

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

2023-1S

Informe Técnico:

Autores:

Juan David Diaz Garcia
Daniel Melo Ávila
Miguel Ángel Rincón Otálora
Jose Santiago Hurtado Prieto
Nikolai Cáceres Penagos
María Camila Sánchez Gómez
Hugo Alejandro Camargo

Profesores:
Fernando Jose Rodriguez Mesa
Carlos Alberto Narvaez Tovar

Índice

1. Introducción	1
2. Planteamiento del Problema	1
2.1. Producir filamento utilizable por impresora 3D	1
2.2. La maquina debe poder procesar 3 tipos de botellas seleccionadas	2
2.3. El filamento debe ser continuo	3
2.4. El filamento debe tener buenas características mecánicas de material (60MPa a flexión y 50 MPa a tensión)	3
2.5. El carrete se debe poder intercambiar rápidamente	4
2.6. La máquina debe ser segura para quien la usa	4
2.7. Justificación	4
3. Definición del Proyecto	5
3.1. Objetivo general	5
3.2. Objetivos específicos	5
3.3. Alcance	5
3.4. Requerimientos	6
4. Diseño conceptual	7
4.1. Arquitectura	7
4.2. Descripción de etapas	7
5. Diseño y selección de alternativas	9
5.1. Etapa de pretratamiento	9
5.1.1. Pistola Calor	9
5.1.2. Agua en olla	9
5.1.3. Botella con agua expuesta al calor	10
5.1.4. Botella con aire comprimido expuesta al calor	12
5.2. Etapa de corte	15
5.2.1. Formulación del problema	15
5.2.2. Requerimientos de diseño	16
5.2.3. Estado del arte	16
5.2.4. método cuchilla plataforma	16
5.2.5. método corte por rodamientos	16
5.2.6. método corte por perfil	17
5.2.7. Experimentación previa Sistema de corte	17
5.2.8. corte por rodamientos	17
5.2.9. corte por perfil	19
5.2.10. corte con cuchilla	20
5.2.11. selección de alternativas	21
5.3. Etapa de extrusión	22
5.3.1. Bloque calentador	23
5.3.2. Cartucho calefactor	23
5.3.3. Sensor Térmico	23
5.3.4. Selección de alternativas	23
5.4. Etapa de enrollado	24

5.4.1. Acoplamiento Filamento-Carrete	25
5.4.2. Medición de velocidad lineal de extrusión	29
5.5. Interfaz Humano Máquina y electrónica de control	31
5.5.1. Requerimientos funcionales	32
5.5.2. Selección del sistema central de procesamiento	32
5.5.3. Selección de la Interfaz Humano Máquina	33
6. Metodología	34
6.1. Metodología de gestión de proyecto	34
6.1.1. Descenso	34
6.1.2. Base	35
6.1.3. Ascenso	36
6.1.4. Lista de actividades	36
7. Diseño	38
7.1. Etapa de corte	38
7.1.1. Prototipo 3d con varias alturas	38
7.1.2. geometría de la guía de corte	38
7.1.3. análisis de fuerzas	39
7.1.4. cortante en e tornillo	40
7.1.5. flexión en el tornillo	40
7.1.6. aplastamiento en la unión de acrílico	41
7.1.7. mantenimiento	41
7.2. Etapa de extrusión	42
7.2.1. Alimentación	42
7.2.2. Montaje	42
7.3. Etapa de enrollado	42
7.3.1. Calculo del motor	42
7.3.2. Diseño de soportes	44
7.3.3. Conos	48
7.3.4. Control de velocidad de extrusión	49
7.3.5. Esquema de control de velocidad	50
7.3.6. Modelamiento por función de transferencia	50
7.3.7. Obtención de parámetros de función de transferencia	51
7.3.8. Diseño de controlador PID	52
7.3.9. Diseño de algoritmo de control PID	52
7.3.10. Diseño de polea auxiliar	56
7.3.11. Diseño de sensado de velocidad	57
7.3.12. Diseño de soportes para modulo de medición de velocidad	58
7.4. Interfaz Humano-Máquina	59
7.4.1. Distribución de la LCD	59
7.4.2. Botones disponibles	59
7.4.3. Alertas visuales	59
7.4.4. Interruptor de encendido y parada de emergencia	60
7.4.5. Distribución de la HMI	60
7.4.6. Diseño de software de HMI	60
7.5. Diseño electrónico	61

8. Implementación	61
8.1. Etapa de corte	61
8.1.1. Implementación final del sistema con ajuste de altura variable	61
8.2. Etapa de extrusión	63
8.3. Etapa de enrollado	63
8.3.1. Implementación de modulo de medición de velocidad	63
8.3.2. Caracterización en función de transferencia	63
8.3.3. Impementación de algoritmo de control	64
8.4. Interfaz	65
8.5. Electrónica y cableado	65
9. Validación	65
9.0.1. Diametro del filamento	65
9.0.2. Precisión de etapa de corte y ancho variable	67
9.0.3. Resistencia a la tracción y Modulo de Elasticidad	69
9.0.4. Numero de aperturas por metro de filamento	70
9.0.5. Numero de cortes por metro de filamento	70
9.0.6. Velocidad de extrusión	70
9.0.7. Velocidad de corte	70
9.0.8. Acomodo en la etapa de corte	71
9.0.9. Uniformidad de control de temperatura	71
9.0.10. Pretratamiento en múltiples botellas	72
9.0.11. Tiempo de instalación del carrete	72
9.0.12. Parada de emergencia	72
9.0.13. Visualización y modificación de temperatura	72
9.0.14. Visualización de velocidad	72
A. Cronograma	73

1. Introducción

Las botellas PET son una de las principales fuentes de contaminación por plástico en el mundo entero dado a que por sus propiedades químicas estas pueden tardar cientos de millones de años en degradarse y, adicionalmente, son recipientes de desecho masivamente utilizados diariamente. Por otro lado, la manufactura aditiva ha sido un proceso de manufactura de gran importancia en estos últimos tiempos dado que permite la personalización, el prototipado rápido, un costo bajo, un proceso sustentable, entre otras ventajas. Dentro de la ventaja de la sustentabilidad encontramos la optimización de material y energía, por consiguiente, la disminución considerable de desperdicios. Pero, dentro la innovación que permite este proceso de manufactura se ha venido implementando el uso de filamentos de diferentes materiales y, pensando en sustentabilidad, se ha experimentado empíricamente con filamento de materiales reciclados.

Dentro de la innovación de utilizar materiales reciclados encontramos máquinas realizadas para el desarrollo de los filamentos de estos. En la gran mayoría de casos, son máquinas desarrolladas empíricamente por tanto, se encuentra una falencia de ser máquinas ineficientes en sentido de tener un valor rentable y competitivo del filamento producido y, se cuestiona sobre su perdurabilidad en el tiempo. Dado a esta problemática y a la problemática contextual de la contaminación de botellas PET se genera la motivación de desarrollar una máquina que produzca filamento para impresión 3D en base de envases PET.

Por medio del siguiente informe se expone el planteamiento del problema, la definición del proyecto, el diseño conceptual, la selección de las alternativas, la metodología, el diseño detallado, la implementación, la validación de cada etapa del proyecto (pretratamiento, corte, extrusión, enrollado, interfaz y diseño electrónico) y las conclusiones del proyecto.

2. Planteamiento del Problema

2.1. Producir filamento utilizable por impresora 3D

Producir filamento de $1.75\text{mm} \pm 0.05\text{mm}$ de diámetro uniforme filamento

La mayoría de filamentos comerciales tienen una tolerancia de 0.05mm alrededor del diámetro nominal de 1.75mm. Este es el estándar de oro manejado en la industria y es difícil de lograr en un carrete continuo con tolerancias menores. El fenómeno de “extrusión inconsistente” está totalmente relacionado. Consiste en lo siguiente. La máquina está configurada para imprimir con una taza de material establecida y no se ajustara a las variaciones de cantidad de material que salga por la boquilla. La plataforma elevará su altura de manera constante y no se ajustara a las imperfecciones causadas por la variación en la deposición de material. Aparte de esto, un diámetro muy por debajo del valor nominal causará que el mecanismo no pueda sujetar al filamento para empujarlo en la boquilla, causando que el proceso de impresión pare por completo. Por otro lado, si el filamento es más grueso de lo esperado, no todo el material se fundirá apropiadamente al pasar por la boquilla [1]. Es por todo esto que hemos establecido el requerimiento 1.1.

La velocidad y temperatura de extrusión deben ser controlables ($\pm 0.5\text{cm/s}$ y $\pm 3\text{ C}^\circ$)

Durante la etapa de experimentación encontramos que la velocidad a la que se hala la tira durante el proceso de extrusión determina que la tira se recoja lo suficiente como para formar un filamento compacto. Poca velocidad puede ocasionar que el filamento se sobre caliente y se rompa, mucha velocidad hará que la tira se abra. Similarmente con la velocidad, la temperatura también mostró ser crucial para

Informe Tecnico:

extruir porque una temperatura muy baja hace más difícil que el plástico se deforme, requiere de más fuerza para su extrusión al pasar por la boquilla y así aumenta la probabilidad de que se rompa durante el halado.

Una temperatura muy alta, además de disminuir el grosor del filamento, puede hacer que el plástico llegue a su punto de fusión, lo cual hace que las propiedades mecánicas del material cambien , pues, ante estos cambios de temperatura, el PET muestra una tendencia a cristalizarse o disminuir sus propiedades mecánicas. Esta ultima tendencia también fue producto de ensayos realizados. Sin embargo, verificamos nuestra hipótesis al leer casos como [2] y [3], en donde se encontró que el aumento de la temperatura del material facilita la reorganización de las moléculas en estado amorfo, para formar cristales y disminuye el esfuerzo de fluencia del material. El anterior proceso sucede una vez el material pasa de $T_c \approx 135^{\circ}\text{C}$ y se conoce como cristalización-fria.

A parte de esto, se ha encontrado que ambas variables, velocidad de extrusión y temperatura, son determinantes para el control del diámetro durante la extorsión de filamento [1]. De manera que ambas variables de proceso son importantes no solo para controlar el diámetro del filamento sino otros aspectos de interés. Más aun, en una consulta con la profesora Helia Bibiana Leon, la cual se especializa en polímeros, senos recalco la importancia de controlar las variables de proceso para lograr un diámetro de filamento lo más constante posible. Es por esto que en nuestro diseño requerimos que la velocidad y la temperatura se mantengan de un rango para así garantizar que sean lo suficientemente constante durante la extrusión de la tira de cada botella. Para escoger la precisión para el control de la temperatura y debido a la poca documentación en el proceso de extrusión de filamento PET, se tomo como referencia el proceso de extrusión de el mismo en otros procesos, en donde se suelen utilizar controladores con una precisión de $\pm 3^{\circ}\text{C}$, como por ejemplo los Watlow EZ zone -PM [4], utilizados en operaciones de extrusión PET [5]. Similarmente, en procesos de extrusión de PLA, se utilizo satisfactoriamente un rango similar [1]. Por esto decidimos tomar el rango de $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

Sin embargo, también se verifico que se obtuviera un filamento homogéneo, con un diámetro constante (dentro de los rangos), para fijar de esta forma el requerimiento de precisión del sistema de control.

Más aun, también requerimos que velocidad y temperatura sean variables para poder adaptarnos a cada tipo e botella, como se explicara a continuación. De este requerimiento también obtenemos otros, como por ejemplo, que la maquina pueda censar la temperatura y la velocidad para que así se pueda tener feedback y hacer control de cada variable. También, que requerimos que el filamento se enfrie a la salida de la extrusión, para así enfriar al filamento más rápidamente y evitar el ensanchamiento del diámetro del filamento. Esto ultimo se decidió después de encontrar que era practica usual en la extrusión de filamento PLA precisamente porque al no enfriarse rápido, al ser a un maleable, tiene oportunidad de deformarse, afectando el diámetro de la sección transversal.

Respecto al control de velocidad, requerimos que este permita su variación durante el proceso de enrollado para así poder mantener una velocidad lineal constante del filamento. Esto debido a que el diámetro del carrete aumenta en el tiempo debido al enrollado. Es decir, como el diámetro del carrete crece, para mantener una velocidad lineal constante del filamento, requerimos variar la velocidad angular correspondientemente. Estas variables de proceso (velocidad y temperatura) se deben poder informar al usuario para que este verifique que estas son las correctas de acuerdo a la botella que se extruye en el momento, es por esto que requerimos que la maquina le informe al usuario sobre estas variables, lo cual hacemos con una interfaz de usuario.

2.2. La maquina debe poder procesar 3 tipos de botellas seleccionadas

Dentro de los envases PET, cada tipo de botella, de diferentes marcas y presentaciones, es diferente en su composición química y su micro estructura. No solo cambian componentes aditivos por el color de la botella sino también agentes que aumentan la durabilidad de la botella, el numero de ciclos de reciclado, reductores de fricción, etc. Más aun, en el proceso de formado, cambian la micro estructura del PET en regiones de mayor densidad de la botella [6].

Características como la dureza, según cada proceso de formado de cada botella y el numero de veces que se halla reciclado cada plástico en particular [7]. Mas aun, dependiendo del grosor de la botella, fue evidente que cambiaba la facilidad con la que se extruía según el grosor de la botella, requiriendo algunas una temperatura mayor a menor velocidad de extorsión. Todo esto resulta en que para cada botella se requiera una temperatura y velocidad de extrusión particulares para lograr unas características consistentes de su filamento.

Es por esto que nuestra máquina debe poder procesar 3 tipos de botellas al menos inicialmente, para los cuales se caracterizaron las variables de proceso mencionadas para obtener filamento de cada una.

2.3. El filamento debe ser continuo

El material de impresión por lo general viene en presentaciones de 500g a 1kg, lo cual equivale a entre 200 metros y 400 metros de filamento aproximadamente. Disponer de esta cantidad de filamento es importante durante impresiones largas para no depender de una persona durante el proceso de impresión y para que el enfriamiento y la falta de continuidad del proceso no afecte la calidad de impresión, propiedades mecánicas de la pieza, tiempo de impresión y costo de manufactura (este ultimo porque al aumentar el tiempo de trabajo, hay que pagar más al empleado). De esta manera surge el requerimiento funcional de poder manufacturar un carrete continuo de filamento.

2.4. El filamento debe tener buenas características mecánicas de material (60MPa a flexión y 50 MPa a tensión)

La resistencia mecánica de las piezas manufacturadas por manufactura aditiva es toda un área de investigación. Las piezas impresas en 3D en ocasiones deben soportar cargas mecánicas y por esto las propiedades mecánicas del material de impresión y de la pieza una vez manufacturada, sean lo suficientemente buenas. Normas como la ISO 527-2:2012 o ASTM D790-10 reglamentan el testeo de estas características en manufactura aditiva. La norma ISO 17296-3:2014 establece como parte de los requerimientos mecánicos que puede tener una pieza fabricada por manufactura aditiva son: la resistencia a la tensión, resistencia a flexión y cortante. Estos factores dependen de muchos más factores que el material de impresión. Por ejemplo, dependen de la máquina en la que imprima, de la orientación en la que se imprimió la pieza, del tipo de rejilla utilizado, de la posición en la cama de impresión donde se imprime la pieza, del grosor de capa utilizado, diámetro de la boquilla, velocidad de impresión y del relleno entre muchos otros factores. Sin embargo, los principales factores son la orientación de la pieza, la rejilla y el grosor de capa. Se espera que estos factores también influencien las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas con PET y por esto se deberán tener en cuenta los parámetros utilizados durante el proceso de impresión de nuestras probetas de prueba y además utilizar valores comunes en los parámetros de impresión, para así identificar las características mecánicas que se esperan de nuestro material en condiciones de impresión usuales. Respecto al material, con base a resultados de otros proyectos similares, decidimos buscar que nuestro material tuviese al menos una resistencia de 60MPa a flexión y 50MPa a tensión, manteniendo constantes las características como las mencionadas anteriormente.

2.5. El carrete se debe poder intercambiar rápidamente

Como la maquina debe poder manufacturar 1kg de filamento continuo, este se le debe poder dispensar a la maquina de impresión 3d, lo cual se realiza al tener todo el filamento enrollado un solo carrete y permitir que la maquina lo valla desenrollando según a medida que va formando la pieza. Nuestra maquina debe tener esto en cuenta para que el filamento sea utilizable. Un carrete de filamento de 1kg tiene una longitud de alrededor de 400 metros. Si el filamento se debe desenrollar manualmente, asumiendo una velocidad de enrolle manual de 5 segundos por metro, la persona se demorara media hora para lograr enrollar el filamento en un carrete vacío. Más aun, hay posibilidad de que en el proceso este se dañe, imposibilitando la continuidad del filamento ya logrado. Más aun, el proceso de enrollado debe tener una tensión constante para evitar el desarmado espontáneo de todo lo que se ha enrollado, de manera que, en conclusión no es practico desenrollar todo el kilogramo para volverlo a enrollar. Más aun, si se quisiera que la maquina produjera filamento rápidamente, el tiempo de desenrollado inyectaría tiempo muerto en la operación de producción. Es por esto que decidimos que el carrete debería poder ser extraíble e intercambiable rápidamente.

2.6. La máquina debe ser segura para quien la usa

La máquina debe poderse usar sin dañar al usuario. Esta será utilizada por una sola persona en un taller de mecánica como los que tiene la universidad. Es una máquina con partes filosas, partes móviles expuestas y utiliza altas temperaturas, es por esto que puede ser una causa de quemaduras, atrapamiento o corte de extremidades. Una de las medidas básicas para mitigar los riesgos de este tipo es permitiendo que la persona pueda parar la maquina por emergencia mientras este utilizándola. También, para mitigar el riesgo, requerimos dificultar el acceso a zonas de peligro para el operario.

2.7. Justificación

La extrusión de filamento para FDM (modelado por deposición fundida) una técnica de manufactura aditiva muy difundida actualmente. Permite hacer figuras complejas con exactitud y a bajo costo respecto a técnicas mas tradicionales como el mecanizado. Esto la hace valiosa para prototipar piezas rápidamente y a bajo costo, con exactitudes suficientes.

Los materiales mas utilizados son el PLA y ABS. Sin embargo, es posible realizar el proceso de extrusión a base de PET. Este es de fácil acceso en envases de este material, generalmente encontrado en botellas de bebidas.

Hallar una forma de utilizar el plástico proveniente de estos envases permitiría hacer mas accesible la manufactura aditiva, pues estos envases son gratuitos y de fácil acceso. Además, por medio de utilizar desechos de botellas en este proceso de manufactura, se reduce la contaminación en ecosistemas por desperdicios plásticos y se abre una puerta a que estos generen empleo. Actualmente estas maquinas son artesanales y esto las limita en la calidad de filamento que pueden producir. Además, no suelen estar en la capacidad de procesar 1kg de filamento, lo cual es importante para obtener un proceso de impresión continuo y de esta manera se minimice intervención de usuario y no se afecte la calidad de la pieza.

Mas aun, tampoco tienen un mecanismo que permita el intercambio del carrete, lo cual es clave para poder producir rollos rápidamente, sin necesidad de desenrollar todo el carrete y pudiendo ser utilizables directamente en el proceso de impresión.

3. Definición del Proyecto

3.1. Objetivo general

Diseñar una maquina que permita producir filamento para impresión 3D a base de envases PET.

3.2. Objetivos específicos

- Identificar los requerimientos del diseño.
- Proponer alternativas de solución para uno o varios subsistemas y seleccionar la mejor alternativa.
- Diseñar los subsistemas de la alternativa seleccionada.
- Manufacturar e integrar las etapas de la máquina.
- Realizar validación y verificación del prototipo.

3.3. Alcance

El objetivo del proyecto es obtener filamento PET con base a envases PET. Esperamos obtener un diseño que permita obtener filamento de calidad con base a botellas PET. El diseño será capaz de recibir botellas pretratadas y a su salida se espera un filamento que permita la impresión de piezas

KPIs para el filamento seleccionado:

Esperamos que el filamento obtenido tenga una densidad de imperfecciones que permita una cierta resistencia mecánica.

El diseño debe estar en capacidad de procesar 3 tipos de botellas específicas seleccionadas, pues cada una tiene parámetros de proceso distintos durante la extrusión, que se deben caracterizar.

El diseño también debe estar en capacidad de procesar 1kg de filamento continuo en varias de sus etapas. Procesar un 1kg de filamento por completo, es decir, desde que se reciben las botellas pretratadas a la entrada hasta que se obtiene un carrete de filamento continuo de 1kg a la salida, requiere de varias etapas (procesos) por los que atraviesa el filamento, en donde progresivamente se va realizando la transformación física paso a paso. Dentro de estos pasos, está uno en el que se realiza la unión del plástico proveniente de todas las botellas para formar un solo cuerpo de plástico (para conformar un carrete continuo) y otro paso en el que se controla la posición del filamento durante el enrollado del mismo en el carrete para que este se enrolle organizadamente.

Debido a restricciones de tiempo, el diseño no contemplará estas etapas. Solo contemplará las etapas de pretratamiento de botellas, como la formulación del proceso necesario para la obtención de las botellas con las características necesarias para el procesamiento de la máquina, y el resto de etapas que transforman al filamento: Corte de botellas, extrusión y halado y enrollado. No se contemplarán las etapas de unión o guiado del filamento durante el enrollado. Debido a que estas son necesarias para la producción de un filamento continuo, el diseño las debe tener en cuenta como parte del diseño en una versión posterior. Es decir, debe permitir y no imposibilitar su implementación posteriormente.

