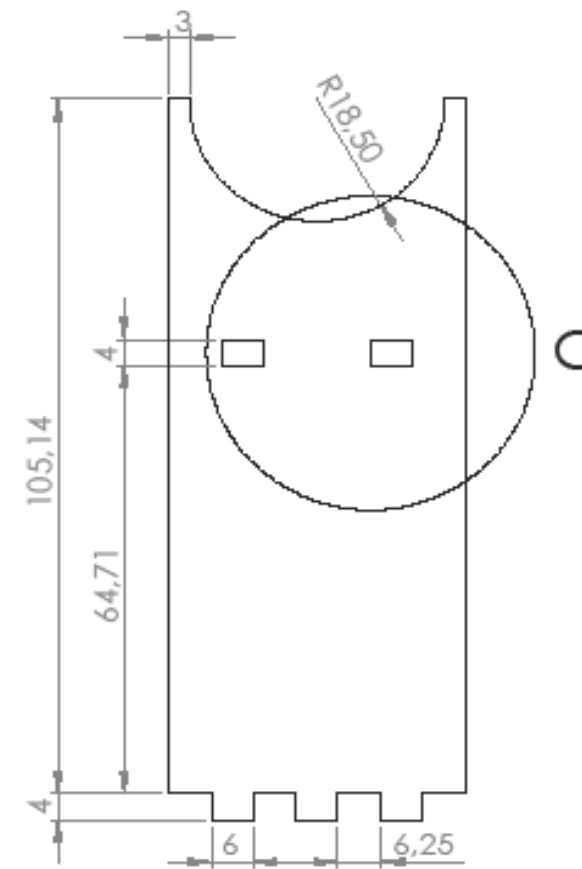
				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:			
				PROYECTO: Máquina de fabricación de microfilamentos		A			
NOMBRE E. Cordero		FIRMA 		FECHA 11/10/18		ACABADO GENERAL: — REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		DENOMINACIÓN PANEL COSTADO Y SOBRE	
VERIF. T. Guillén		APROB. A. Moreno		MATERIAL: Aluminio					
SIN O SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm		TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.25 X ±0.1 XX ±0.05 XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°		TRATAMIENTO TÉRMICO NINGUNO		DESIGNACIÓN:		FORMATO A3	
				ESCALA: 1:2		HOJA 4 DE 12			