Más aún, las etapas que el proyecto cubre deberán poder procesar una filamento continuo, de manera que una vez implementada la unión, se logre la implementación de una tira continua.

3.4. Requerimientos

En la siguiente tabla, se muestran los requerimientos para el diseño. El numero del requerimiento es el mismo que el numero de su respectiva validación, y el documento evidencia correspondiente a cada validación esta en la sección de validación.

#	Requerimiento
1	Producir filamento utilizable por impresora 3D
1.1	Producir filamento de $1.75\text{mm} \pm 0.05\text{mm}$ de diámetro uniforme filamento
1.2	El filamento debe tener una resistencia a la tracción mayor a 25MPa
1.3	La velocidad lineal del filamento debe tener un error de $\pm 0.5\text{cm/s}$
1.4	La etapa de extrusión pueda sostener una temperatura constante (desviación no mayor a 5°C)
1.5	Número de aperturas del filamento (durante extrusión) por metro igual a cero
1.6	Número de cortes por metro de filamento igual a cero.
2	Producir un carrete de 1 kilogramo de filamento
2.1	Velocidad de corte mínima de 5 metros por segundo
2.2	El acomodo en la etapa de corte debe ser realizable en menos de 10 segundos, sin esfuerzo físico, con solo una herramienta a la mano.
2.3	Tener un sistema que permita extraer el filamento producido en menos de 10 segundos.
3	Poder procesar 3 tipos de botellas
3.1	La etapa de corte debe permitir variar el ancho de tira dependiendo del grosor de la botella con una tolerancia de $\pm 0.5\text{ mm}$ con el ancho objetivo.
3.2	La etapa de extrusión debe permitir acomodar la temperatura entre un rango de 200 y 300 grados.
3.3	La etapa de enrollado debe permitir acomodar la velocidad de extrusión entre un rango de 1 a 2 cm/s.
3.4	Poder parar/seguir la maquina en cualquier momento. Tiempo de parada de 5 segundos
3.5	Visualización de Temperatura. Con un error menor de 3 C°
3.6	Visualización de velocidad de extrusión. Con un error menor de 5

Cuadro 1: Requerimientos

4. Diseño conceptual

4.1. Arquitectura

4.2. Descripción de etapas

1. Pretratamiento: La etapa de pretratamiento se encarga de procesar la botella de forma que el material que se va a pultruir sea uniforme, homogéneo y libre de impurezas. El pretratamiento consiste en dos etapas. Primero, se ingresa aire a presión en la botella y se calienta. Esto remueve irregularidades de forma que la botella sea plana y lisa. Posteriormente, se realiza un lavado de la botella.
2. Etapa de corte: La etapa de corte realizará el corte de la botella en tiras. Este subsistema permite un corte rápido y limpio, manteniendo un ancho de tira constante de forma que se pultruya una cantidad constante de material. El ancho de la tira depende del grosor de la botella, por lo que la altura de corte es variable.
3. Etapa de extrusión: La etapa de extrusión calienta las tiras de plástico y las pasa por una boquilla de un diámetro un poco menor al diámetro de filamento. El plástico caliente toma la forma cilíndrica del filamento y se expande ligeramente. Se implementa un controlador de temperatura industrial de forma que la temperatura de pultrusión sea constante a pesar de las condiciones externas.
4. Etapa de unión: Con el objetivo de producir mayores cantidades de filamento, llegando en lo posible a valores comerciales de medio a 1 kilogramo, se plantea una etapa que permita unir los filamentos producidos por cada una de las botellas en un único tramo de filamento con el peso deseado. Existen dos alternativas: 1) realizar la unión de tiras salidas de la etapa de corte y pultruir o, 2) realizar unión de filamentos ya pultruidos. Se han realizado diversos experimentos para implementar la primera alternativa sin éxito.
5. Etapa de enrollado: La etapa de enrollado toma los filamentos de la etapa de pultrusión y los enrolla en un carrete. Esta etapa consiste en un motor que impulsa un eje acoplado al carrete. El acople entre el eje y el carrete se realiza por medio de un par de conos de caucho que ejercen fricción para transmitir el movimiento. Tanto los conos como los soportes del eje son removibles, lo que permite que la extracción del carrete sea sencilla y rápida. Se implementa un algoritmo de control de velocidad del motor para mantener cierta velocidad de pultrusión que garantice la calidad del filamento, con ayuda de un microcontrolador y un sensor de movimiento angular.
6. Sistema de control: Se encarga de adquirir la información proveniente de los sensores de cada etapa y realizar las tareas de control de movimiento.
7. Interfaz: Indica al usuario los valores de variables importantes para el proceso como temperatura, velocidad, peso, etc. Asimismo, permite ajustar estos parámetros dependiendo de la botella que se esté utilizando.

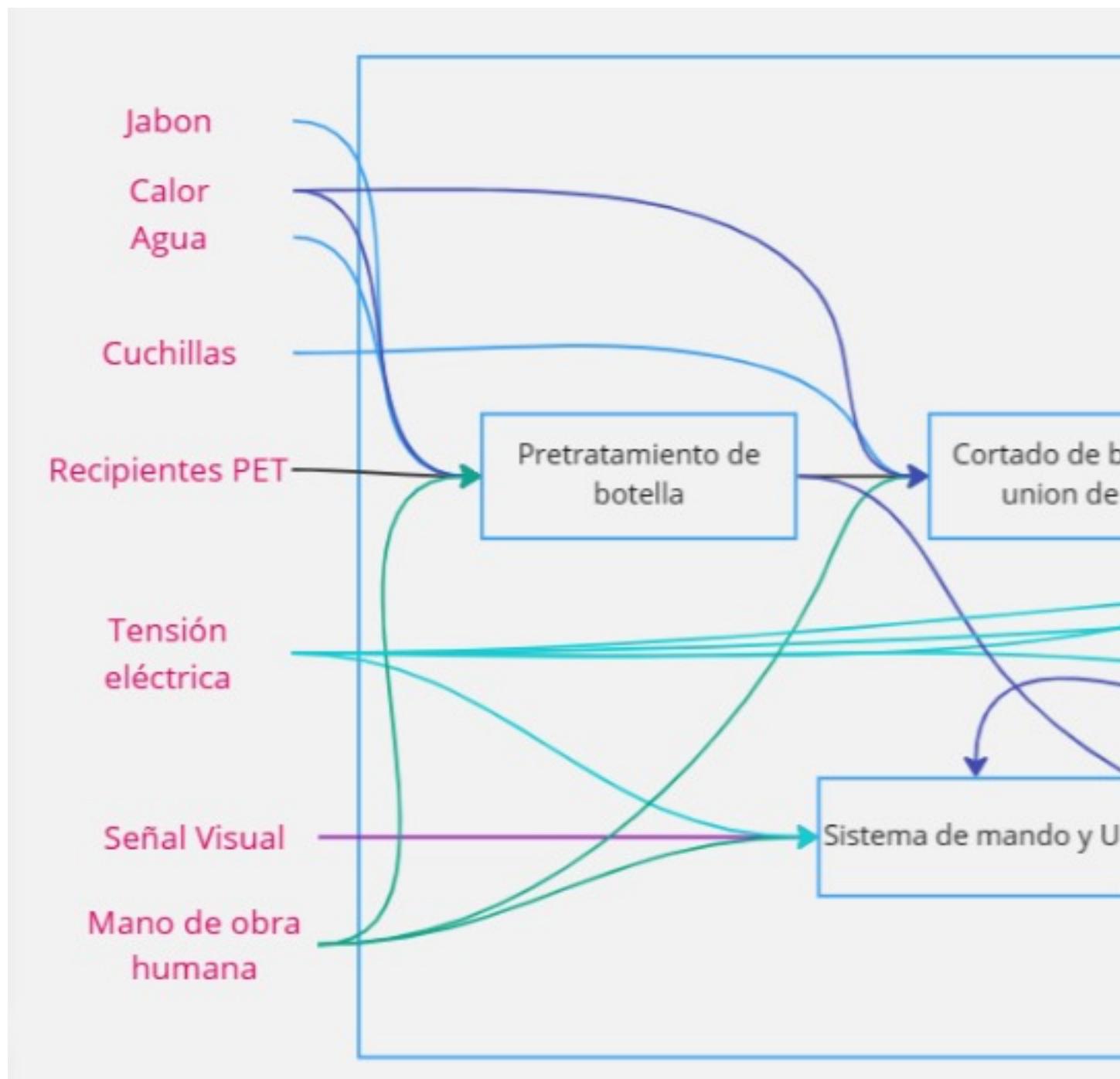


Figura 1: Arquitectura de la maquina

5. Diseño y selección de alternativas

5.1. Etapa de pretratamiento

La etapa de pretatamiento es de suma importancia para el proceso de obtención de filamento 3d pues de esta depende, en parte, la calidad del mismo. Se hace necesario contar con botellas lo mas uniformes posibles y lisas, para, de esta manera, poder garantizar que el filamento obtenido cuente con las tolerancias requeridas y que a su vez, pueda ser extruido.

Este proceso prepara botellas PET para ser cortadas en tiras que permitan ser posteriormente extruidas. El primer paso es retirar la etiqueta de dichas botellas. Sucesivamente, es necesario hacer una limpieza general, tanto interna como externa, de cada botella a usar. Acto seguido y con el fin de obtener tiras lo mas uniformes posibles es necesario eliminar los diferentes relieves y arrugas que estas puedan llegar a tener. Finalmente, debe aplicarse un poco de varsol en el lugar donde la etiqueta pudo haber dejado rastros de adhesivo, asegurando una tira lo más limpia posible.

En lo que respecta al proceso de eliminar los diferentes relieves y arrugas de las botellas se desarrollan diferentes experimentos que permiten determinar el procedimiento mas rápido que permite llevar a cabo la labor sin generar deformaciones grandes apreciables en las botellas. El enfoque de la rapidez en los experimentos se fundamenta en que se busca un producto que sea rentable y, por otro lado, dado que los experimentos son económicos de realizar se desarrollan para determinar la alternativa con mejores resultados. A continuación se presenta cada alternativa, el desarrollo y los resultados de las mismas.

5.1.1. Pistola Calor

Haciendo uso de una pistola de calor se aplica calor sobre la superficie externa de la botella cerrada mientras esta es girada. Este proceso se prueba para diferentes temperaturas sin éxito alguno. Se obtiene únicamente una deformación en la botella que agrega mas imperfecciones en la misma.

5.1.2. Agua en olla



Figura 2: La botella se rota una vez esta dentro de la olla para eliminar relieves indeseados.

Informe Tecnico:

Se dispone una botella de 350ml con 25 mililitros de agua de manera vertical en una olla chocolatera con 80 mililitros de agua. Esta olla se coloca en una estufa con fuego medio durante 50 segundos. El resultado que se obtiene es que los relieves de la parte inferior de la botella se eliminan pero el resto de la botella permanece intacta.

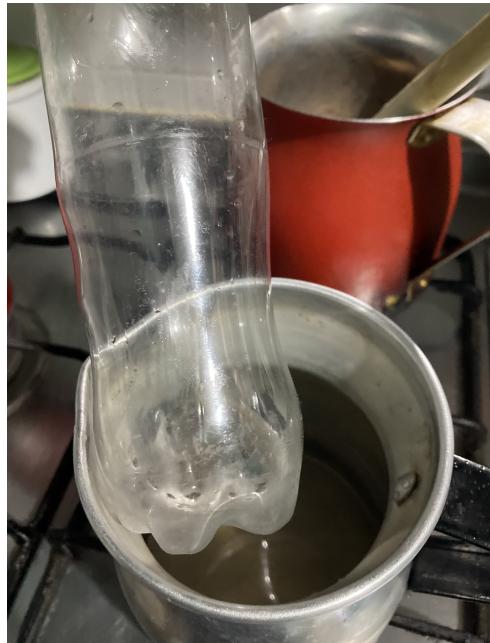


Figura 3: El resultado es una botella caliente en la parte inferior.

5.1.3. Botella con agua expuesta al calor



Figura 4: Botella con 20mL de agua.

Se dispone en una botella de 350ml de 25 mililitros de agua y luego esta se pone a, masomenos, 5cm de altura sobre la estufa a fuego medio. Tras alrededor de 35 segundos se logra obtener una botella sin arrugas ni relieves apreciables. Lo que permite que esto funcione es que el calor hace que una parte

Informe Tecnico:

del liquido se evapore dentro de la botella y este se expanda generando presión sobre las paredes y por ende, la superficie externa de la botella se haga lisa.



Figura 5: Se aprecia una deformación producido por la falta de rotacion de la botella.

Dado el éxito del experimento se procede a usar botellas de 1.5 L, experimento que toma mas de 50 segundos en lograrse pero que modifica la forma de la botella. Esta modificación hace que el espesor de la botella cambie apreciablemente en distintas partes de la misma, efecto indeseable.



Figura 6: Resultado final.

5.1.4. Botella con aire comprimido expuesta al calor



Figura 7: Preparación de las tapas de las botellas.

Con el fin de insertar aire a presión en la botella se modifica la tapa de la misma abriendo un orificio para insertar una aguja tal y como se aprecia en la imagen 7. El paso a seguir es mediante un mini-compresor insertar aire en la botella hasta que el indicador del compresor marque aproximadamente una presión de 10 PSI, vale la pena aclarar que esta presión se define luego de hacer varios intentos fallidos tras los cuales o se obtuvo deformaciones apreciables o explotaba la botella, de manera que finalmente se calienta y gire esta a una altura de 10cm sobre la estufa a fuego medio.



Figura 8: Botella con agujero producto de una presión muy alta.

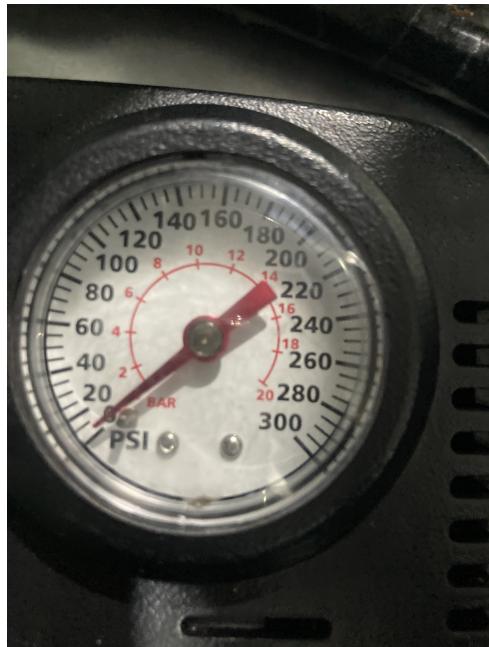


Figura 9: Presión óptima.

Esta prueba se hace para la botella de Coca-cola de 350mL en un tiempo menor a 30 segundos, también se hace para una botella de 1.5L en un tiempo menor a 41 segundos sin obtener deformaciones apreciables. También se hace el experimento con éxito para botellas de jabón king las cuales inicialmente no tienen una forma cilíndrica y da un resultado óptimo. En las siguientes imágenes se aprecia el proceso de primeramente el inflado y posteriormente el calentamiento.



Figura 10: Inflado de botella.



Figura 11: Calentado de botella.

Finalmente, se comprueba el éxito de esta metodología, haciendo el procedimiento para una botella de jabón de 3700mL. El resultado se aprecia en la imagen 12.



Figura 12: Resultado de pre-tratamiento en botellón de Jabón.

Teniendo en cuenta las anteriores alternativas presentadas se hace el siguiente juicio prefactibilidad de las mismas:

Informe Técnico:

A. Juicio de factibilidad

Pregunta	1	2	3	4
1. Es posible que funcione?	1	2	2	1
2. Es atractiva para el equipo?	1	1	2	1
3. Existe una norma que impide su uso?	3	3	3	3

Figura 13: Juicio de prefactibilidad de alternativas de pre-tratamiento.

Sucesivamente se mira la disponibilidad, tal y como se muestra enseguida:

A. Juicio de factibilidad

Pregunta	1	2	3	4
1. Es posible que funcione?	1	2	2	1
2. Es atractiva para el equipo?	1	1	2	1
3. Existe una norma que impide su uso?	3	3	3	3

Figura 14: Disponibilidad alternativas de pre-tratamiento.

Luego se hace la matriz de prefactibilidad:

C. Matriz Pasa-No pasa

Restricción	Alternativas			
	1	2	3	4
Botella lisa, uniforme	1	3	3	2
Botellas de todos los tamaños	1	3	3	2
Velocidad del proceso	1	3	3	2
Operación continua	1	3	1	1

Figura 15: Matriz de prefactibilidad.

Finalmente se hace la siguiente matriz de decisión:

D. Matriz de decisión

Requerimiento	Importancia	Datum	Alternativas			
			1	2	3	4
Tiempo requerido	0,9	0	3	-1	-1	0
Complejidad	0,8	0	0	-1	0	0
Consumo	0,8	0	1	-1	0	0
Costo/Precio	0,8	0	1	-1	-1	0
Precision y exactitud	0,8	0	1	-1	-1	0
Mantenimiento/ Desgaste	0,7	0	0	-1	1	1
Riesgo eléctrico	0,5	0	0	-1	0	0
Riesgo mecánico	0,3	0	0	-1	0	0
Estética	0,1	0	0	-1	0	0
TOTAL	5,7	0	3,3	-5,7	-1,8	0,7

Figura 16: Matriz de decisión de la etapa de pretratamiento.

Teniendo en cuenta lo anterior, se opta por un pretratamiento hecho mediante aire a presión en conjunto con una fuente de calor.

5.2. Etapa de corte

5.2.1. Formulación del problema

Se requiere diseñar una máquina que procese botellas PET y partir de esta genere filamento de impresión de 3d de tal manera que es su fase final este filamento sea un producto que cumpla con los requerimientos del mercado actual de las máquinas de prototipado 3d.

5.2.2. Requerimientos de diseño

el sistema de corte debe ser capaz de cortar una botella de PET en una tira de espesor uniforme y de poder variar la altura de corte para cambiar el espesor de esta.

El espesor de la tira a cortar es función del grosor de la botella debido a que cuando la tira pase por el pultrusor esta debe convertirse un filamento de radio uniforme y debido a que este grosor de radio esta dado por el enrollado de la tira dentro del pultrusor entonces se debe cortar a diferentes alturas en función del grosor de la pared de la botella.

5.2.3. Estado del arte

En la actualidad se encuentran varias propuestas de máquinas productoras de filamento 3d a partir de botellas PET las cuales son:

5.2.4. método cuchilla plataforma



Figura 17: método de cuchilla y rodamiento

5.2.5. método corte por rodamientos



Figura 18: corte con rodamientos

5.2.6. método corte por perfil



Figura 19: corte con perfil

5.2.7. Experimentación previa Sistema de corte

La primera etapa funcional de la maquina tiene que ver con el corte de la botella de PET en una tira uniforme del mismo del mismo espesor. Para profundizar mas en el problema y observar el comportamiento de los diferentes sistemas de corte que se mostraron en la sección anterior se decidió implementar estas opciones para estudiar y experimentar la naturaleza de los sistemas de corte y como resultado se obtuvieron las siguientes configuraciones de corte implementadas :

5.2.8. corte por rodamientos

Para este sistema de corte se realizaron 2 implementaciones en la primera se siguió un método encontrado en internet el cual consistía en partir de dos rodamientos y luego afilar sus dos caras externas para luego obtener el siguiente montaje:



Figura 20: prototipo

Informe Tecnico:



Figura 21: prototipo



Figura 22: prototipo

el cual funciono en un principio pero posteriormente se presentaron fallas en el rodamiento debido que su estructura estaba debilitada y los elementos rodantes se encontraban en malas condiciones después del proceso de afilado, Entonces a partir de eso se decidió implantar un sistema de dos bujes de corte los cuales se acoplarían a los rodamientos, estos dos elementos fueron fabricados en un torno en acero 1045 y como resultado final se obtuvo:



Figura 23: prototipo

El sistema funciono correctamente pero presentaba 2 problemas el primero es que la tira que obtenida por este tenia un acabado no afilado y presentaba hilachas como si fuera mordisqueado y segundo no era tan sencillo obtener la tira de un grosor constante.

5.2.9. corte por perfil

Para la implementación del sistema de corte con perfil se utilizo un perfil de aluminio y se manufacturo totalmente igual al mostrado en la sección de estado del arte obteniendo como resultado :



Figura 24: perfil



Figura 25: método corte con cuchilla

Al implementar este sistema se llego a la conclusión de que es complejo poder obtener una tira de grosor uniforme y además requiere de mas fuerza al realizar el corte debido a que la disposición geométrica de la botella tiene que tener cierta inclinación para que pueda pasar la primera tira de esta, lo que dificultad bastante el proceso de obtención de una tira uniforme.

5.2.10. corte con cuchilla

el ultimo sistema implementado fue el sistema a de corte con cuchilla para el cual se usaron cuchillas de acero para herramientas



Figura 26: metodo corte con cuchilla

para la construcción de este sistema en la parte interna se acoplaron dos rodamientos por los cuales pasaba la tira de plástico y esto funciona como una especie de guía móvil la cuál ofrecía un agarre a la tira y proporcionaba energía mecánica al movimiento de la tira facilitando el corte



Figura 27: método corte con cuchilla

En conclusión este fue el mejor prototipo implementado debido a que era muy fácil obtener la tira y no requería de mucha precisión y habilidad por parte del operario para tener la tira de grosor constante .

5.2.11. selección de alternativas

Teniendo en cuenta todo lo anterior y realizando correctamente el proceso de reflexión concerniente se realizo la selección de la mejor alternativa utilizando a matriz de selección de alternativas vista en clase y como resultado se obtuvo que la mejor alternativa y base fundamental para posteriores diseños era el corte con cuchilla.

Informe Técnico:

1	Positivo
2	Tal Vez
3	Negativo

Figura 28: método corte con cuchilla

Alternativas		
1	corte con elementos rodantes	
2	corte horizontal con perfil en u	
3	corte con cuchilla	

Figura 29: método corte con cuchilla

A. Juicio de factibilidad			
Pregunta	1	2	3
1. Es posible que funcione?	2	3	1
2. Es atractiva para el equipo?	2	2	1
3. Existe una norma que impide su uso?	3	3	3

Figura 30: método corte con cuchilla

B. Disponibilidad Tecnológica			
Pregunta	1	2	3
1. Puede obtenerse mediante procesos existentes?	1	1	1
2. Están definidos sus parámetros físicos?	1	1	1
3. Están identificados sus modos de falla?	1	1	1
4. Su desempeño es controlable durante el ciclo de vida del producto?	1	1	1

Figura 31: método corte con cuchilla

1	Superior
0	Igual
-1	Inferior

Figura 32: método corte con cuchilla

C. Matriz Pasa-No pasa			
Restricción	1	2	3
Tira uniforme	2	3	1
Diferentes grosor	3	1	1
Alimentación constante	1	1	1
Tres tipos de botellas	1	1	1
Parar/Seguir	1	1	1

Figura 33: método corte con cuchilla

5.3. Etapa de extrusión

Para la etapa de extrusión, se buscó un método sencillo y práctico, que fuera intuitivo y tuviera las menores complicaciones posibles. La alternativa principal y definitiva era el uso de un hotend de impresora 3D.

Este dispositivo se compone de un bloque conductor térmico, normalmente de aluminio, un cartucho calentador, que es una resistencia eléctrica y un sensor térmico.

5.3.1. Bloque calentador

Para el bloque calentador destacaron dos alternativas, un bloque prismático atravesado en la dirección mas corta (Bloque de extrusión directa) y otro bloque, también prismático, que a diferencia de la alternativa anterior, es atravesado en la dirección mas larga. Este tipo de bloque se conoce como tipo Vulcano.

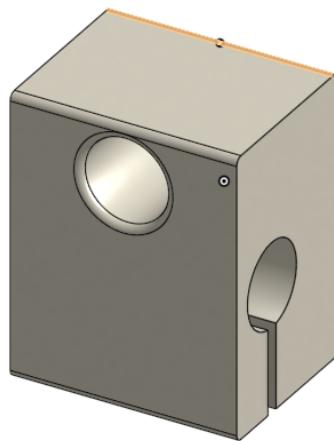


Figura 34: Bloque Calentador de Aluminio

5.3.2. Cartucho calefactor

Los cartuchos disponibles para estas máquinas varían por la cantidad de tensión que reciben. Las opciones que se presentan son un cartucho de 12 voltios y otro de 24 voltios, ambos con una potencia de 40 W.

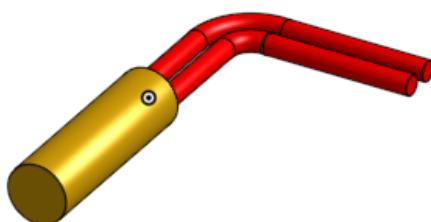


Figura 35: Cartucho de calentamiento

5.3.3. Sensor Térmico

En el sensado de temperatura también se presentaron dos alternativas, por un lado se pensó en detectar la temperatura con un termistor, el cual se conecta a un controlador y esta inscrito en el bloque. Por otro lado existió la alternativa de utilizar una termocupla, la cual se adaptaría al bloque.

5.3.4. Selección de alternativas

Para la elección de alternativas se compararon dos combinaciones, por un lado hay un bloque de extrusión directa con cartucho de 12 v y sensado con termocupla, y por el otro lado se sugiere un

Informe Técnico:

hotend de tipo Vulcano, con cartucho alimentado a 24 v y sensado por termistor. Esta división se realiza por condiciones de venta de los bloques. Se realizaron las siguientes tablas de selección.

A. Juicio de factibilidad			
Pregunta	1	2	
1. Es posible que funcione?	1	1	1 Positivo
2. Es atractiva para el equipo?	1	2	2 Tal Vez
3. Existe una norma que impide su uso?	1	1	3 Negativo

Figura 36: Juicio de prefactibilidad de extrusión

B. Disponibilidad Tecnológica			
Pregunta	1	2	
1. Puede obtenerse mediante procesos existentes?	1	1	1 Si
2. Están definidos sus parámetros físicos?	2	2	2 Tal vez
3. Están identificados sus modos de falla?	2	2	3 No
4. Su desempeño es controlable durante el ciclo de vida del producto?	2	2	

Figura 37: Disponibilidad Tecnológica

C. Matriz Pasa-No pasa			
Restricción	Alternativas		
	1	2	3
Filamento 1.75 mm	1	1	
Características mecánicas similares al comercial	2	2	
Filamento macizo	1	2	
Velocidad constante	2	2	
Normatividad	1	1	
Control de temperatura	1	2	
Operación continua	1	3	

Figura 38: Matriz Pasa-No Pasa

D. Matriz de decisión		Alternativas			
Requerimiento	Importancia	Datum	1	2	
Fuerza	3		1	-1	
Tiempo muerto	1				
Consumo eléctrico	1		1	-1	
Resistencia del material	1,5				
Velocidad de extrusión	1,5		1	-1	
Precisión y exactitud del filamento	2		-1	1	
Costo/Precio	2		1	-1	
Riesgo mecánico	0,5		1	-1	
Riesgo eléctrico	1,5		1	-1	
Estética	1		0	0	
	TOTAL	15	0	7,5	-7,5

Figura 39: Matriz de decisión de extrusión

Por esa razón se seleccionó la primera alternativa.

5.4. Etapa de enrollado

Para la etapa de enrollado se plantearon una gran cantidad de alternativas dado que se dividió la etapa en diferentes sub-etapas como muestra la siguiente figura y se plantearon las alternativas para las mismas.



Figura 40: Subetapas Enorallado

Por cada sub- etapa se plantearon alternativas donde se pasó primeramente por una matriz juicio de factibilidad, posteriormente una matriz de Disponibilidad tecnológica y luego una matriz de pasa / no pasa en el cual los no pasa se replantearon para que cumplieran y pasarán. Seguidamente se realizó una matriz de decisión bajo ciertos criterios y sus respectivos pesos para seleccionar la alternativa a diseñar detalladamente.

5.4.1. Acoplamiento Filamento-Carrete

La etapa de acoplamiento del filamento, siendo redundante, hace referencia al acoplamiento del filamento al carrete para poder enrollarlo. Donde se plantearon las siguientes alternativas:

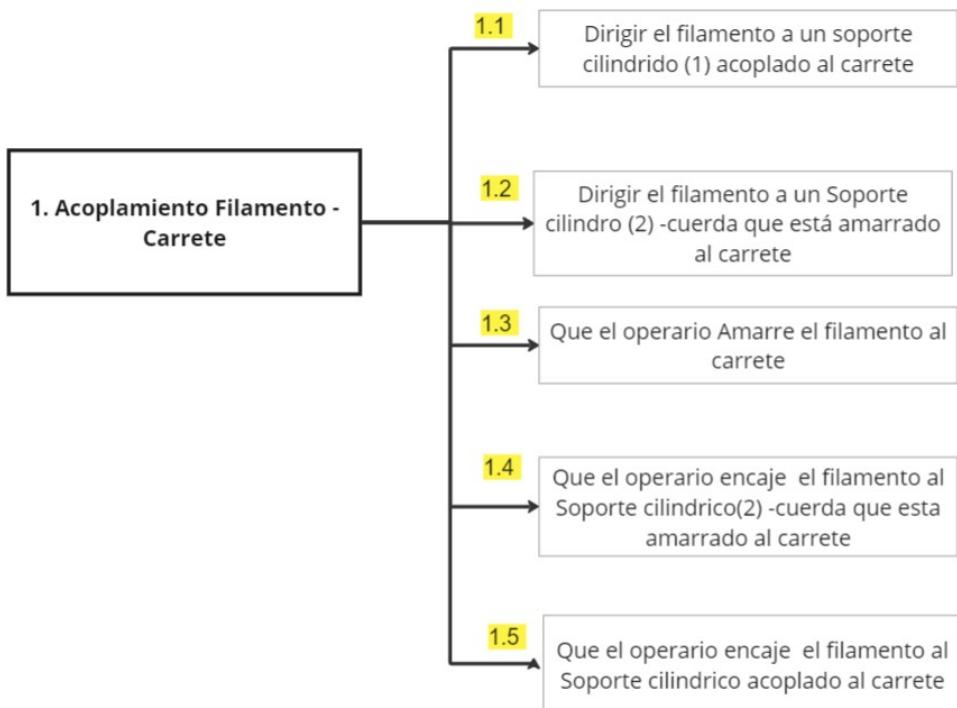


Figura 41: Alternativas acoplamiento filamento-carrete

Para el entendimiento de las alternativas se plantea el uso de un soporte cilíndrico de dos tipos como se ve en la siguiente figura.

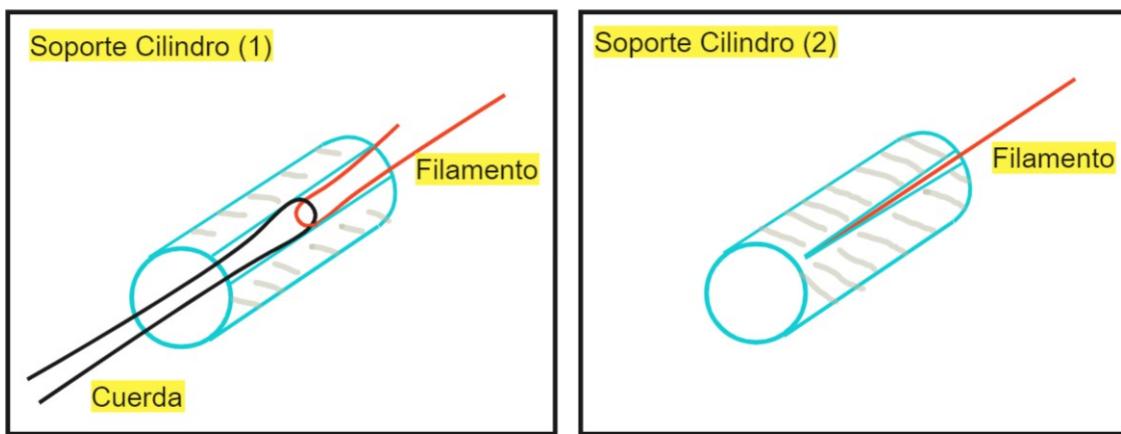


Figura 42: Alternativas acoplamiento filamento-carrete

Soporte Cilindro 1

El soporte cilindro 1 se basa en un cilindro que le genera la fuerza a compresión a un trenzado entre el filamento y una cuerda.

Soporte Cilindro 2

El soporte cilindro 2 se basa en un cilindro que le genera la fuerza a compresión netamente al filamento donde durante su longitud va cambiando su espesor para prensarlo en un costado.

1.1 Dirigir el filamento a un soporte cilíndrico (1) acoplado al carrete

Esta alternativa se basa en que el filamento encaje por su cuenta en el soporte cilindro de tipo 2 encajado en el carrete.

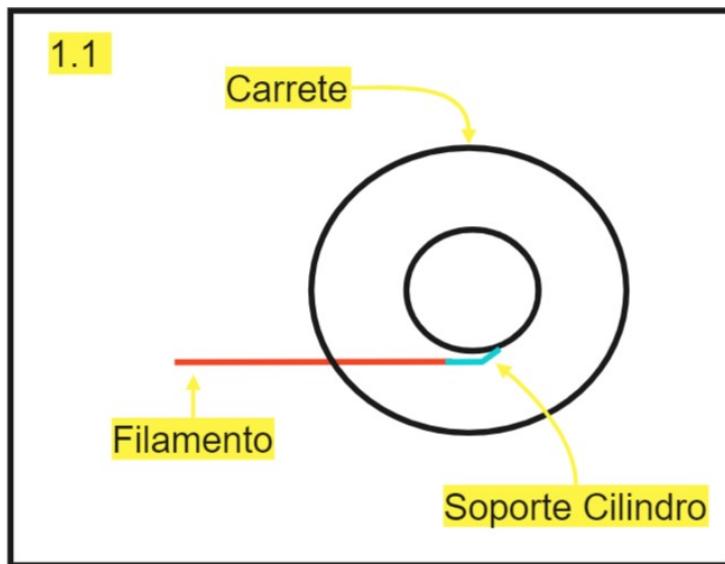


Figura 43: Alternativa 1.1

1.2 Dirigir el filamento a un soporte cilíndrico (2)- cuerda que está amarrado al carrete

Esta alternativa se basa en que el filamento encaje por su cuenta en el soporte cilindro de tipo 1 que esta conectado al carrete por una cuerda. El soporte cilindro se soporta por un soporte que le brinda ubicación fija al soporte cilindro.

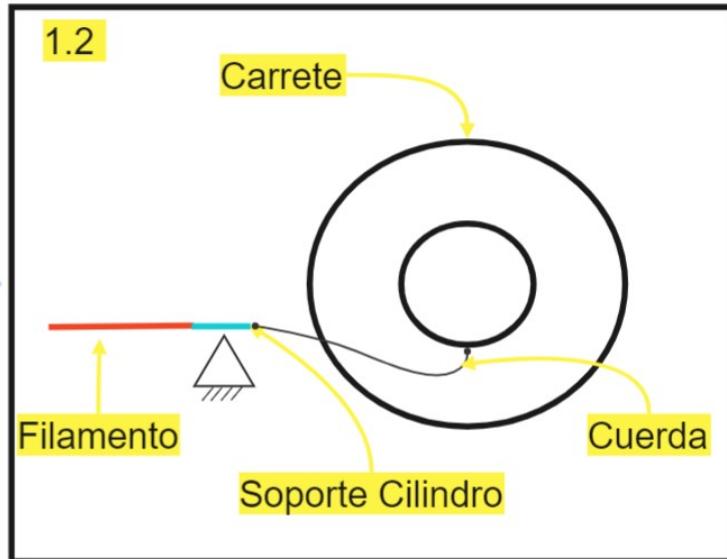


Figura 44: Alternativa 1.2

1.3 Que el operario amarre el filamento al carrete

Esta alternativa se basa en que el operario amarre el filamento al carrete.

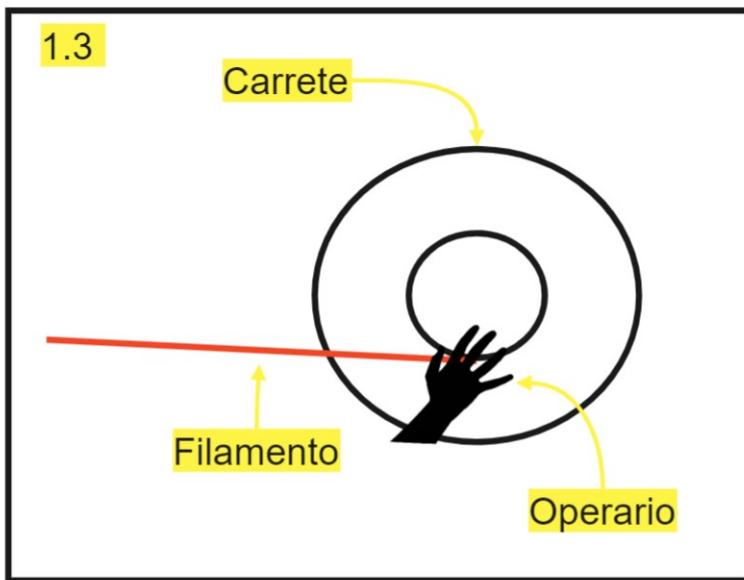


Figura 45: Alternativa 1.3

1.4 Que el operario encaje el filamento al soporte cilindro(2)-cuerda que está amarrado al carrete

Esta alternativa se basa en que el operario encaje el filamento al soporte cilindro (2) que va conectado al carrete por medio de una cuerda.

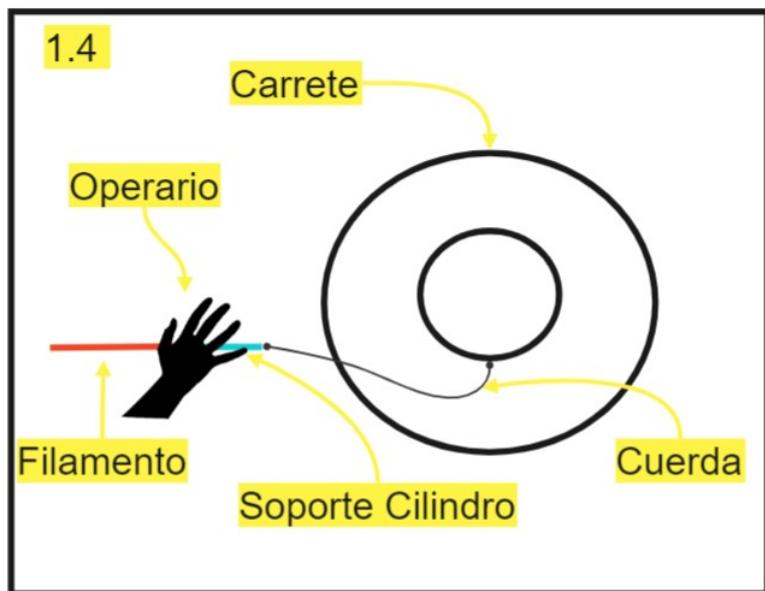


Figura 46: Alternativa 1.4

1.5 Que el operario encaje el filamento al soporte cilindro(1) que está amarrado al carrete

Esta alternativa se basa en que el operario encaje el filamento al soporte cilindro 1 que va anclado al carrete.

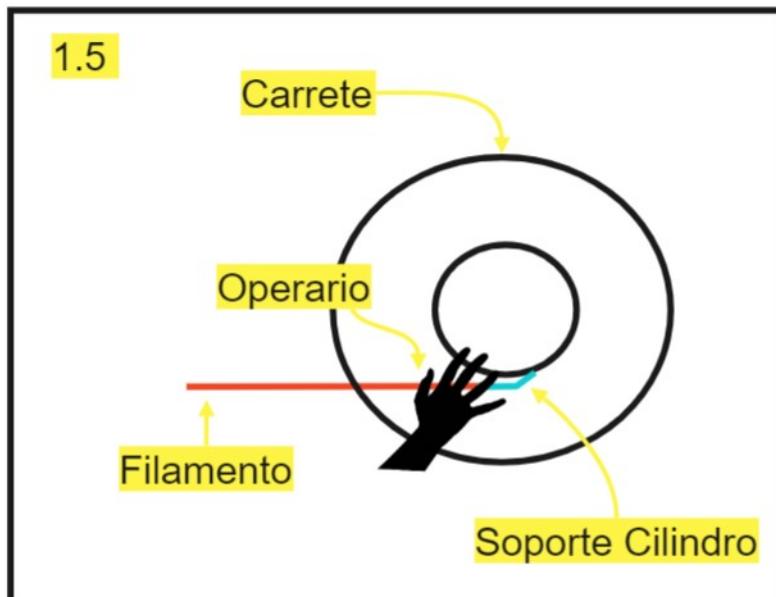


Figura 47: Alternativa 1.5

Matriz de Juicio de factibilidad

A. Juicio de factibilidad

Pregunta	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	
1. Es posible que funcione?	2	2	1	1	2	1 Positivo
2. Es atractiva para el equipo?	2	2	2	2	2	2 Tal Vez
3. Existe una norma que impide su uso?	3	3	3	3	3	3 Negativo

Figura 48: Juicio Factibilidad

Informe Técnico:

Matriz de Disponibilidad Tecnológica

B. Disponibilidad Tecnológica	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	
1. Puede obtenerse mediante procesos existentes?	1	1	1	1	1	1 Positivo
2. Están definidos sus parámetros físicos?	3	3	1	3	3	2 Tal Vez
3. Están identificados sus modos de falla?	1	1	1	1	1	3 Negativo
4. Su desempeño es controlable durante el ciclo de vida del producto?	3	3	1	2	2	

Figura 49: Matriz de Disponibilidad Tecnológica

Matriz pasa/no pasa

C. Matriz Pasa-No pasa	Alternativas					
Restricción	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	
Rollos de 1kg	1	1	1	1	1	1 Si
Velocidad constante	1	1	1	1	1	2 Tal vez
Carretel comercial	1	1	1	1	1	3 No

Figura 50: Matriz pasa/no pasa

Matriz de decisión

D. Matriz de decisión	Importancia	Datum	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	
Velocidad de enrollado	0,3	0	1	0	-1	0	0	1 Superior
Tiempo muerto	0,3	0	-1	-1	0	0	0	0 Igual
Consumo eléctrico	0,2	0	1	1	-1	0	-1	-1 Inferior
Costo/Precio	0,2	0	-1	-1	1	0	1	
Desgaste/Mantenimiento/Ciclo de vida	0,2	0	0	0	1	0	0	
Menor Complejidad	0,2	0	-1	-1	1	1	0	
Menor Riesgo de desacople	0,5	0	-1	-3	1	1	-1	
Estética	0,1	0	1	-1	-1	-1	1	
TOTAL	2	0	-1	-1,1	0,5	0,6	-0,4	

Figura 51: Matriz pasa/no pasa

5.4.2. Medición de velocidad lineal de extrusión

Como se explicara en la sección 7, es necesario realizar un control de la velocidad del motor de enrollado, con el objetivo de mantener una velocidad de extrusión constante. El control de velocidad depende en que el sistema sea capaz de medir la velocidad lineal del filamento. Por este motivo, se plantean diversas alternativas para este propósito.