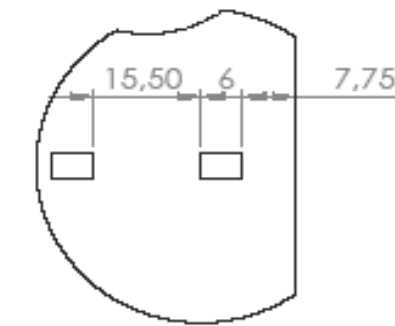
MONTURA DELANTERA MOTOR 76 RPM



DETALLE D

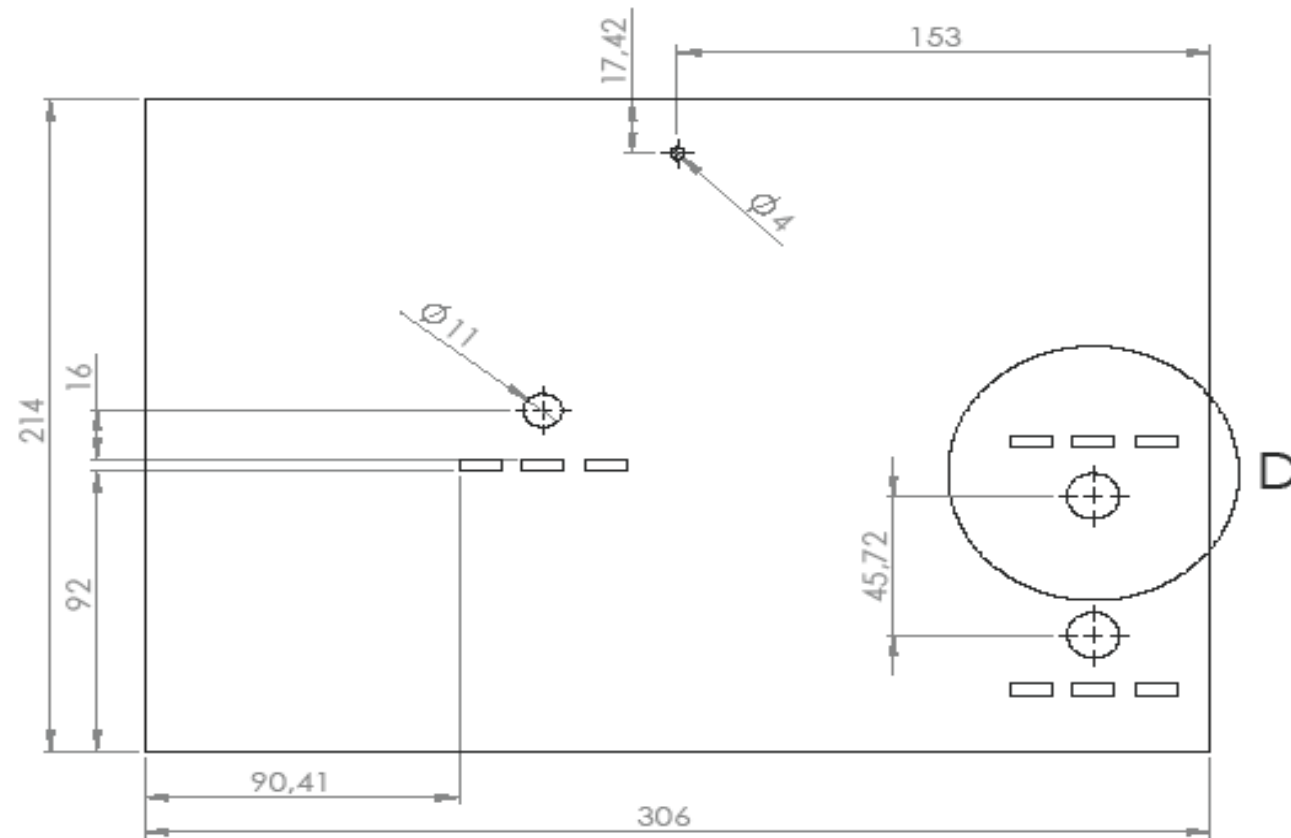


MONTURA TRASERA MOTOR 76 RPM

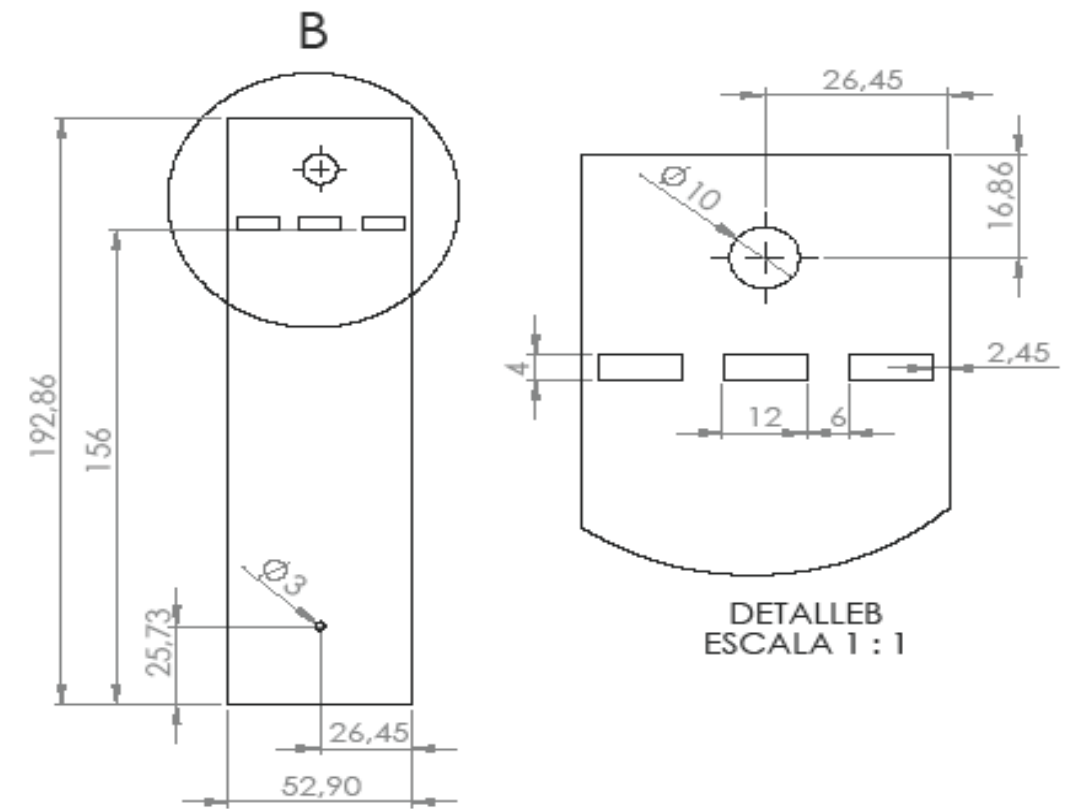


DETALLE C

 TEC Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:
				PROYECTO: MÁQUINA DE FABRICACIÓN DE MICROFILAMENTOS		A
NOMBRE B. Cordero		FIRMA		FECHA 11/10/18		ACABADO GENERAL: --- REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS MATERIAL: Aluminio
VERIF. T. Guillén		APROB.		FABR.		
SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm		TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.25 .X ±0.1 .XX ±0.05 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°		TRATAMIENTO TÉCNICO		
DENOMINACIÓN MONTURA MOTOR 76 RPM		DESIGNACIÓN:		 FORMATO A3		
ESCALA: 1:1		HOJA 5 DE 12				