1. Medición directa en el motor y calculo indirecto

Primeramente, se propone instalar en el eje del motor un sensor de velocidad angular. A partir de la velocidad angular del carrete, es posible calcular la velocidad lineal con la distancia radial entre el centro de giro del carrete y el punto de contacto entre el carrete y el filamento.

La principal dificultad de esta alternativa se encuentra en el hecho de que, conforme el filamento se enrolla en el carrete, la distancia radial varía, cambiando la velocidad lineal del filamento. Esta variación puede estimarse conociendo el numero de vueltas que toma llenar un tramo del carrete y el numero de vueltas actual. Con ello, se calcula el aumento de altura. Sin embargo, esta estrategia no es confiable pues múltiples factores externos pueden afectar la variación de altura, como por ejemplo filamentos sobrepuertos o espacios entre vueltas.

2. Medición directa en el motor y calculo con sensor ultrasónico

Para solucionar el inconveniente descrito anteriormente, se propone utilizar un sensor ultrasónico que

pueda medir la altura entre la bancada y el diámetro exterior del carrete. De esta forma, la medición de altura sería directa en vez de realizada por medio de un cálculo por vueltas. Esto se ilustra en la figura 52.

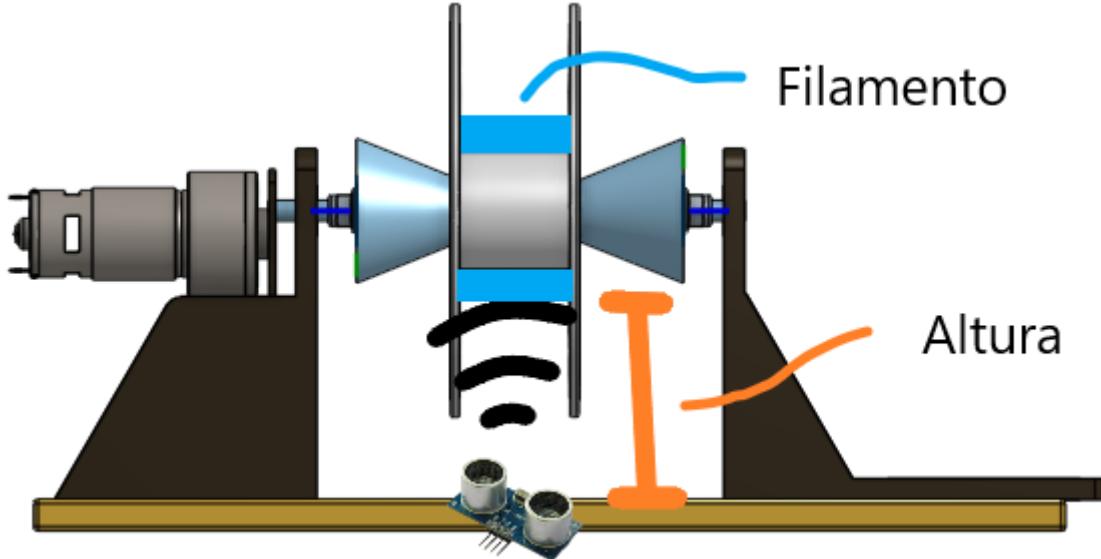


Figura 52: Medición de velocidad con ayuda de sensor ultrasónico

Sin embargo, esta alternativa aun no está libre de los factores externos mencionados anteriormente. Para ello, sería necesario mover horizontalmente el sensor para tener la altura real del filamento que se está enrollando, o tener un patrón de sensores ultrasónicos que tome medidas en varios puntos. Estas opciones pueden resultar imprácticas de implementar y poco flexibles en caso de que se usen carretes de diversas dimensiones.

3. Medición en polea auxiliar y cálculo indirecto

Para solucionar el problema de la variación de la distancia radial, se piensa en una alternativa que implique una distancia radial constante conocida. Así, se propone realizar la medición de velocidad lineal en una polea auxiliar que gire solidariamente con el carrete. El radio de esta polea es conocido, por lo que con medir su velocidad angular, se obtiene la velocidad lineal del filamento. La figura 53 ilustra el concepto de esta alternativa.

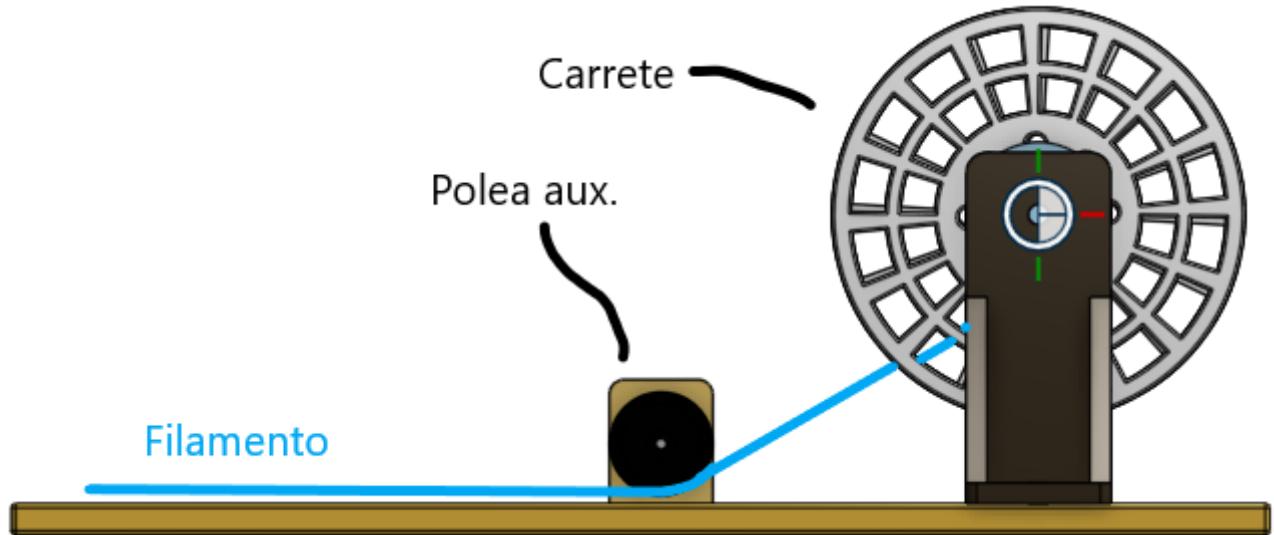


Figura 53: Medición de velocidad con polea auxiliar

Una consideración importante al momento de la implementación de esta alternativa es que la fricción entre el filamento y la polea auxiliar sea suficiente para que se genere la rotación en el eje. Las reflexiones hechas respecto a la viabilidad de las alternativas se resumen en el siguiente proceso con matrices de decisión de las figuras 54, 55 y 56.

A. Juicio de factibilidad			
Pregunta	1	2	3
1. Es posible que funcione?	1	1	1
2. Es atractiva para el equipo?	1	2	3
3. Existe una norma que impide su uso?	3	3	3

1	Positivo
2	Tal Vez
3	Negativo

Figura 54: Análisis de factibilidad para alternativas de medición

B. Disponibilidad Tecnológica			
Pregunta	1	2	3
1. Puede obtenerse mediante procesos existentes?	1	1	1
2. Están definidos sus parámetros físicos?	1	1	1
3. Están identificados sus modos de falla?	1	2	1
Su desempeño es controlable durante el ciclo de vida del producto	1	1	1

Figura 55: Análisis de disponibilidad tecnológica para alternativas de medición

C. Matriz Pasa-No pasa			
		Alternativas	
Requerimiento	1	2	3
Medición de velocidad precisa	1	2	2

1	Si
2	Tal vez
3	No

Figura 56: Matriz pasa-no pasa para alternativas de medición

5.5. Interfaz Humano Máquina y electrónica de control

Para un funcionamiento adecuado y eficiente de la máquina, es necesario que esta cuente con capacidades básicas de comando y control de las variables de proceso con el fin de obtener un producto de calidad, resistente a perturbaciones inherentes al proceso, como por ejemplo las diferencias en el grosor de las botellas a tratar y la longitud y ancho de las tiras, además de otras externas, como los

Informe Técnico:

cambios en la temperatura y presión atmosférica, entre muchos otros. En adición, para lograr un funcionamiento apropiado y eficiente de las etapas directamente involucradas en el proceso, como lo son las de extrusión y enrollado.

Por otro lado, es necesario que un operario tenga acceso fácil y seguro para consultar dichas variables con el fin de tener conciencia plena del proceso, realizar correcciones en caso de ser necesarias y en casos de fallo tener la manera de detener el proceso protegiendo su integridad y la de los elementos a su alrededor.

Esto evidencia la necesidad de implementar un sistema electrónico de monitoreo y control, el cual se encargará de efectuar las tareas antes mencionadas. Las variables de proceso fundamentales son la velocidad de extrusión y temperatura de calentamiento del material.

5.5.1. Requerimientos funcionales

Se identificaron los siguientes requerimientos para el sistema de monitoreo, comando y control:

- Permitir al operador la fácil y segura consulta de las principales variables de proceso: las cuales son temperatura de extrusión del filamento y velocidad de enrollado, las cuales son fundamentales para la obtención de un filamento de calidad que cumpla con los requerimientos establecidos para el proyecto.
- Permitir al operador la consulta de la cantidad de filamento producido cuando finaliza el proceso por cada tira obtenida en la etapa de corte, lo que es muy importante para la posible comercialización del producto final.
- Contar con elementos de alerta y señalización ya sean visuales o auditivos, permitiendo al operario identificar fallos y potenciales riesgos durante el funcionamiento de la máquina.
- Contar con elementos que permitan la detención inmediata del funcionamiento de la máquina una vez identificado un fallo o potencial riesgo, tanto desde el sistema de control como manualmente por el operario.
- Permitir al operario el establecimiento y modificación de los parámetros de proceso en cualquier momento del funcionamiento de este (En caliente).
- Tener la capacidad de realizar control de las variables de proceso, logrando el seguimiento de los parámetros establecidos por el operario, lo cual implica capacidades funcionales, periféricos, sensórica, frecuencia de cálculo, frecuencia de muestreo, etc.
- Contar con características de robustez y capacidad de adaptación a diversos escenarios de uso.
- Costo de adquisición menor a COP \$ 100.000 y capacidad de incorporar en un espacio de 200x200x200 mm.

5.5.2. Selección del sistema central de procesamiento

Cuando se habla de sistemas de comando y control, se tienen dos alternativas para tener en consideración, siendo estas el uso de microcontroladores y el uso de controladores lógicos programables (PLC). En cuanto a microcontroladores, las opciones más accesibles en cuanto a disponibilidad, costo, documentación y consulta de información, versatilidad, catálogo de accesorios y capacidad de procesamiento son Arduino y PIC, los cuales cuentan con las características y herramientas necesarias para llevar a cabo los requerimientos funcionales descritos anteriormente. Estos se comparan directamente

Informe Técnico:

con la posibilidad de implementación de un sistema PLC. Las respectivas matrices se pueden ver en las figuras 57, 58, 59 y 60. Cabe aclarar que en la matriz de decisión, la alternativa que se toma como Datum es la 2 que es el Microcontrolador Arduino. Se toman como restricciones principales el costo del dispositivo y su tamaño.

A. Juicio de factibilidad			
Pregunta	1	2	3
1. Es posible que funcione?	1	1	1
2. Es atractiva para el equipo?	1	2	1
3. Existe una norma que impide su uso?	1	1	1

Figura 57: Juicio de factibilidad

B. Disponibilidad Tecnológica			
Pregunta	1	2	3
1. Puede obtenerse mediante procesos existentes?	1	1	1
2. Están definidos sus parámetros físicos?	1	1	1
3. Están identificados sus modos de falla?	1	1	1
4. Su desempeño es controlable durante el ciclo de vida del producto?	2	2	1

Figura 58: Disponibilidad

C. Matriz Pasa-No pasa			
Restricción	1	2	3
Tamaño	1	1	2
Costo	1	3	3

Figura 59: Matriz pasa no pasa

Requerimiento	Importancia	Datum	Alternativas		
			1	2	3
Accesibilidad de información	0,8	0	1	0	1
Accesibilidad de accesorios	0,7	0	0	0	1
Capacidades funcionales	1	0	0	0	1
Capacidad de desempeño	1	0	0	0	1
TOTAL	3,5	0	1,2	0	0,5

Figura 60: Matriz de decisión

Como se puede apreciar, la alternativa que cumple tanto con las restricciones de tamaño y costo y además tiene el mejor desempeño en cuanto a requerimientos es la alternativa del microcontrolador PIC.

5.5.3. Selección de la Interfaz Humano Máquina

Para tener una visualización apropiada de las variables de proceso, así como su establecimiento por parte del operario se proponen dos métodos, los cuales son el uso de una pantalla tipo LCD integrada en la máquina o la implementación de un entorno de control por medio de software en computadora. Cada una de estas tiene sus implicaciones inherentes al sistema:

- LCD integrada en la máquina: Inherentelemente implica una simplificación de la información mostrada, se requiere de un método de entrada por parte del operario (botones, pulsadores, interruptores) simplificada, implementación de alertas sonoras y visuales en la máquina.
- HMI por software de computadora: Implica la necesidad de tener una computadora en todo momento disponible, implementación de protocolos de comunicación máquina-computadora, las alertas se pueden implementar por software, visualización de la información mas completa.

Se procede a realizar el respectivo juicio de decisión, se establecen como requerimientos de desempeño: Simplicidad, probabilidad de fallas, capacidad de ser implementada, capacidad de ser usada, capacidad de mostrar información, capacidad de acción frente a falla. Los otros juicios no se tienen en cuenta debido a que ambas alternativas cumplen por completo. La matriz se puede ver en la figura 61. La alternativa que se toma como datum es la de la interfaz por software de computadora.

D. Matriz de decisión		Datum	Alternativas		
Requerimiento	Importancia		1	2	
Simplicidad	0,8	0	1	0	
Probabilidad de falla	1	0	1	0	
Capacidad de implementación	0,6	0	0	0	
Capacidad de ser usada	0,9	0	1	0	
Capacidad de mostrar información	0,8	0	-1	0	
Capacidad de respuesta a fallos	1	0	1	0	
TOTAL	5,1	0	2	0	

+	-	0
Superior	Igual	Inferior

Figura 61: Matriz de decisión

Como se puede apreciar, la alternativa de la LCD integrada tiene un desempeño superior debido principalmente a su capacidad de respuesta a fallos de la máquina al igual que a la probabilidad de falla reducida al ser más simple y estar directamente integrada dentro de la máquina.

6. Metodología

6.1. Metodología de gestión de proyecto

La gestión de las actividades del proyecto se basa en la metodología en V [8]. A continuación, se describe el trabajo del equipo durante las etapas de la metodología.

6.1.1. Descenso

Como se muestra en la figura 62, el equipo comienza realizando discusiones periódicas con el cliente del proyecto para definir y acordar unas bases que guiarán el proceso de diseño del producto. Durante estas reuniones, el equipo escucha las características que desea el cliente en el producto final y las traduce a requerimientos en términos de ingeniería.

Conforme se desciende por la V, el equipo investiga la problemática en mayor detalle, revelando nueva información que contribuye a afinar los requerimientos y plantear nuevos requerimientos. Esta investigación se enfoca principalmente en comprender el proceso de formado de plástico en filamento y de las variables involucradas en el mismo. También se realiza una exploración del estado del arte, analizando productos ya existentes que realicen el proceso y que puedan cumplir los requerimientos. Asimismo, el equipo realiza bosquejos preliminares de la arquitectura de la solución y propone alternativas para implementar cada elemento de la arquitectura.

La propuesta de alternativas se basa principalmente en la indagación sobre prototipos existentes en el estado del arte y en la creación de prototipos propios que permitan experimentar nuevas ideas. Este proceso se describe en la sección 7. Todo esto contribuye a identificar subrequerimientos más específicos que dependen de la solución, su implementación, manufactura e integración.

En cualquier momento durante esta etapa, es posible dejar de descender y moverse verticalmente. Un movimiento hacia arriba indica que el equipo decide reunirse con el cliente para aprobar los requerimientos y alternativas de solución que se han planteado hasta el momento. Un movimiento hacia abajo representa cuando el equipo evalúa si los requerimientos que se están planteando realmente pueden ser resueltos dentro de los recursos y restricciones existentes. Esta evaluación se realiza por medio de estudios de predictibilidad, identificación de fuentes de riesgo y consulta a expertos.

Además de ello, es necesario moverse horizontalmente hacia el otro extremo de la V. Aquí, el equipo

visualiza como se realizará la verificación y validación de los requerimientos que se proponen durante esta etapa. El equipo realiza una tabla donde enlista los requerimientos, las fuentes de información para saber si el requerimiento puede ser cumplido, y el criterio de evaluación para validar el requerimiento. De esta forma, el equipo se asegura que el producto está construido de la manera correcta y que cumple con las expectativas del cliente.

Al final del descenso, el equipo ha de evaluar las alternativas propuestas y decidir cuál satisface de mejor manera los requerimientos del cliente. Esta evaluación se realiza con juicios de factibilidad, juicios de disponibilidad tecnológica, matrices pasa - no pasa, y matrices de decisión, las cuales serán descritas en la sección 7.

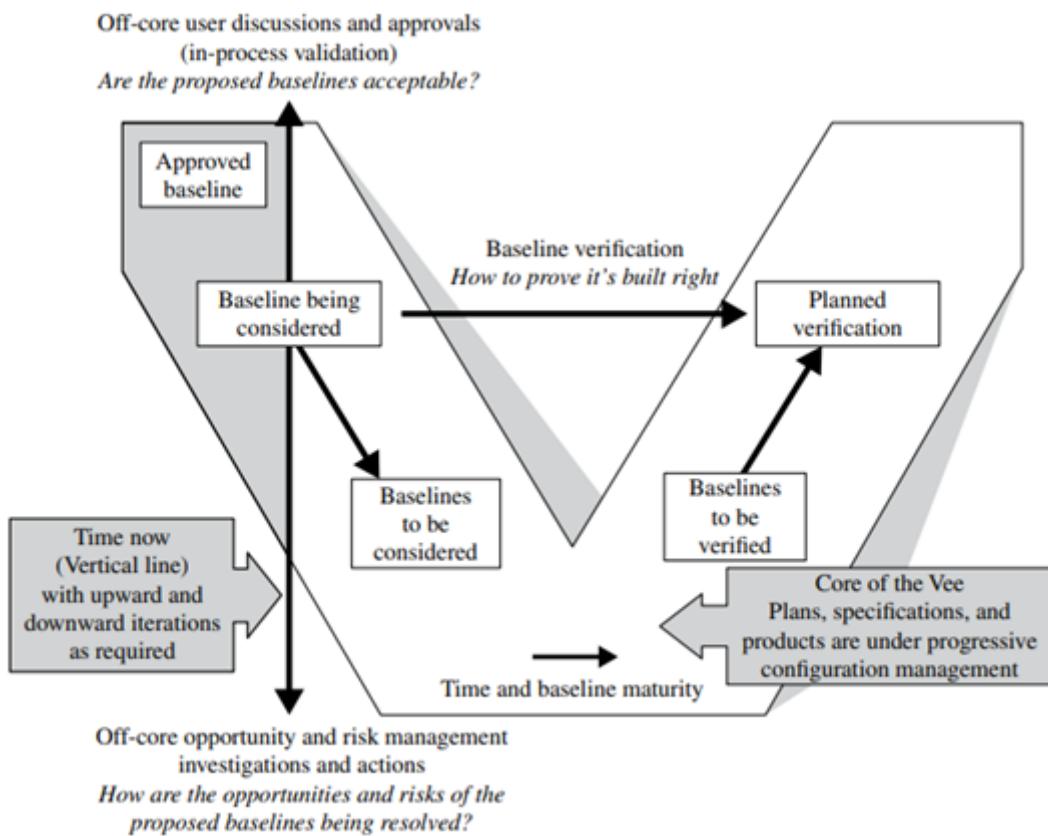


Figura 62: Descenso por la V. Tomado de [8]

6.1.2. Base

La base de la V es la etapa en que se concentra el trabajo técnico y de ingeniería del equipo. En esta se realiza el diseño e implementación de la solución propuesta en la etapa anterior.

En el diseño, se determinan todos los datos técnicos, detalles constructivos y condiciones del producto para que cumpla con los requerimientos y se pueda pasar a su manufactura. Debido a la arquitectura modular del producto, cada miembro del equipo asume una etapa y diseña la alternativa escogida para esa etapa. Esto implica el desarrollo de cálculos de ingeniería, modelos en CAD, simulaciones, planos, etc. Estos elementos son descritos en la sección 7.

En la implementación, se realiza la manufactura, construcción, producción y compra de los componentes cumpliendo con lo definido en el diseño. Una vez manufacturados cada uno de los subsistemas, se procede a un proceso de integración de los subsistemas para llegar al producto final. Este proceso se describe en la sección 8.

6.1.3. Ascenso

El ascenso por la V se ilustra en la figura 63. Conforme se asciende, el equipo comprueba que el producto cumpla con los requerimientos definidos. Esto se realiza a través de las actividades de verificación y validación del producto que fueron planeadas en la fase de descenso, lo que se muestra como un movimiento horizontal hacia el extremo izquierdo de la V. Las actividades se basan principalmente en pruebas experimentales sobre el prototipo para medir métricas de desempeño. Esto se describe en la sección 9.

Igual que en el descenso, es posible detenerse en cualquier punto del ascenso para moverse verticalmente. Un movimiento hacia arriba representa cuando el equipo busca al cliente para aprobar que el producto cumple satisfactoriamente con los requerimientos que necesita. También se negocia el alcance del proyecto en caso que no sea posible conseguir algunos requerimientos. Un movimiento hacia abajo representa cuando el equipo vuelve a los detalles técnicos del producto diseñado para identificar la causa de que el prototipo no cumpla con las expectativas y replantear el diseño.

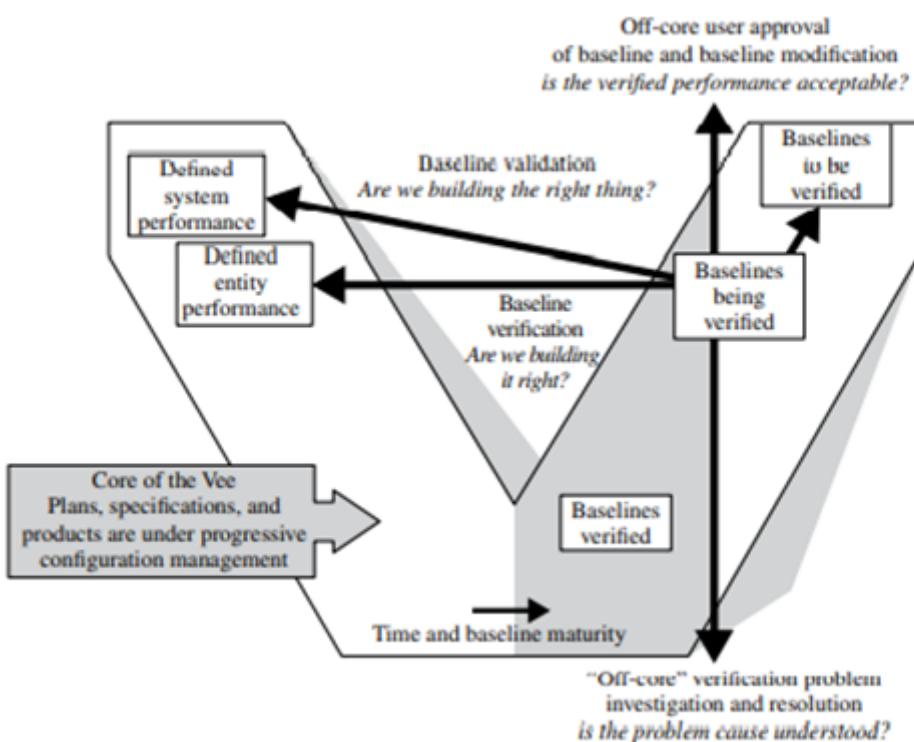


Figura 63: Ascenso por la V. Tomado de [8]

6.1.4. Lista de actividades

Basados en la metodología descrita anteriormente y tomando elementos del ciclo de vida de proyecto propuesto por la NASA [9], se propone la siguiente lista de actividades del proyecto:

- Etapa de Concepto

1. Definición del problema y solución
 - a) Identificación de necesidad.
 - b) Identificación del cliente.
 - c) Identificación preliminar de requerimientos, restricciones y objetivos.

Informe Técnico:

- d) Concepto preliminar de la solución
 - e) Búsqueda de tecnología existente y estado del arte
 - f) Definición de roles y metodología de trabajo en equipo
 - g) Estudio preliminar de factibilidad tecnológica y económica.
 - h) Identificación de fuentes de riesgo y planeación para mitigarlas.
2. Selección de concepto
 - a) Identificar, clarificar y documentar la concepción funcional del cliente sobre el sistema.
 - b) Planificación preliminar de la verificación y validación de los requerimientos.
 - c) Planificación preliminar de la integración
 - d) Definición preliminar de la arquitectura del sistema.
 - e) Diseño y evaluación preliminar de alternativas.
 - f) Selección de la mejor alternativa
 - g) Definición formal del alcance del proyecto y opciones de descoping
- Etapa de Desarrollo
 1. Conversión de requerimientos preliminares en requerimientos del sistema.
 2. Identificación de requerimientos de producción, entrenamiento y soporte de sistema.
 3. Definición formal de la arquitectura del sistema.
 4. Diseño de detalle de los elementos del sistema.
 5. Diseño de interfaz del sistema.
 6. Planificación de implementación y manufactura.
 7. Definición formal y ejecución de actividades de verificación y validación de requerimientos del cliente y del sistema.
 8. Definición formal de actividades de integración.
 - Etapa de Producción
 1. Manufactura y fabricación de los componentes del sistema
 2. Redefinición de requerimientos o arquitectura según sea necesario
 3. Integración de los componentes del sistema.
 - Etapa de Validación y Verificación
 1. Ejecución de actividades de verificación y validación de requerimientos.
 2. Resolver discrepancias en la verificación y validación.
 3. Documentación final del proyecto.

Las actividades listadas anteriormente se organizan en el cronograma del anexo A.

7. Diseño

7.1. Etapa de corte

7.1.1. Prototipo 3d con varias alturas

Posterior a los experimentos nombrados anterior mente se decidió realizar un prototipo de experimental en cual se pudiera cortar a varias alturas la cual es función de la distancia entre la cuchilla y el suelo de corte.



Figura 64: prototipo 3d

este funciono muy bien pero luego de vario tiempo de usos se comenzó a desgastar en la pared de corte interna debido al rozamiento final que tenia la tira de plastico con el material. a partir de eso se infiere que el final de carrera de corte es necesario un refuerzo de material

7.1.2. geometría de la guía de corte

Como el requerimiento original de la maquina era que esta se pudiera adaptar a diferentes tamaños de botellas en función de su radio entonces busco la manera que las mandíbulas de corte se pudieran adaptar a los diferentes tamaños de los radios de corte, experimental mente con la implantación del curte con chilla guiado por rodamientos se pudo evidenciar que no se requiere un radio específico pero si que exista cierta curvatura y un tensión entre la pared de la botella y la mandíbula para que esta se acople debido a que el plástico es flexible hasta cierto punto. para esto se experimento con mandíbulas de diferentes radios :

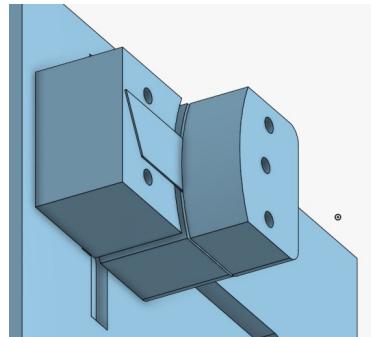


Figura 65: curva circular

al final se llegó a la conclusión de que es necesario una curva circular pero no toda la circunferencia sino más bien un cuarto y que el final de carrera de corte sea recto como una línea tangencial para que luego la botella pase por la cueva esta pueda salir fácilmente y no desgaste la parte final de la carrera de corte. Obteniendo esta geometría:

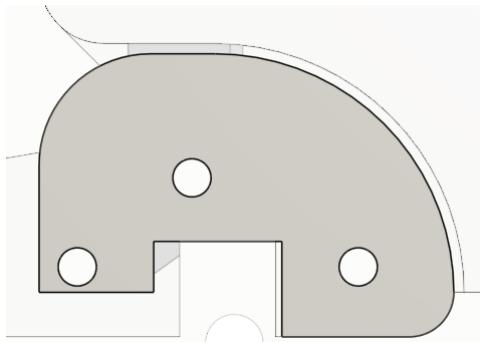


Figura 66: curva final

de tal manera que se obtuvo la siguiente geometría final para el sistema de corte:

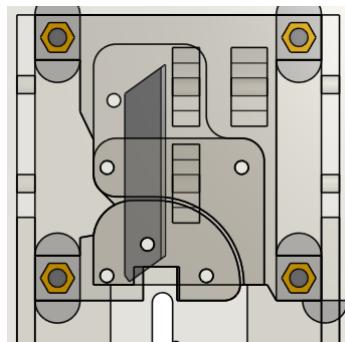


Figura 67: geometría final

7.1.3. análisis de fuerzas

Se realizó un experimento por medio de un sistema de peso variable el cual estaba acoplado al sistema de corte donde se concluyó que la fuerza necesaria para realizar el corte es de

$$F_c = 50N$$

para la construcción de la etapa final se usó como material base acrílico y tornillos roscados pasantes de 5 mm de radio.

7.1.4. cortante en el tornillo

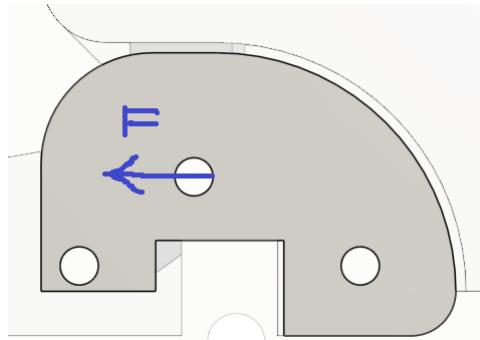


Figura 68: esfuerzo

Para calcular el esfuerzo cortante en el tornillo de parte de la fuerza y un área de

$$A = \frac{25}{4}\pi$$

$$\tau = FA$$

$$\tau = 2,5 \text{ MPa}$$

el tornillo es de acero 1045 normalizado por ende tiene un límite de fluencia

$$S_y = 494 \text{ MPa}$$

por consiguiente el factor de seguridad será:

$$F_s = \frac{S_y}{\tau}$$

$$F_s = 193,99$$

7.1.5. flexión en el tornillo

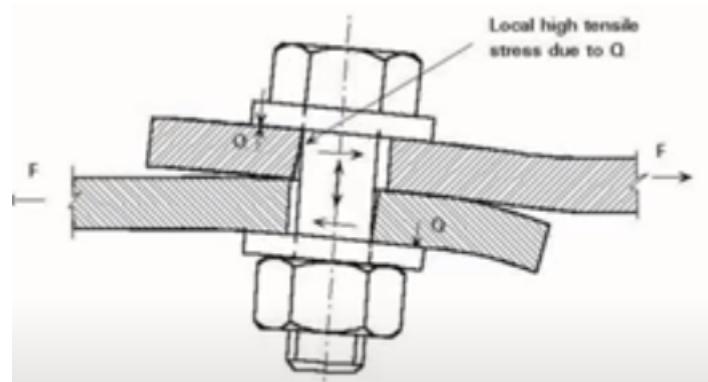


Figura 69: Flexión en el perno

debido a que siempre se va aplicar carga por parte de la mandíbula interior hacia el tornillo y este debe asegurar la parte superior sobre la parte interna de la mandíbula entre si entonces este severa sometido a un esfuerzo de flexión. momento flector máximo sobre el perno es:

$$M = 50[\text{N}] * 2,6[\text{mm}] = 130[\text{Nm}]\newline 40$$

Informe Técnico:

momento seccional de inercia del perno:

$$I_p = \frac{1}{4} * \pi * r^4 = 30,68 [mm^4]$$

esfuerzo de flexión en el perno:

$$\sigma_f = \frac{M * 0,5 * d}{I_p} = 2,5 [Mpa]$$

entonces se tiene un factor de seguridad a flexión en el perno de:

$$F_f = \frac{S_y}{\sigma_f} = 197$$

7.1.6. aplastamiento en la unión de acrílico

el acrílico presenta un esfuerzo a la tracción de

$$P = 77 Mpa$$

como la altura del mecanismo es variable se calcular con el espesor máximo que sería de

$$t = 30 mm$$

entonces el esfuerzo de aplastamiento que ejerce el tornillo sobre el acrílico cuando se aplica el corte sería :

$$\sigma = \frac{F_C}{t.d}$$

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{50 N}{150 mm^2} \\ \sigma &= 0,33 Mpa\end{aligned}$$

y el factor de seguridad sería entonces

$$F_S = \frac{P}{\sigma}$$

$$F_s = 231$$

Selección de material Se escogió el acrílico como material base porque cumple con las propiedades mecánicas requeridas por el diseño y por su versatilidad a la hora de manufactura debido que este puede ser cortado fácilmente usando corte láser, si bien en principio se planeó fabricar las mandíbulas de corte en acero o aluminio, el proceso de manufactura era demasiado costoso para el presupuesto brindado por el cliente, entonces como ya se comprobó anteriormente en el análisis de resistencia mecánica el acrílico cumple y es una solución viable en términos de manufactura, por esta razón se escogió el acrílico como material base.

7.1.7. mantenimiento

para el sistema de corte el plan de mantenimiento es muy simple pues solo se deben cambiar las cuchillas con regularidad dependiendo de como este el filo, si existe algún fallo en las mandíbulas esta se pueden mandar a cortar de nuevo en verdad es un material económico y fácil de manufacturar mediante tecnología de corte láser.

7.2. Etapa de extrusión

En esta etapa se realizó un diseño sencillo por selección, a continuación se resaltan factores importantes

7.2.1. Alimentación

En esta etapa se buscaba una fuente de 12 v, esto debido a que la alternativa seleccionada funcionaba con esta tensión, por lo tanto se tenía que hallar una alimentación con una corriente que cumpla con ese requerimiento del cartucho

$$\text{Corriente} = \frac{\text{Potencia}}{\text{Tensión}}$$

$$\text{Corriente} = 3,33A$$

Teniendo en cuenta este factor, la fuente principal del proyecto es de 12 v a 5 A, lo cual cumple con la potencia del extrusor y es utilizada para alimentar otras fases, como la de enrollado.

7.2.2. Montaje

Para poder extruir, se tiene que seleccionar una base en la cual se pueda empotrar el bloque de extrusión y resista los esfuerzos mecánicos que se calculan en la sección de enrollado.

7.3. Etapa de enrollado

7.3.1. Calculo del motor

Con este objetivo en mente se hace un montaje físico en el cual se pone un carrete de un kilo enlazado con un filamento al momento de ser extruido.

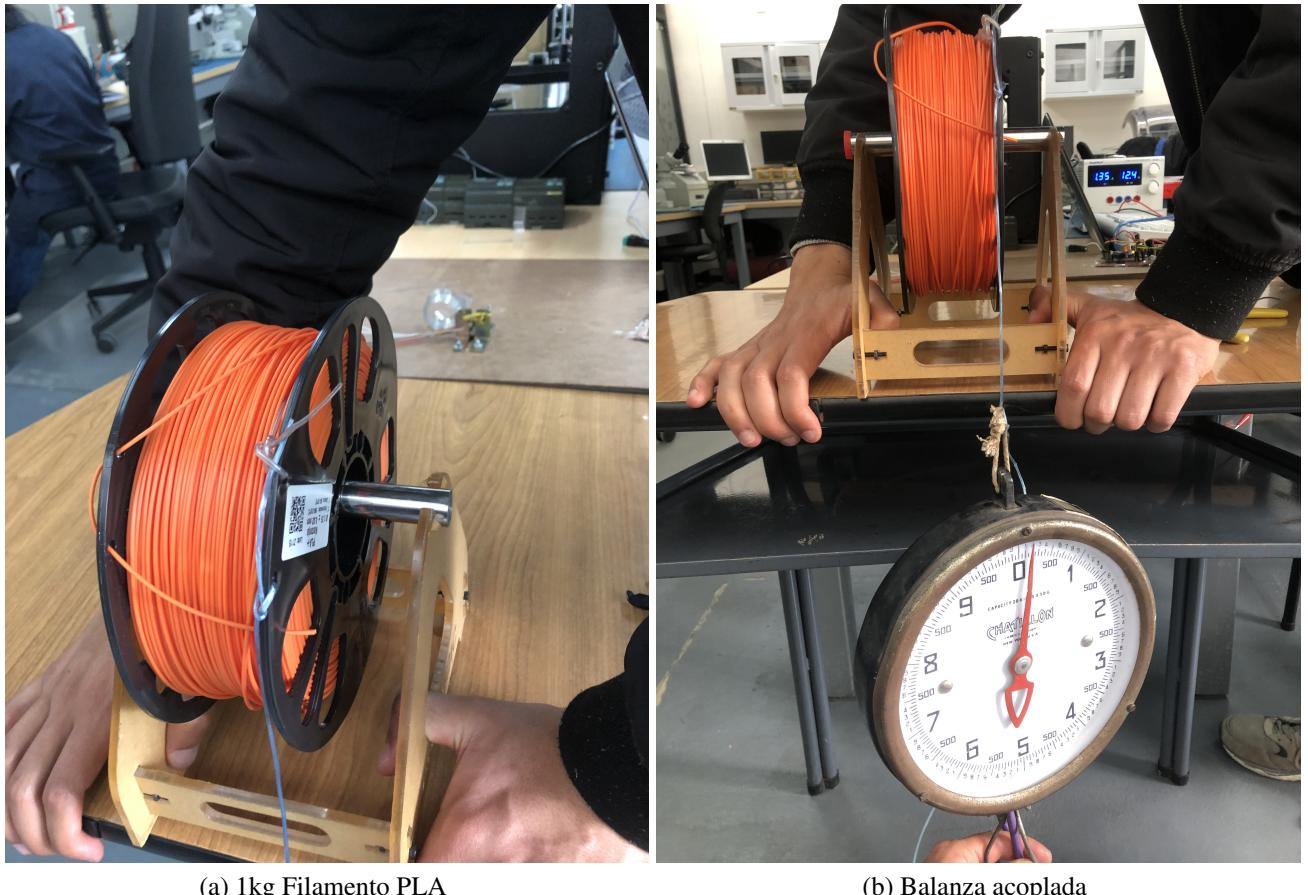


Figura 70: Montaje Experimental para medición rápida de torque

Posteriormente y dada una temperatura estable y óptima del extrusor se introducen pesas en una balanza previamente sujetada al carrete para medir la masa que logra iniciar el proceso de extrusión. Esta masa se usa para calcular el torque del motor, la cual fue de 5.4kg, de manera que se tiene:

$$m_{Total} = m_b + 5,4kg = 6,582kg$$

Siendo m_b la masa de la balanza en su conjunto, la cual es de 1.182kg. De este modo, la fuerza requerida para iniciar el proceso de extrusión es:

$$F = m_{Total} * g = 64,57N$$

De este modo:

$$T = F * r = 64,57N * 0,092m = 5,94Nm$$

Donde r es el radio desde donde se acopla el filamento con respecto al eje sobre el cual gira el carrete. Paralelamente, se halla la potencia que requerirá el motor, la cual es:

$$P_b = W_b * T$$

Informe Tecnico:

$$W_b = \frac{Vb}{r} = \frac{2,42mm/s}{92mm}$$

Donde V_b y W_b hacen referencia a la velocidad de una vez se empieza a extruir el filamento. Se tiene entonces:

$$P_b = 0,1556W$$

Teniendo en cuenta la potencia y el torque hallados previamente se selecciona el motor pittman 8223 con los siguientes parámetros:

Motor Data

Line No.	Parameter	Symbol	Units	8X12	8X22	8X13	8X23	8X14	8X24
1	Continuous Torque (Max.) ¹	T_C	oz-in (N-m)	1.3 (8.90 X 10 ⁻³)	1.6 (11.2 X 10 ⁻³)	1.5 (10.7 X 10 ⁻³)	2.0 (14.1 X 10 ⁻³)	2.1 (14.5 X 10 ⁻³)	2.6 (18.5 X 10 ⁻³)
2	Peak Torque (Stall) ²	T_{PK}	oz-in (N-m)	5.1 (35.7 X 10 ⁻³)	7.4 (52.0 X 10 ⁻³)	6.8 (47.7 X 10 ⁻³)	10.5 (74.2 X 10 ⁻³)	11.9 (84.0 X 10 ⁻³)	16.8 (118.6 X 10 ⁻³)
3	Motor Constant	K_M	oz-in/vW (N-m/vW)	0.93 (6.6 X 10 ⁻³)	1.12 (7.9 X 10 ⁻³)	1.05 (7.4 X 10 ⁻³)	1.30 (9.2 X 10 ⁻³)	1.22 (8.6 X 10 ⁻³)	1.49 (10.5 X 10 ⁻³)
4	No-Load Speed	S_{NL}	rpm (rad/s)	7729 (809)	7847 (822)	8238 (863)	8298 (869)	10648 (1113)	10158 (1064)
5	Friction Torque	T_F	oz-in (N-m)	0.35 (2.5 X 10 ⁻³)					
6	Rotor Inertia	J_M	oz-in-s ² (kg-m ²)	1.3 X 10 ⁻⁴ (9.18 X 10 ⁻⁷)	1.4 X 10 ⁻⁴ (9.89 X 10 ⁻⁷)	1.6 X 10 ⁻⁴ (1.13 X 10 ⁻⁶)	1.7 X 10 ⁻⁴ (1.20 X 10 ⁻⁶)	2.2 X 10 ⁻⁴ (1.55 X 10 ⁻⁶)	2.3 X 10 ⁻⁴ (1.62 X 10 ⁻⁶)
7	Electrical Time Constant	τ_E	ms	0.50	0.52	0.48	0.55	0.54	0.54
8	Mechanical Time Constant	τ_M	ms	21.5	15.6	21.0	14.1	21.0	14.7
9	Viscous Damping—Infinite Source Impedance	D	oz-in/krpm (N-m/(rad/s))	0.0087 (5.87 X 10 ⁻⁷)	0.0153 (1.03 X 10 ⁻⁶)	0.0104 (7.01 X 10 ⁻⁷)	0.0176 (1.19 X 10 ⁻⁶)	0.0147 (9.91 X 10 ⁻⁷)	0.0202 (1.36 X 10 ⁻⁶)
10	Viscous Damping—Zero Source Impedance	K_D	oz-in/krpm (N-m/(rad/s))	0.64 (4.32 X 10 ⁻⁵)	0.92 (6.20 X 10 ⁻⁵)	0.81 (5.46 X 10 ⁻⁵)	1.25 (8.42 X 10 ⁻⁵)	1.10 (7.42 X 10 ⁻⁵)	1.63 (1.10 X 10 ⁻⁴)
11	Maximum Winding Temperature	θ_{MAX}	°F (°C)	311 (155)	311 (155)	311 (155)	311 (155)	311 (155)	311 (155)
12	Thermal Impedance	R_{TH}	°F/watt °C/watt	75.9 (24.4)	75.9 (24.4)	72.9 (22.7)	72.9 (22.7)	70.52 (21.4)	70.52 (21.4)
13	Thermal Time Constant	τ_{TH}	min	7.75	7.75	9.00	9.00	10.70	10.70
14	Motor Weight	W_M	oz (gm)	4.49 (127.3)	4.69 (133.0)	4.86 (137.8)	5.05 (143.2)	5.62 (159.3)	5.81 (164.7)
15	Motor Length, 82XX	L_1	in max (mm max)	2.070 (52.6)	2.070 (52.6)	2.195 (54.61)	2.195 (54.61)	2.445 (62.1)	2.445 (62.1)
16	Motor Length, 83XX/84XX	L_1	in max (mm max)	2.007 (51)	2.007 (51)	2.132 (54.2)	2.132 (54.2)	2.382 (60.5)	2.382 (60.5)

Figura 71: Datasheet de motor Pittman 8000 series

Como se aprecia, este motor tiene un torque pico mucho mayor al necesitado y se tiene una gran potencia. Vale la pena aclarar que se asume que el torque calculado es un torque pico debido a que se busca el peor de los casos posibles en el momento de calcularlo. Otro aspecto fundamental en la selección del motor es el tema de la relación de inercia. Con el objeto de poder hacer un buen control se busca que esta sea menor a 10, lo cual se logra gracias a la relación de transmisión del motor, la cual es de 297.6:1. Esto se verifica de la siguiente manera.

7.3.2. Diseño de soportes

Para el diseño de los soportes se realizó las respectiva estática para determinar a qué fuerzas está sometido el soporte a diseñar. Para esto se planteo un bloque inicial y por medio de optimización topológica se visualiza la geometría requerida. Claramente antes de realizar la geometría se plantea un material a utilizar.

A continuación vemos la estática donde el D.C.L es

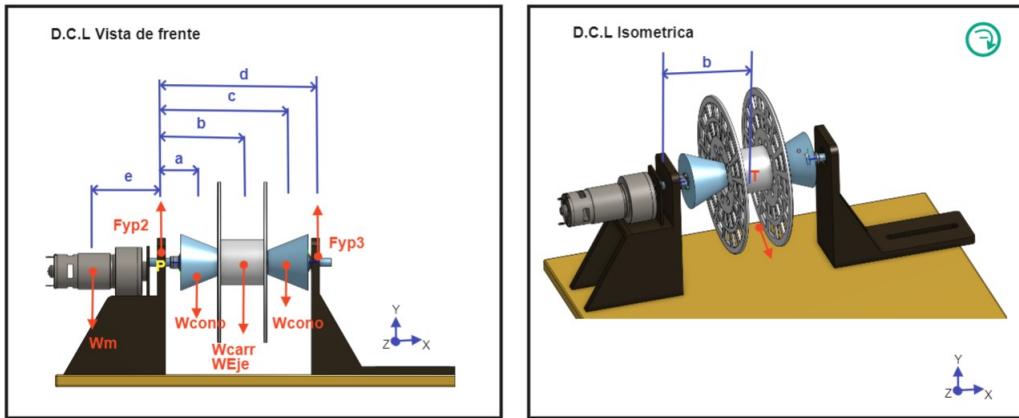


Figura 72: D.C.L

Donde se realiza sumatoria de fuerzas en y y la sumatoria de momentos en el punto P en el eje Z. Para el análisis estático se considera que la tensión sería máxima por tanto, perpendicular al eje Y. También se considera despreciable el peso del eje y accesorios dado que se consideran en el peso del carrete.

$$\sum F_y = -W_m - 2 * W_{cono} - W_{carr} - W_{eje} + F_{yp2} + F_{yp3} = 0$$

$$\sum M_{Pejez} = -aW_{cono} - b(W_{carr} + W_{eje}) - cW_{cono} + eW_m + dF_{yp3} = 0$$

donde, por medio de estas dos ecuaciones encontramos F_{yp3} y F_{yp2} . Posteriormente, trasladamos todas las fuerzas y momentos a P incluyendo la el momento generado por la tensión y se prosigue a realizar la optimización topológica.

El bloque inicial de referencia es el siguiente

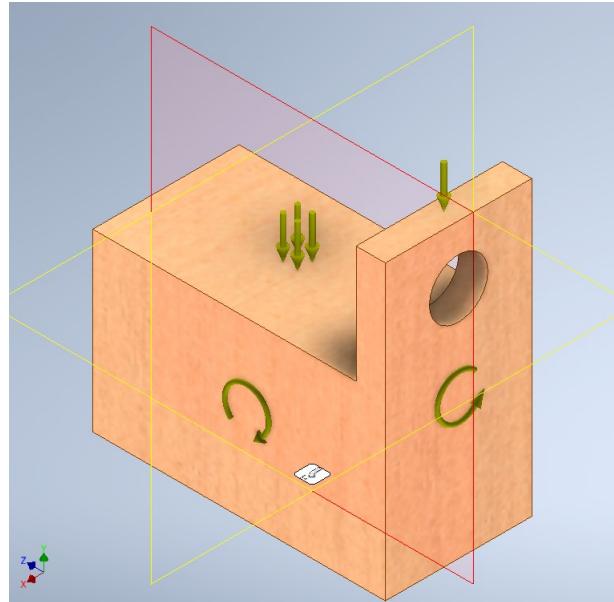


Figura 73: Optimización topológica

Se decide utilizar madera estructural de triplex de pino dado a la disponibilidad tecnológica que se cuenta, el presupuesto planteado para la máquina, uso y propósito de la máquina como una versión

Informe Técnico:

.1. Respecto a la estática y consideraciones ya mencionadas e obtiene la siguiente optimización topológica:

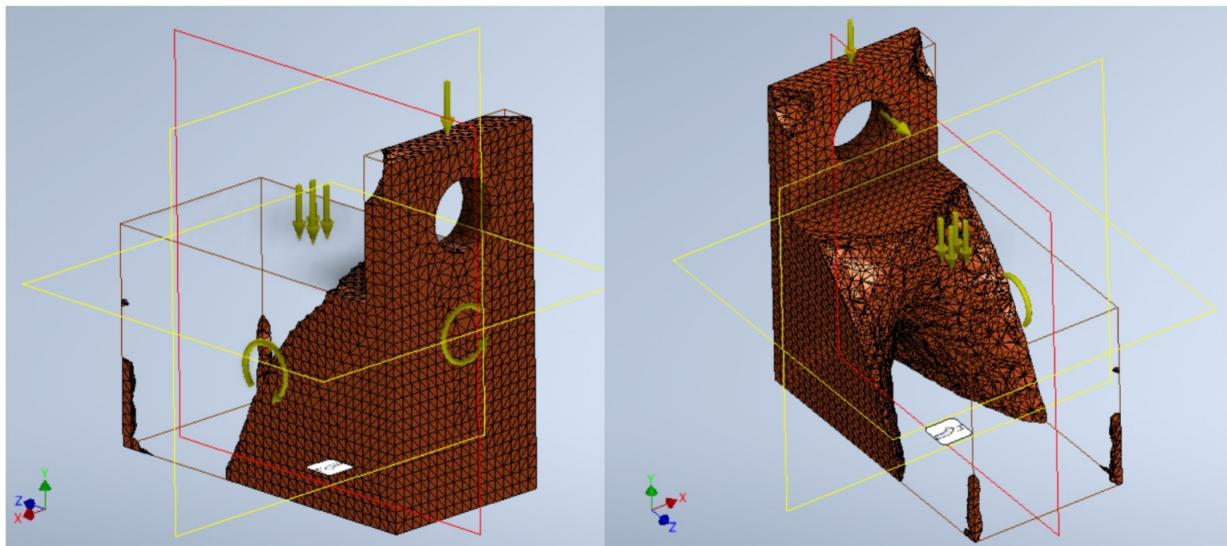


Figura 74: Optimización topológica

Como se ven en la figura ciertos planos de referencia son planos que no se puso como material por que se sabe que por diseño y manufactura ya se van a implementar. Aunque, se encuentra la opción de conservar ciertas regiones se busco visualizar la sección de intersección dado a la magnitud del momento y por tanto, la zona crítica.

Respecto a la optimización se toma medidas de referencia para realizar el modelado respectivo pensando en la manufactura del mismo. Los soportes diseñados y modelados son:

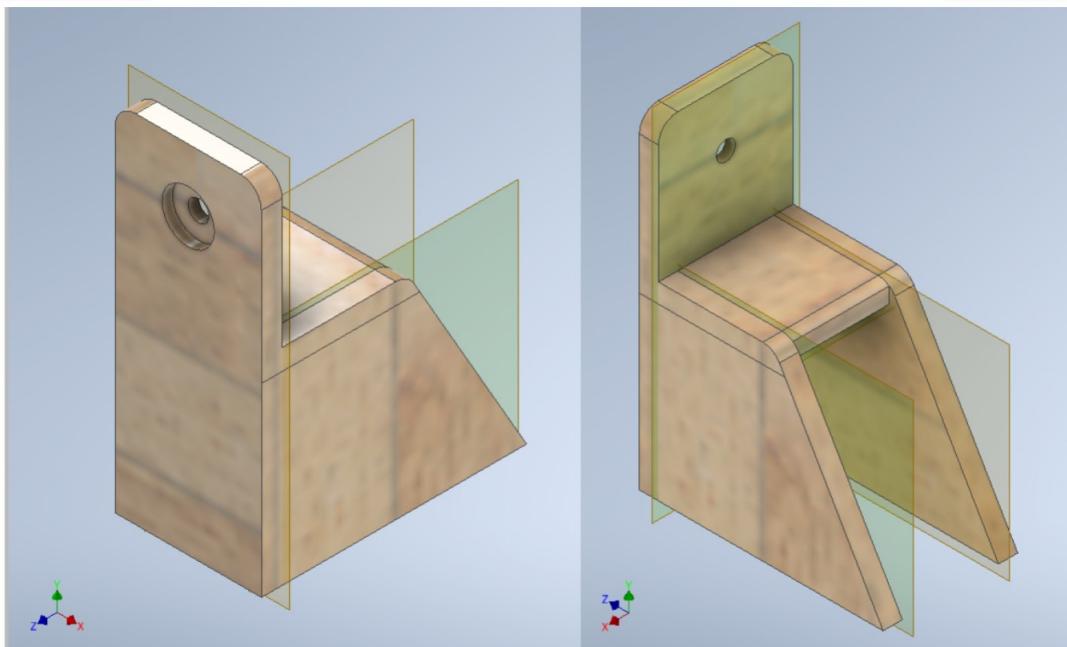


Figura 75: Soportes diseñados. Soporte 1

Informe Técnico:

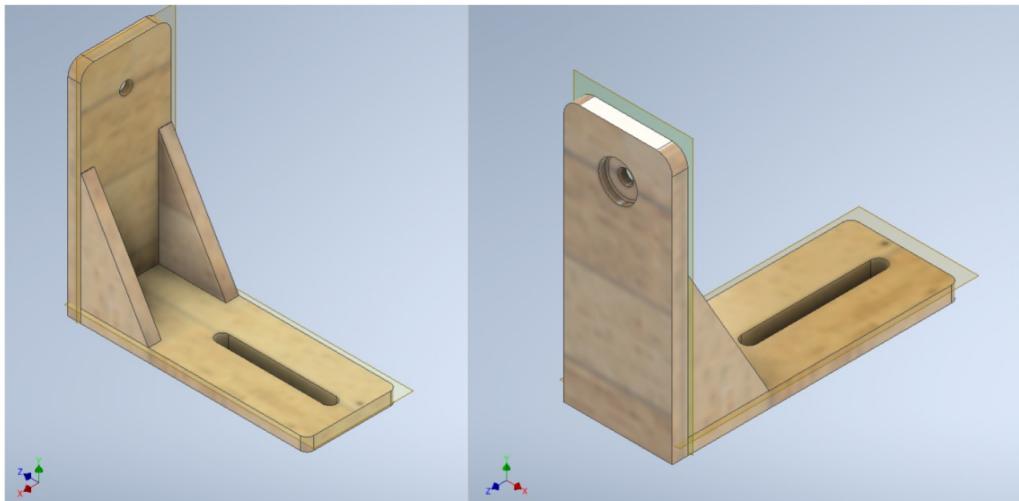


Figura 76: Soportes diseñados.Soporte 2

Para la verificación de soportes se realiza la simulación por elementos finitos con las propiedades mecánicas de Autodesk Inventor professional 2020 madera natural dado que si pasa para este material pasa para el triplex de pino. Se realiza la simulación con la estática calculada y con las restricciones de fijación o contorno respecto a la planeación de la manufactura de estos.

Factor de seguridad

Encontramos un factor de seguridad de 7.21 mínimo aunque analizando la simulación es mucho mayor dado que la fuerza se modeló sobre un costado pero en la vida real es distribuida sobre el área de contacto del rodamiento.

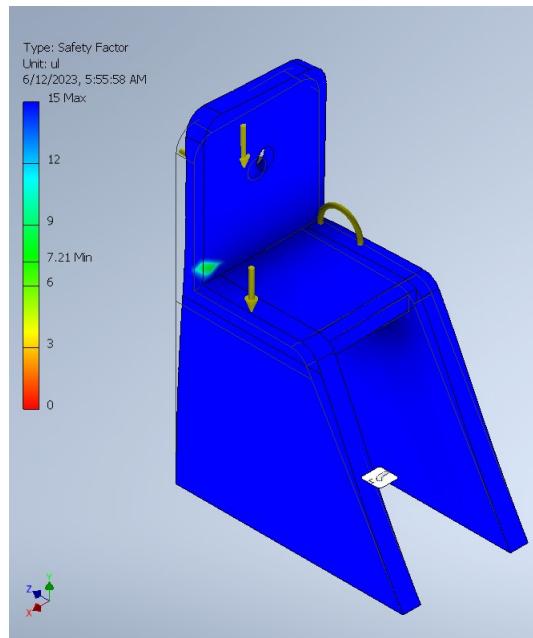


Figura 77: Factor de seguridad soporte 1

Desplazamientos

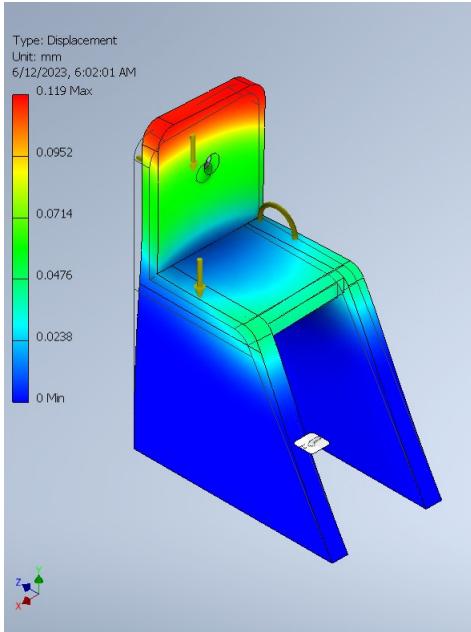


Figura 78: Factor de seguridad soporte 1

Analizando los desplazamientos no supera los 0.2 mm y no muestra algún riesgo mecánico al diseño realizado.

Esfuerzo Von Misses

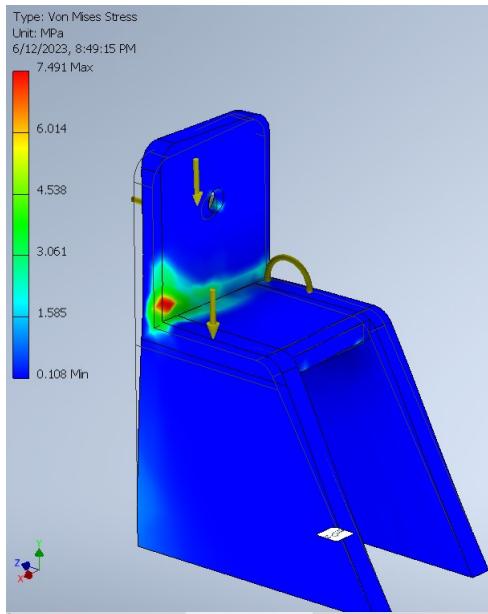


Figura 79: Esfuerzo Von Misses soporte 1

Se realiza la mismo análisis y se considera que el esfuerzo va ser menor dado a la distribución de la carga

7.3.3. Conos

Dado que se diseña para usar la máquina para carretes con diámetros internos de 3 cm a 7 cm se realiza un cono con esas circunferencias de extremos. Dado a que se requiere una fricción alta dado

a la criticidad de esta pieza por posible riesgo de deslizamiento y por consiguiente para la máquina se realiza el análisis estático en base de encontrar el ancho tal que el coeficiente sea 0.5 netamente de geometría. A continuación se mostrara el paso a paso para llegar a la dimensión.

Para realizar los cálculos se presenta el D.C.L considerado para el cono.

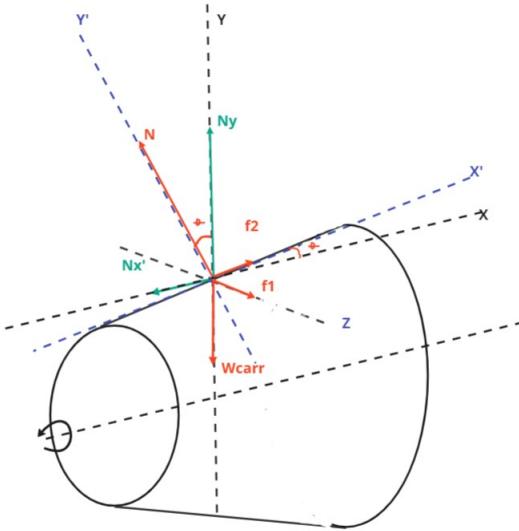


Figura 80: D.C.L cono

Donde

$$\sum F_x = -\sin \theta * N + f2 * \cos \theta = 0$$

despejando

$$f2 = \tan \theta * N \text{ donde } \tan \theta = \mu$$

$$\mu = \tan \theta = 0,5$$

$$\tanh 0,5 = \theta = 26,5650$$

7.3.4. Control de velocidad de extrusión

Las condiciones de operación del motor no son constantes a lo largo del proceso debido a diversos factores externos. Por ejemplo, variaciones de la cantidad de material que entra a la etapa de extrusión produce variaciones en la fuerza que debe aplicar para que se forme el filamento y sea enrollado en el carrete. Ocurre de la misma manera si la temperatura en el extrusor se sale de su valor nominal, ya que esto afecta la fluidez del material a través de la boquilla. Por otro lado, conforme aumenta la cantidad de filamento enrollado en el carrete, se incrementa su inercia, exigiendo un mayor torque al motor para mantener el movimiento. Las condiciones de operación cambiantes resultan en que la velocidad y torque del motor varíen durante el proceso, afectando la velocidad de extrusión.

Sin embargo, como se menciona en la sección ??, una velocidad de extrusión constante es fundamental para obtener un filamento consistente y de buena calidad consistente. Por tanto, es necesario diseñar e implementar un sistema de control que regule la velocidad en un valor de referencia sin importar las condiciones de operación.