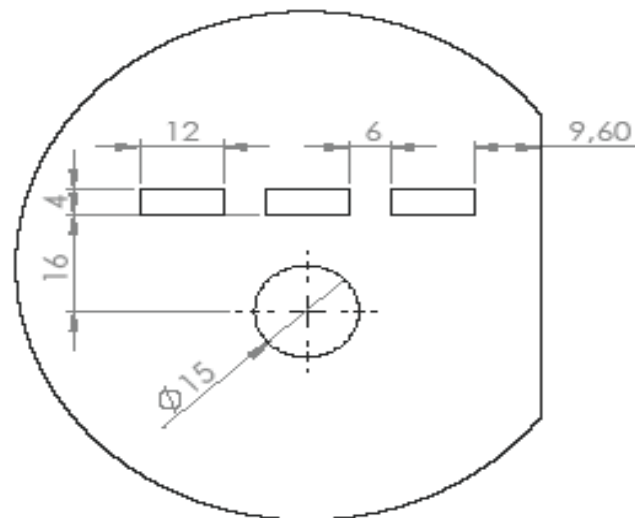


FRENTE

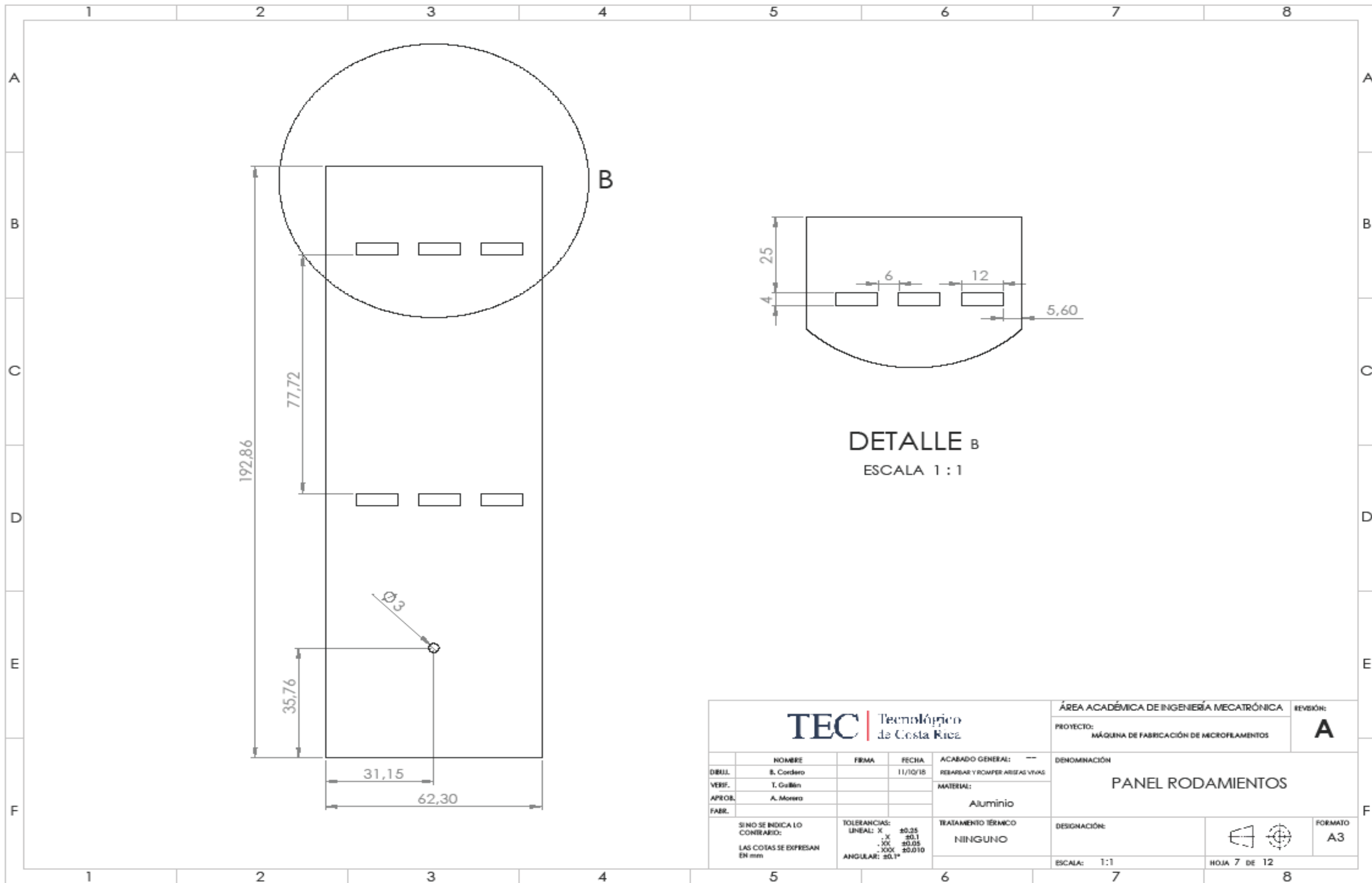


PANEL CARRETE

DETALLE D
ESCALA 1:1

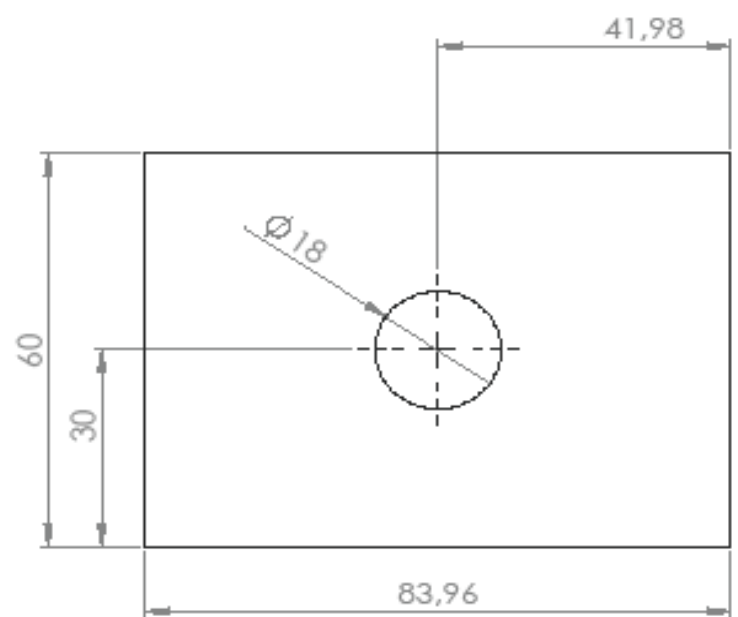


TEC Tecnología de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:
				PROYECTO: MÁQUINA DE FABRICACIÓN DE MICROFILAMENTOS		A
DIBUJ. S. Cordero VERIF. T. Guillén APROB. A. Morero FABR.	NOMBRE FIRMA FECHA 11/10/15	ACABADO GENERAL: — REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS MATERIAL: Aluminio	DENOMINACIÓN FRENTE Y PANEL CARRETE			
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm	TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.25 .X ±0.1 .XX ±0.05 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°	TRATAMIENTO TÉRMICO NINGUNO	DESIGNACIÓN:		FORMATO A3	
			ESCALA: 1:2	HOJA 6 DE 12		

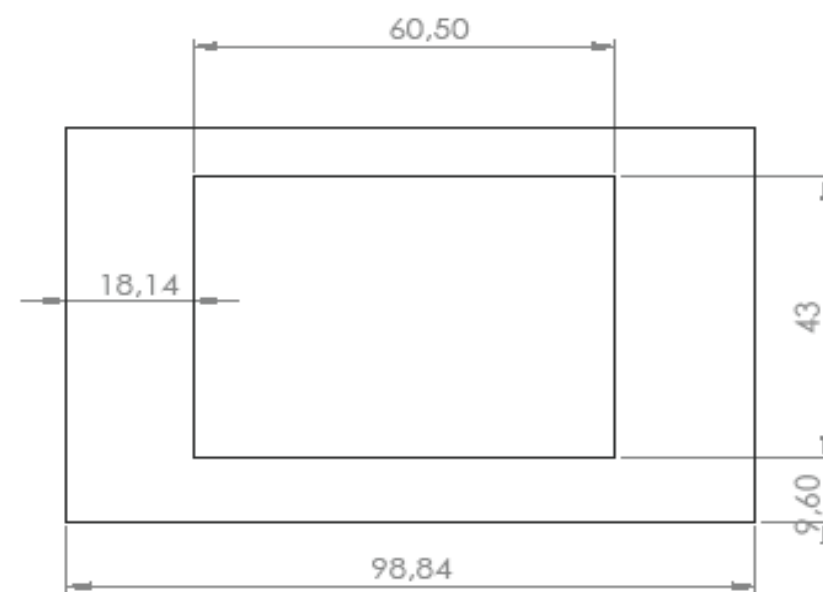


DETALLE B
ESCALA 1 : 1

				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:	
				PROYECTO: MÁQUINA DE FABRICACIÓN DE MICROFILAMENTOS		A	
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	DENOMINACIÓN PANEL RODAMIENTOS		
VERIF.	S. Cordero		11/10/15	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS			
APROB.	T. GuBlin			MATERIAL:			
FABR.	A. Morero			Aluminio			
SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm		TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.25 .X ±0.1 .XX ±0.05 .XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°		TRATAMIENTO TÉRMICO NINGUNO	DESIGNACIÓN:		FORMATO A3
				ESCALA: 1:1	HOJA 7 DE 12		



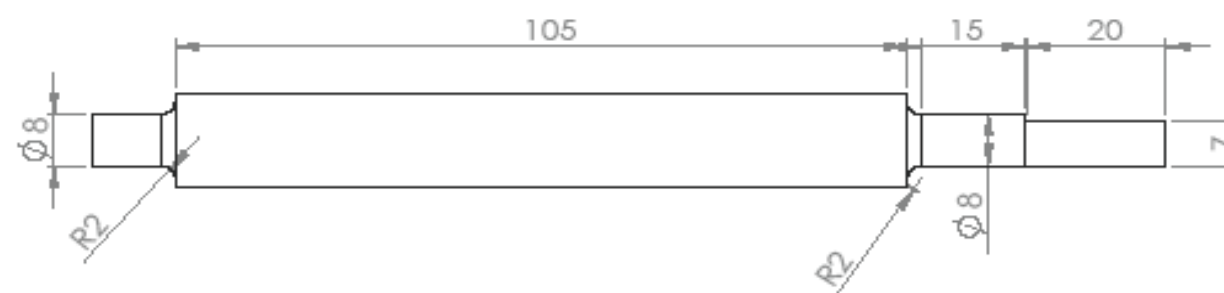
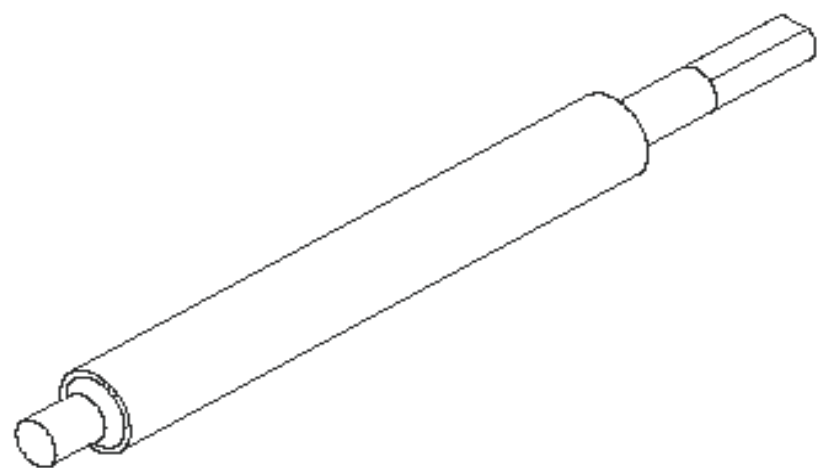
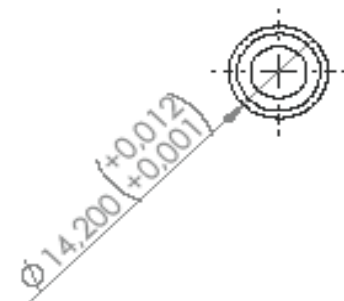
PANEL INTERRUPTOR PRINCIPAL