7.3.5. Esquema de control de velocidad

En la figura 81 se propone el esquema de control de velocidad del motor. El sistema de control calcula el error entre la velocidad de referencia y la sensada. Luego, aplica un voltaje al motor para corregir la desviación. El motor gira a cierta velocidad dependiendo del voltaje aplicado. Esta velocidad se transfiere finalmente al mecanismo por medio del sistema de transmisión de potencia mecánica (STPM). El mecanismo estaría compuesto por el carrete y el eje sobre el que gira.

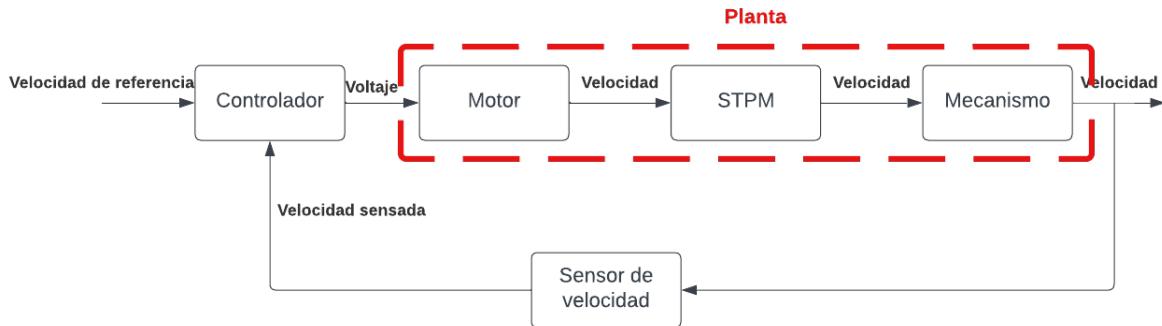


Figura 81: Diagrama de bloques de control de velocidad

7.3.6. Modelamiento por función de transferencia

Para realizar el diseño del controlador, es requerido caracterizar la planta que se desea sea controlada por medio de una función de transferencia. Ya que el objetivo de control es la velocidad de extrusión producida por el mecanismo de enrollado, la planta seleccionada corresponde al conjunto del motor, el STPM, y el mecanismo. En la figura 81 se muestra en rojo los bloques que conforman la planta. La función de transferencia de la planta, que define la relación entre el voltaje de entrada al motor V y la velocidad de extrusión producida por el mecanismo v_{ext} , se expresa en la ecuación 1.

$$G(s) = \frac{v_{ext}}{V} = G_m G_{STPM} G_{mec} \quad (1)$$

El motor es modelado por la función de transferencia de primer orden de motores DC, la cual es ampliamente conocida en la literatura [10] y se describe en la ecuación 2.

$$G_m(s) = \frac{\omega}{V} = \frac{K_t}{R_a(b_{eq} + J_{eq}s) + K_t K_b} \quad (2)$$

Cabe aclarar que los términos b_{eq} y J_{eq} corresponden a la fricción viscosa e inercia, respectivamente, que se ven reflejadas en el motor. Es decir, estos términos tienen en cuenta la inercia y fricción del motor y el mecanismo. Esto se observa en la ecuación 4 y 3.

$$b_{eq} = b_m + \frac{b_{mec}}{N^2} \quad (3)$$

$$J_{eq} = J_m + \frac{J_{mec}}{N^2} \quad (4)$$

Asimismo, la simplificación de primer orden asume que el comportamiento eléctrico del motor es más rápido que el comportamiento dinámico, el cual es el caso del motor seleccionado como se vera mas

adelante.

El STMP realiza una reducción de la velocidad del motor según la relación de transmisión N.

$$G_{STPM}(s) = \frac{\omega_{entrada}}{\omega_{salida}} = N \quad (5)$$

Finalmente, la velocidad de extrusión v_{ext} será la velocidad tangencial calculada en el punto de contacto entre el carrete y el filamento. Así, la función de transferencia completa de la planta se muestra en la ecuación 67.

$$G(s) = \frac{v_{ext}}{V} = \frac{K_t R_c}{[R_a(b_{eq} + J_{eq}s) + K_t K_b]N} \quad (6)$$

Siendo R_c el radio del carrete.

A pesar de lo anterior, se decide realizar el control directamente sobre la velocidad angular de la polea. La función de transferencia en este caso sería la de la ecuación 7.

$$G(s) = \frac{\omega_{polea}}{V} = \frac{K_t}{[R_a(b_{eq} + J_{eq}s) + K_t K_b]N} \quad (7)$$

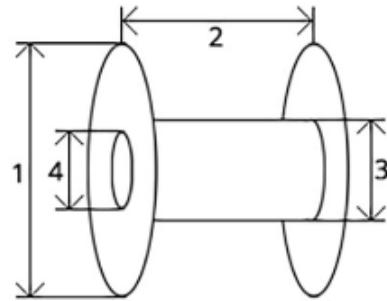
Como se maneja la referencia en términos de la velocidad lineal de extrusión, es necesario transformar este valor para calcular el error E en términos de velocidades angulares. Esto se desarrolla en la ecuación 8.

$$E = v_{ref}/R_{polea} - \omega_{medida} \quad (8)$$

7.3.7. Obtención de parámetros de función de transferencia

Los parámetros correspondientes al motor y la transmisión se obtienen de la hoja de datos [11].

La inercia del mecanismo se calcula a partir de las dimensiones del carrete asumiéndolo como una serie de cilindros huecos. Inicialmente, ya que no se conocía el carrete final, se parte de unas dimensiones genéricas ilustradas en la figura 82, de la densidad promedio de plástico de $1,38g/cm^3$ y un espesor de las tapas exteriores de 0.35 cm.



Measurement	Up to 1kg Spool
1) Flange Diameter	202mm / 7.93"
2) Traverse or Inside Width	60mm / 1.75"
3) Barrel (Core) Outer Diameter	95mm / 3.75"
4) Arbor Hole or Center inside Diameter	54mm / 2.12"
Spool Weight (empty)	266g / 9.3 oz

Figura 82: Dimensiones generales de carrete de un kilogramo. Tomado de[12]

La fricción viscosa del mecanismo no fue determinada pues se considera despreciable debido a la relación de transmisión del motor.

7.3.8. Diseño de controlador PID

Una vez obtenida la función de transferencia del sistema, se diseña un controlador PID para controlar la velocidad del motor. Este proceso de diseño se realizó con ayuda de la herramienta MATLAB®, específicamente el modulo PID Tuner. Se busca que el controlador alcance la referencia en un tiempo menor a 1 segundo y que tenga un comportamiento balanceado entre rechazo a perturbaciones y seguimiento a referencia.

7.3.9. Diseño de algoritmo de control PID

El algoritmo general de control se ilustra en la figura 83.

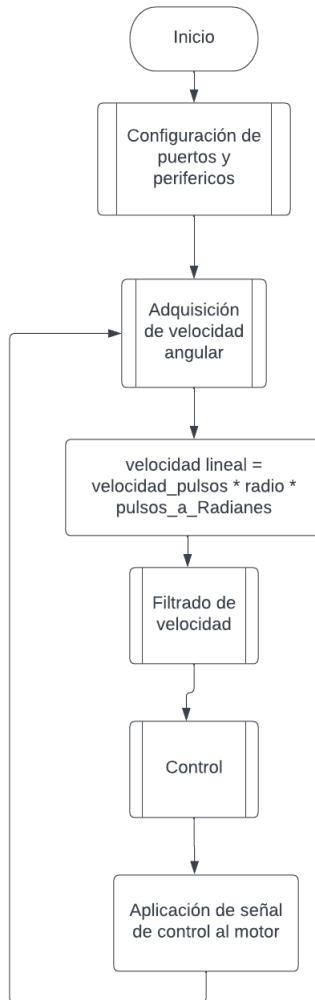


Figura 83: Algoritmo general de control

El sensado de velocidad se realiza de manera discreta en cada pulso del sensor. El pulso activa una interrupción que realiza el algoritmo de sensado de la figura 84.

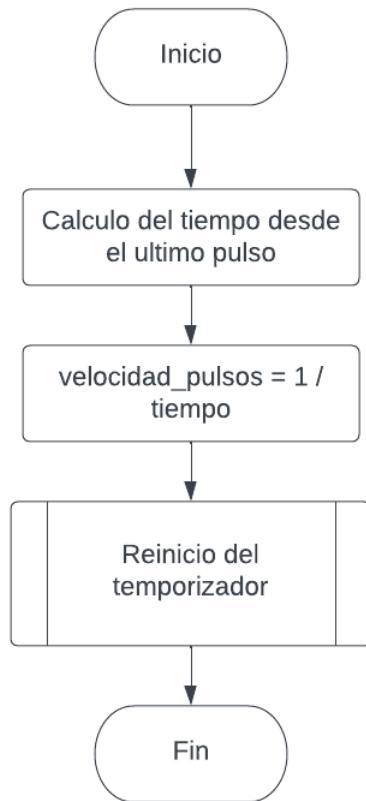


Figura 84: Algoritmo de sensado

Esta técnica de sensado discreto asegura que el calculo de velocidad dependa únicamente del tiempo y no de la cantidad de pulsos del encoder, los cuales pueden ser irregulares. Sin embargo, el calculo de una derivada numérica puede amplificar el ruido de la medición. Por tanto, es necesario introducir un filtro que disminuya el ruido de la señal. En la figura 83 se observa el filtrado posterior al calculo de la velocidad lineal, y el algoritmo de filtrado se detalla en la figura 85. Este algoritmo se encarga de promediar cierto numero de lecturas pasadas, de forma que los valores extraordinarios de la señal sean atenuados.

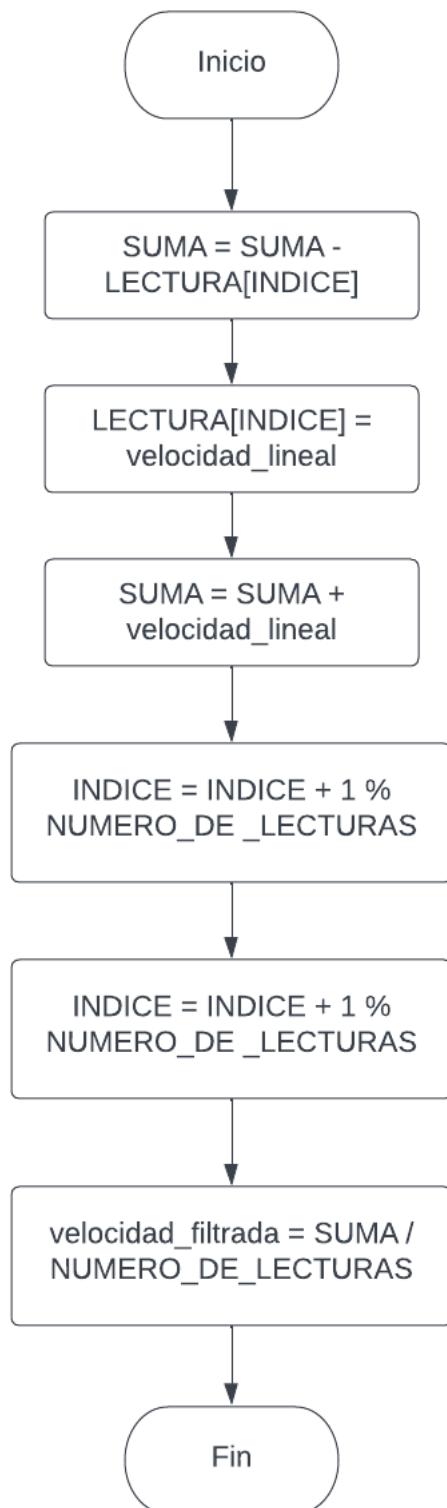


Figura 85: Algoritmo de filtrado

Informe Técnico:

Por último, en la figura 86 se detalla el algoritmo de control. A partir del error se calcula la señal de control que irá al motor. Esta señal de control es limitada a los límites de energía que utiliza el motor. Asimismo, se realiza un anti wind-up, de forma que la parte integral del control no acumule error cuando se satura la señal.

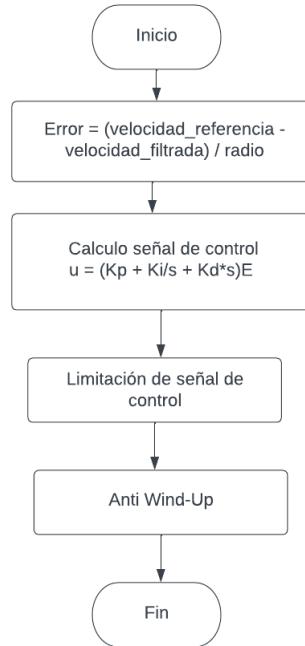


Figura 86: Algoritmo de control

7.3.10. Diseño de polea auxiliar

Inicialmente, se diseño la polea mostrada en la figura 87.

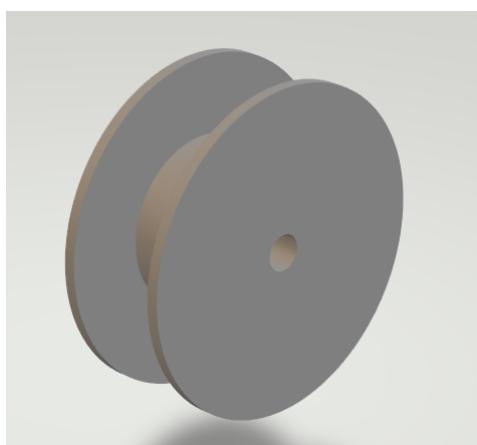


Figura 87: Polea diseñada inicialmente

Las dimensiones de esta polea fueron basadas en poleas comerciales de aproximadamente 18 milímetros. No obstante, se aumentó el ancho de la polea con el objetivo de ofrecer más espacio al filamento para moverse lateralmente y evitar cargas axiales considerables.

La polea fue manufacturada con impresión 3D y se recubrió con material de caucho para aumentar la fricción con el filamento.

Sin embargo, el pegado del caucho a la polea creo desniveles que generaban deslizamientos del filamento. El adhesivo utilizado también deslizaba con el filamento.

El acople de la polea con el eje se dificulto de igual manera por la debilidad del plástico. Las dificultades presentadas con este diseño conllevo a proponer otra polea. En este caso, se opto por el uso de rodillos utilizados en impresoras, los cuales son completamente hechos en cuero. La figura 88 muestra el modelo 3D del rodillo conseguido. Este rodillo posee una pequeña ranura que mantiene el filamento deslizando en esta región. Además, posee un agujero que entra a presión al eje.



Figura 88: Rodillo de cuero

7.3.11. Diseño de sensado de velocidad

Para el sensado de la velocidad angular del eje, se selecciono un encoder óptico de velocidad HC020K, el cual se observa en la figura 89.



Figura 89: Encoder Optico HC020K

En un principio, se hizo uso de la rueda de 20 divisiones que comúnmente viene incluida en el sensor. Sin embargo, durante pruebas del sistema de control, se encontró que este numero de divisiones ofrece una resolución muy baja para el sensado y para realizar un control fluido.

Por tanto, se procede a diseñar una rueda con un mayor numero de divisiones, la cual se observa en la figura 90. El tamaño de las divisiones se mantiene con respecto a la rueda de 20 divisiones de modo

que se asegure que funcione con el encoder óptico. Sin embargo, es necesario aumentar el radio de la rueda de forma que no hayan zonas muy delgadas que no sean manufacturables.

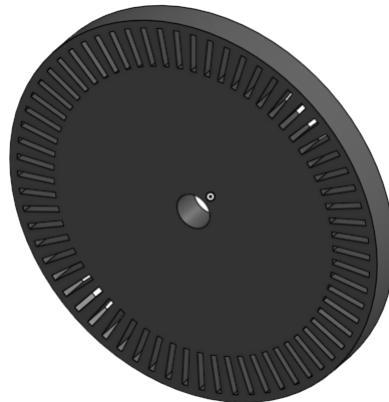


Figura 90: Rueda con 65 orificios

7.3.12. Diseño de soportes para modulo de medición de velocidad

El montaje de soporte para la polea auxiliar, el sensor HC020K y la rueda con divisiones se muestra en la figura 91. El rodillo y la rueda son acopladas a un eje que es soportado por dos rodamientos y soportes en sus extremos. El sensor se ubica cerca de la rueda con divisiones por medio de un soporte adicional.

La altura del a la que se encuentra el eje con respecto a la boquilla extrusora es la misma. De esta forma, el filamento se inclina ligeramente al pasar por el rodillo y aumentan el área de contacto.

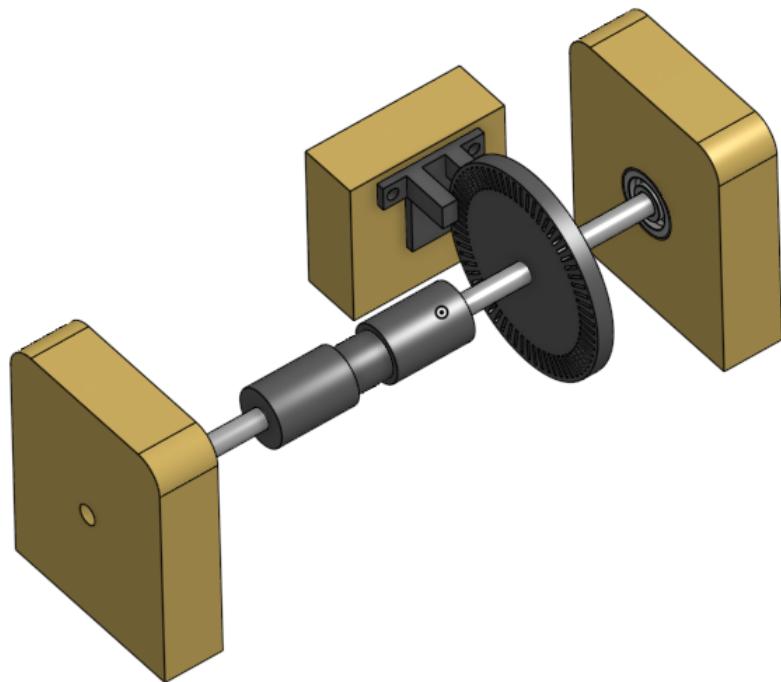


Figura 91: Ensamble de modulo de medición de velocidad

7.4. Interfaz Humano-Máquina

7.4.1. Distribución de la LCD

Para el diseño de interfaz, se parte principalmente de las variables que se desean mostrar, las cuales son: temperatura de extrusión, velocidad de enrollado y cantidad de producto producido. Para ello, se selecciona el display 1602A como el LCD a utilizar, se divide el espacio disponible en dicho dispositivo en tres secciones principales: Variable visualizada, magnitud actual y magnitud objetivo. La distribución en la LCD puede apreciarse en la figura 92.

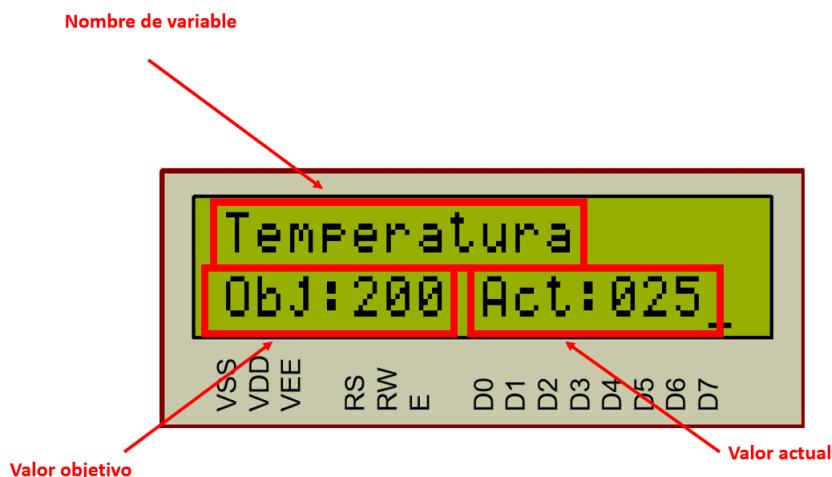


Figura 92: Distribución de la LCD

7.4.2. Botones disponibles

Se propone el uso de tres botones o pulsadores para la visualización y el establecimiento de las variables de proceso, estos botones son:

- Modo: Al pulsar este botón se cambia la visualización de la variable de proceso. La secuencia en que se muestran es: Temperatura, Velocidad y Material producido. Adicionalmente al visualizar cada variable, el operario tiene la posibilidad de modificar el valor establecido para dicha variable.
- Subir/Bajar: Al pulsar estos botones el operario tendrá la posibilidad de modificar el valor objetivo de la variable que se encuentra visualizando en el momento. La magnitud en que cambia es específica de cada variable, siendo para temperatura 1°C y para velocidad 0.1 cm/s.

Para cumplir con esta función se seleccionan pulsadores electrónicos convencionales.

7.4.3. Alertas visuales

Para la implementación de las alertas visuales se propone la utilización de un código de colores sencillo, en el cual se utilizan dos testigos de color verde y rojo, donde el verde se encuentra activado siempre y cuando la máquina se encuentre funcionando correctamente y el rojo cuando haya algún fallo de índole de control de variable de proceso. Para esto se seleccionan LEDs de los colores antes especificados.