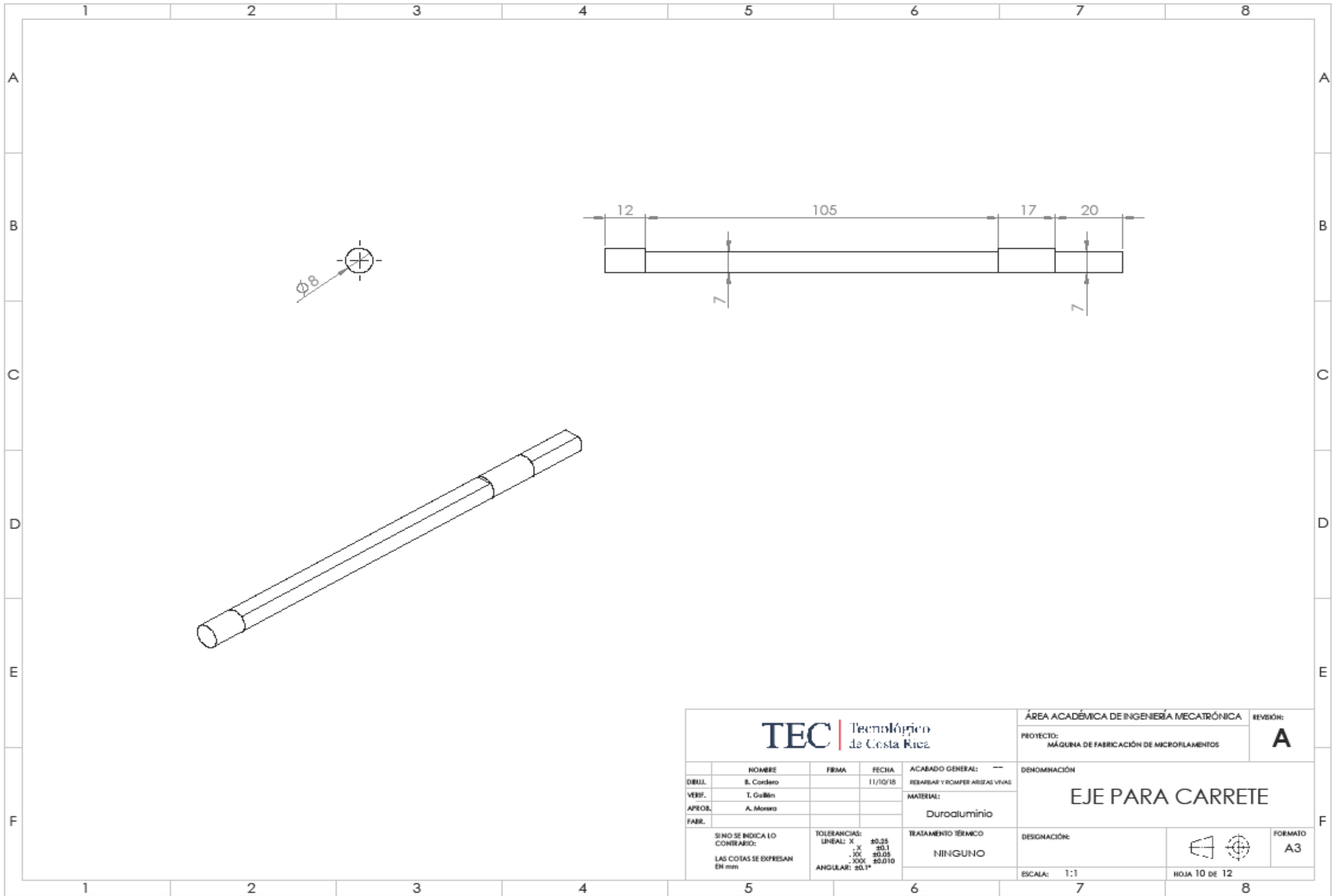
PANEL HMI

 TEC Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:
				PROYECTO: MÁQUINA DE FABRICACIÓN DE MICROFILAMENTOS		A
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: —	DENOMINACIÓN PANEL INTERRUPTOR/HMI	
VERIF.	S. Cordaro		11/10/18	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		
APROB.	T. Guillén			MATERIAL:	DESIGNACIÓN:	
FABR.	A. Morero			Aluminio		
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm			TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0,25 .X ±0,1 .XX ±0,05 .XXX ±0,010 ANGULAR: ±0,1°	TRATAMIENTO TÉRMICO NINGUNO	FORMATO A3	
				ESCALA: 1:1	HOJA 8 DE 12	

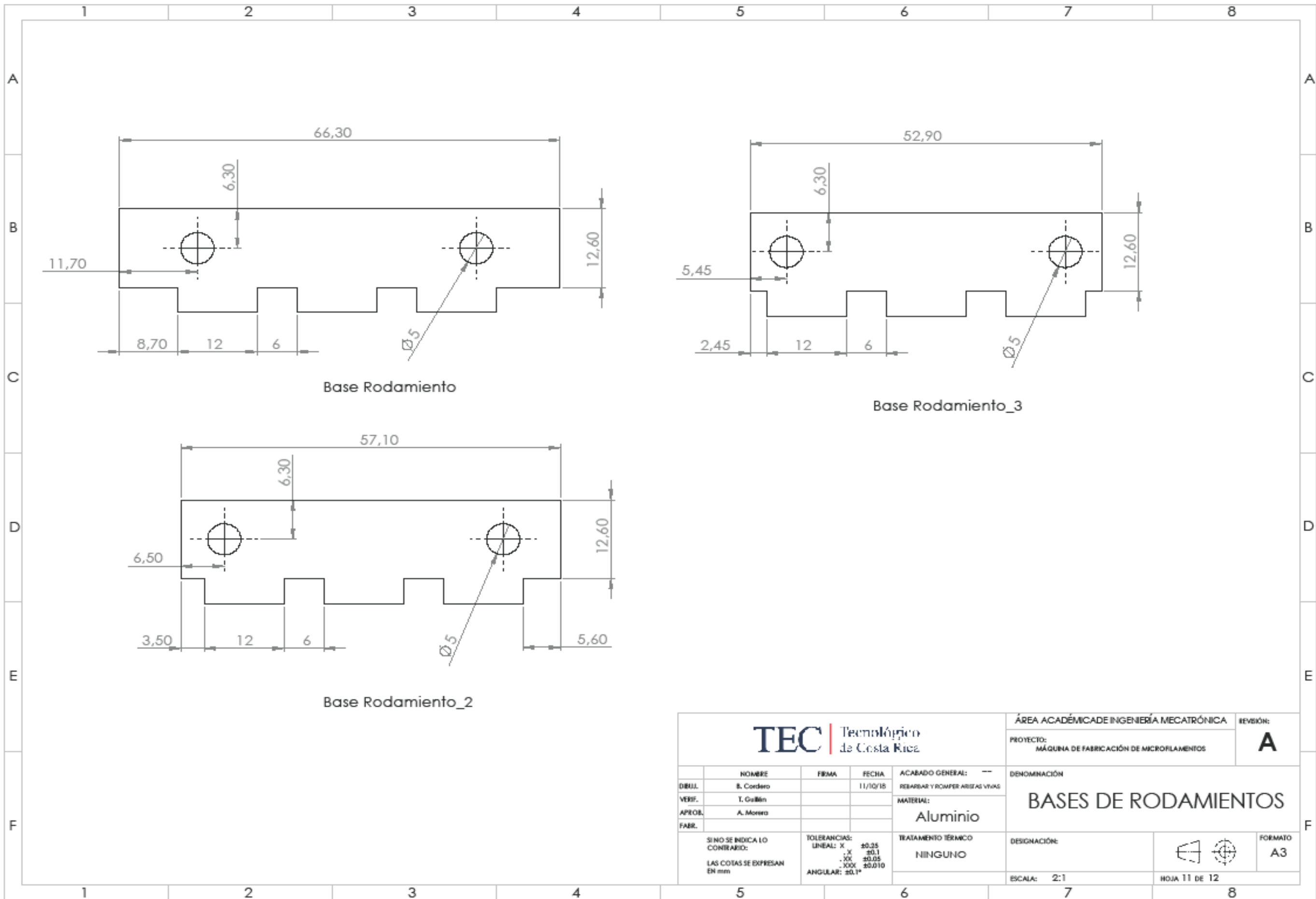
NOTA:
HACER 2 PIEZAS IGUALES



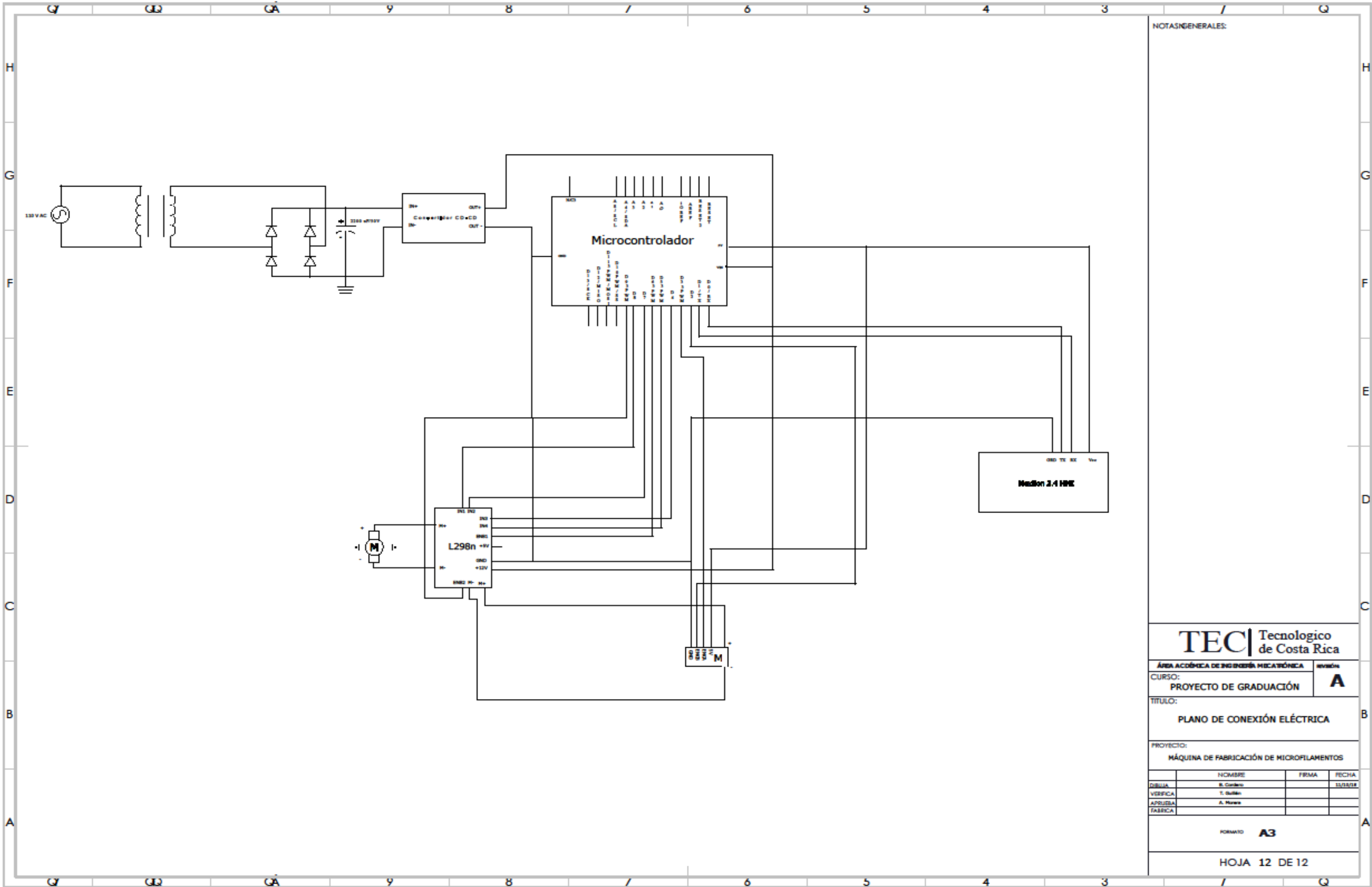
				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA PROYECTO: MÁQUINA DE FABRICACIÓN DE MICROFILAMENTOS		REVISIÓN: A
DIBUJ. S. Corder VERIF. T. Guillén APROB. A. Mosera FABR.	NOMBRE FIRMA FECHA 11/10/18	ACABADO GENERAL: -- REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	DENOMINACIÓN EJE PARA RODILLOS			
SIN SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm		TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0,25 .X ±0,1 .XX ±0,05 .XXX ±0,010 ANGULAR: ±0,1°	MATERIAL: Duraluminio	TRATAMIENTO TÉRMICO NINGUNO	DESIGNACIÓN:	FORMATO A3
		ESCALA: 1:1		HOJA 9 DE 12		



TEC Tecnología de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:	
				PROYECTO: MÁQUINA DE FABRICACIÓN DE MICROFLAMENTOS		A	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: —	DENOMINACIÓN EJE PARA CARRETE		
DEBUL.	S. Cordero		11/10/18	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS			
VERIF.	T. Guillén			MATERIAL:			
APROB.	A. Mosero			Duroaluminio			
FABR.				TRATAMIENTO TÉRMICO	DESIGNACIÓN:	FORMATO	
	SINÓ SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm		TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.25 X ±0.1 XX ±0.05 XXX ±0.010 ANGULAR: ±0.1°	NINGUNO	ESCALA: 1:1	 HOJA 10 DE 12	A3



TEC Tecnológico de Costa Rica				ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA		REVISIÓN:
				PROYECTO: MÁQUINA DE FABRICACIÓN DE MICROFILAMENTOS		A
DEJUL. E. Cordero VERIF. T. Guillén APROB. A. Moreno FABR.	NOMBRE FIRMA FECHA	11/10/18	ACABADO GENERAL: --- REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	DENOMINACIÓN BASES DE RODAMIENTOS		
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN mm	TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0,25 . X ±0,1 . XX ±0,05 . XXX ±0,010 ANGULAR: ±0,1°	MATERIAL: Aluminio	TRATAMIENTO TÉRMICO NINGUNO	DESIGNACIÓN:		FORMATO A3
				ESCALA: 2:1	HOJA 11 DE 12	



NOTAS GENERALES:

TEC Tecnológico de Costa Rica

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA **REVISIÓN**
 CURSO: PROYECTO DE GRADUACIÓN **A**

TÍTULO:
PLANO DE CONEXIÓN ELÉCTRICA

PROYECTO:
MÁQUINA DE FABRICACIÓN DE MICROFILAMENTOS

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DISEÑA	B. Cordeiro		15/05/2018
VERIFICA	T. Guillén		
APRUEBA	A. Herrer		
FABRICA			

FORMATO **A3**

HOJA 12 DE 12