7.4.4. Interruptor de encendido y parada de emergencia

Para energizar y desenergizar completamente la máquina, se selecciona un interruptor de dos posiciones luminoso el cual conecta y desconecta completamente el suministro de energía para la máquina completa, de manera que es el interruptor maestro del sistema. Adicional a esto, se implementa una redundancia que es la parada de emergencia, la cual, al igual que con el interruptor maestro, puede cortar el suministro de energía completo del sistema. Estos elementos deben ser de fácil acceso para el operario.

7.4.5. Distribución de la HMI

En la figura 93 se puede apreciar como se espera que se implemente la HMI de manera física. Se busca que la HMI sea visualmente atractiva e intuitiva para el operario.

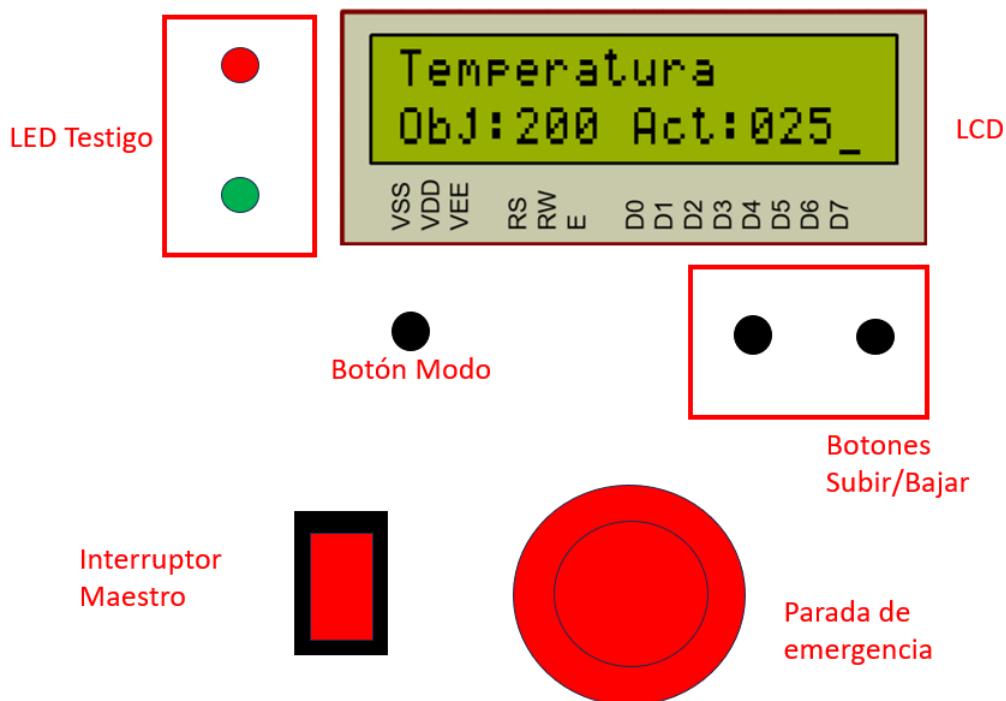


Figura 93: Distribución de la HMI

7.4.6. Diseño de software de HMI

Para la implementación de la HMI, el algoritmo que se programa para el microcontrolador PIC 18F4550 es el de la figura 94:

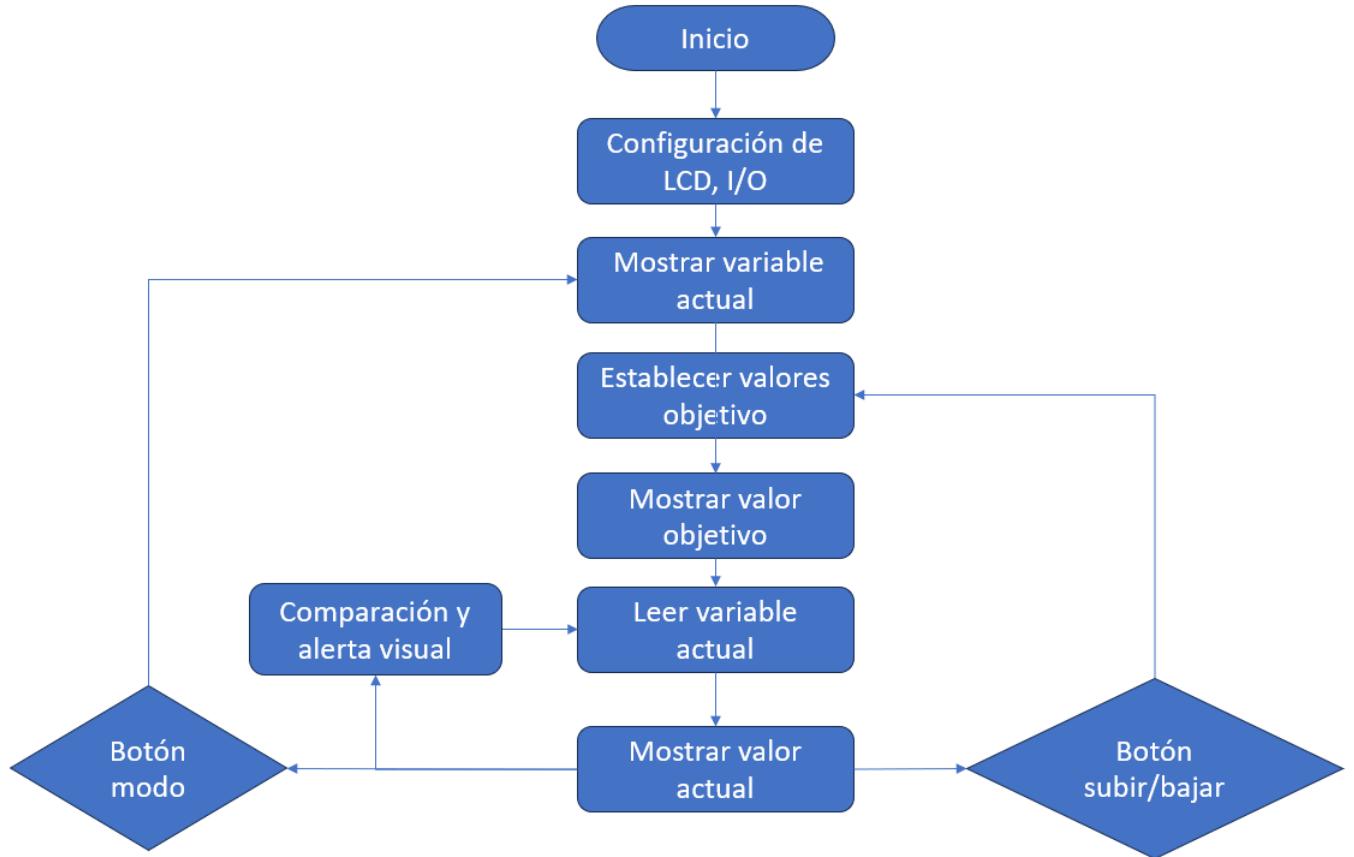


Figura 94: Algoritmo de la HMI

En este, una vez se ha hecho la inicialización y configuraciones iniciales de la LCD y entradas y salidas del microcontrolador, se entra en un bucle infinito en el que únicamente se lee la variable objetivo mediante la sensórica necesaria y se actualiza en el LCD, al haber eventos de interrupción provocados por el accionamiento de botones, se modifica la variable actual cuando es el botón de modo o se modifica el valor objetivo de la variable actual en el caso en el que se pulsa el botón de Subir o Bajar.

7.5. Diseño electrónico

Para el diseño electrónico, se parte de todas las conexiones necesarias para implementar los algoritmos anteriormente

8. Implementación

8.1. Etapa de corte

8.1.1. Implementación final del sistema con ajuste de altura variable

como se vio en la sección anterior se estableció la geometría de corte para el sistema y ahora para implementar la variación de altura lo que se va hacer es variar por medio de guías la mandíbula de corte en función de la plataforma de corte de esta manera si se requiere un corte de menor o mayor grosor solamente se debe ajustar los tornillos externos de la estructura y se obtendrá una geometría de

Informe Técnico:

corte especifica a continuación se muestra el modelo del sistema donde se puede identificar las guías que sostienen a mandíbula y permiten un movimiento relativo entre las mandíbulas y la plataforma de corte:

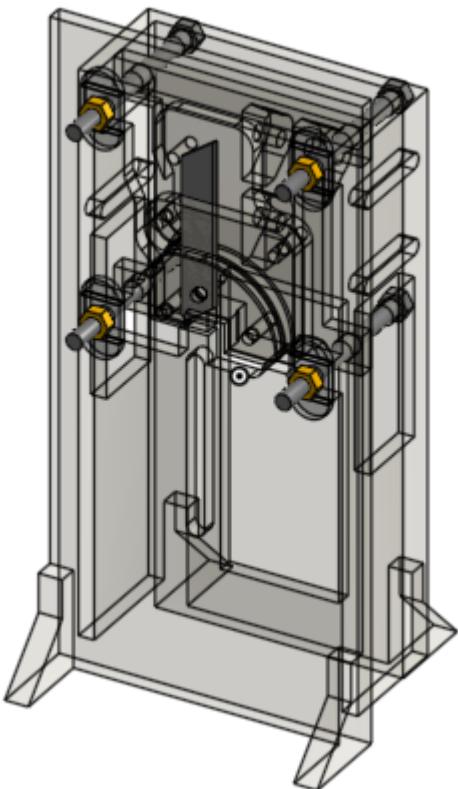


Figura 95: modelado final etapa de corte

Posterior a esto se manufacturo el sistema de corte obteniendo como resultado el siguiente subconjunto de la maquina :



Figura 96: modelado final etapa de corte

8.2. Etapa de extrusión

8.3. Etapa de enrollado

8.3.1. Implementación de modulo de medición de velocidad

El rodillo que trabaja como polea auxiliar fue extraído de una impresora y cortado por los extremos. La rueda con divisiones es manufacturada con impresión 3D en PLA. Los soportes son fabricados por carpintería en madera triplex de pino y son fijados a la bancada con tornillos auto-rosantes. EL modulo fue ubicado paralelo al carrete y alineando la polea con el centro del carrete.

8.3.2. Caracterización en función de transferencia

Se obtienen los parámetros de la función de transferencia mostrados en la tabla 2.

Parámetro	Descripción	Valor	Unidades
J_m	Inercia Motor	1.20e-6	$kg \cdot m^2$
J_{mec}	Inercia Mecanismo	0.0116	$kg \cdot m^2$
J_{eq}	Inercia Equivalente	1.33e-6	$kg \cdot m^2$
K_t	Constante de torque	27.4e-3	Nm/A
K_b	Constante contra-electromotriz	26.4e-3	$V/rad/s$
R_a	Resistencia	8.24	Ω
b_m	Fricción viscosa Motor	1.10e-6	$Nm/rad/s$
N	Relación de transmisión	297.6	unitless
R_c	Radio de carrete	5	cm
R_{polea}	Radio de polea	0.597	cm
τ_E	Constante de tiempo mecánica del motor	14.1	ms
τ_M	Constante de tiempo eléctrica del motor	0.55	ms

Cuadro 2: Parámetros de función de transferencia

Se observa que se cumple la suposición de que la parte eléctrica del motor es mucho más rápida que la mecánica.

Con estos parámetros, se calcula la función de transferencia de la ecuación.

$$G(s) = \frac{\omega_{polea}}{V} = \frac{0,0274}{0,003264s + 8,006} \quad (9)$$

8.3.3. Implementación de algoritmo de control

Después de realizar iteraciones sobre las constantes del PID, se llegó a los siguientes valores:

- $K_p = 5,253$
- $K_i = 3,838$
- $K_d = 0,0971$

Asimismo, se añadió un filtro para disminuir oscilaciones de la parte derivativa, cuyo valor es $N = 100$. La fórmula completa del PID se muestra en la ecuación 10.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{NK_d s}{s + N} \quad (10)$$

Se procede a implementar el controlador en un microcontrolador. Primeramente, se implementa en Arduino para desarrollar y probar el código rápidamente. Posteriormente, el código desarrollado se implementa en un PIC18F4550 en lenguaje C.

Una vez implementado, se mide y registra la respuesta del controlador a una referencia determinada. En las figuras 97 y 98 se observa la respuesta del controlador a una referencia de 1.6cm/s y 2.4 cm/s, respectivamente. En estas gráficas se observa que el tiempo de respuesta del controlador está entre 2 y 3 segundos y un sobrepico entre 10 y 20 %. Aunque estos valores son considerables respecto a los que inicialmente se habían planteado, se considera suficiente para la aplicación. Además, estas referencias se encuentran lejos del punto de equilibrio, por lo que se concluye que trabajar con velocidades alrededor de 1 cm/s producirá un mejor comportamiento.

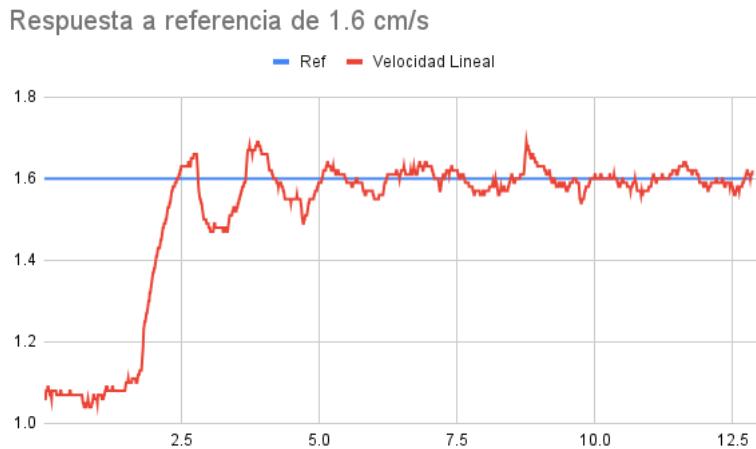


Figura 97: Respuesta de controlador PID a referencia de 1.6 cm/s

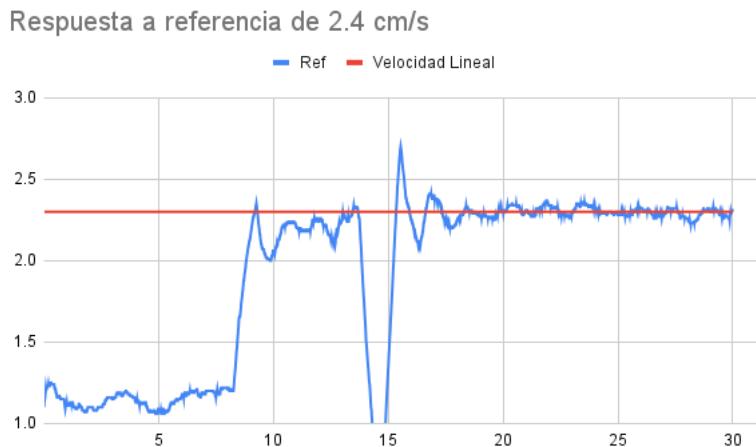


Figura 98: Respuesta de controlador PID a referencia de 2.4 cm/s

Por último, se encontró que existe un offset entre la referencia de velocidad lineal y la velocidad real.

8.4. Interfaz

8.5. Electrónica y cableado

9. Validación

9.0.1. Diametro del filamento

Se realizó la extrusión de 1 metro de PET de botella Coca Cola de 1.5 litros. Después de realizar varias pruebas para identificar los valores óptimos de temperatura y velocidad de extrusión, se obtuvo 1 metro de filamento de buena calidad. Este se muestra en la figura 99.

Se realizaron medidas en 20 puntos a lo largo del metro para verificar que el diámetro del filamento se encuentre en el rango de $1,75\text{mm} \pm 0,5\text{mm}$. En la tabla 3 se muestran los resultados de las mediciones.

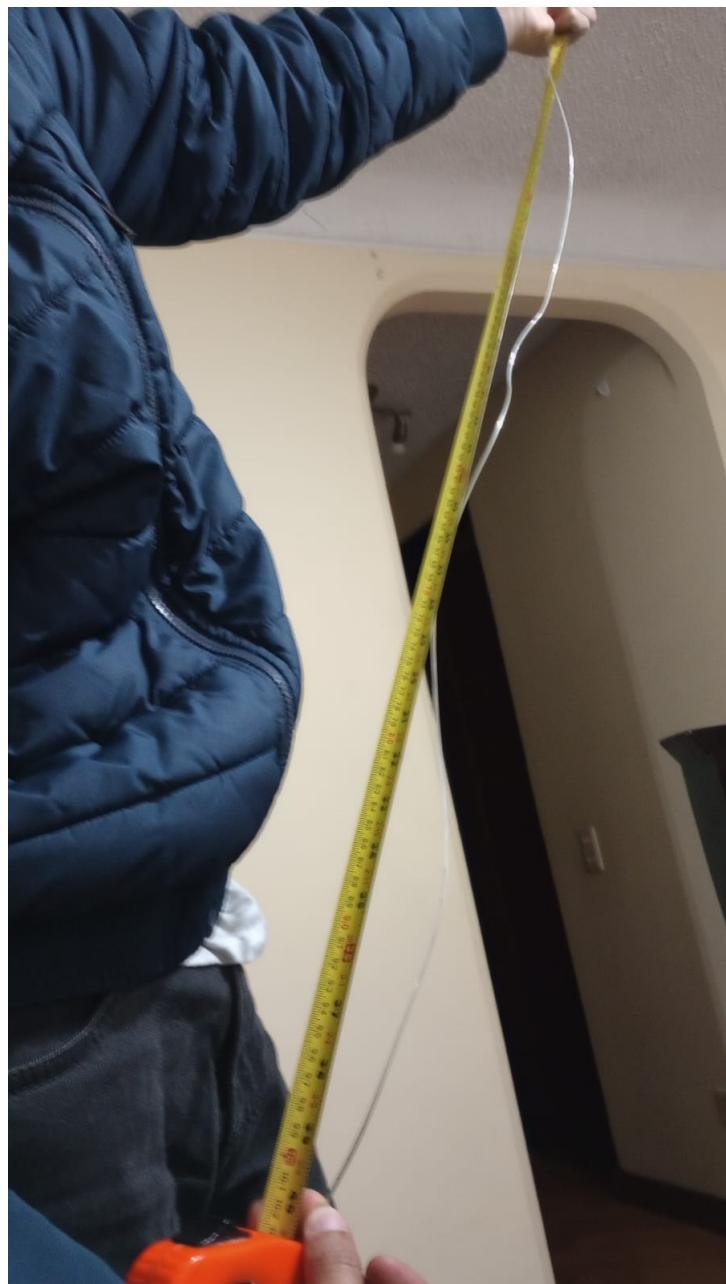


Figura 99: Metro de filamento

Distancia desde extremo (cm)	Diámetro(mm)
5	1.700
10	1.700
15	1.700
20	1.700
25	1.700
30	1.700
35	1.700
40	1.680
45	1.600
50	1.760
55	1.700
60	1.680
65	1.700
70	1.700
75	1.700
80	1.680
85	1.700
90	1.700
95	1.700
100	1.660

Cuadro 3: Diámetro de filamento PET de Coca Cola en diferentes puntos

Se observa que en promedio, el filamento es de 1.7 mm. Sin embargo, en algunos puntos del filamento, el diámetro está fuera de rango. Se puede justificar con algunas deficiencias en el control de movimiento, ya que tenía paradas momentáneas. Asimismo, la boquilla de extrusión es de 1.68 mm, lo que puede influir en que el filamento no alcance a llegar al diámetro deseado. También es posible atribuir el error a que no se calculó apropiadamente el ancho de tira a cortar para que en la extrusión hubiera suficiente cantidad de material para formar la totalidad del filamento. Se concluye que se requiere un mejor estudio de las condiciones en las que ocurre el proceso para controlarlo efectivamente.

9.0.2. Precisión de etapa de corte y ancho variable

Se cortó cada una de las botellas de acuerdo a la fórmula para obtener el flujo de densidad constante al pasar por la boquilla de extrusión (mantener constante la área transversal de la tira obtenida).

Posterior a esto se escogió un metro de tira de la longitud total de la tira obtenida y se midió el ancho cada 10 cm con un pie de rey.

Herramienta de medición: Pie de rey con definición de 0.02 mm.

Para obtener la precisión y exactitud del corte se asume una distribución normal. La exactitud se mide mediante el error respecto a la media estimada de esta distribución. La precisión de corte se mide mediante las 6 desviaciones estándar de cada serie de mediciones para cada botella. De manera que el 90 % de los cortes estén dentro de 2 desviaciones estándar de la media.

Se espera una exactitud de $\pm 0.5\text{mm}$ y una precisión de $\pm 0.1\text{mm}$. Se verifica que el intervalo dentro de 2 desviaciones estándar alrededor de la media esté dentro del rango buscado, $\pm 0.5\text{ mm}$ respecto al valor real.

Datos recolectados	OMI 1.7L	Cocacola 1.5L	Jugo de Naranja
Distancia desde extremo (cm)		Ancho (cm)	
0	1,060	0,8	1
10	1,080	0,716	1,1
20	1,090	0,802	0,901
30	1,074	0,81	1,05
40	1,070	0,82	1,02
50	1,016	0,804	0,91
60	1,074	0,8	0,802
70	1,064	0,75	0,802
80	1,070	0,8	1,05
90	1,068	0,8	1,029
100	1,078	0,804	1,1
110		0,81	1,048
120		0,75	1,021
130		0,76	1,03
140		0,81	1,004

Estadísticas de filamento	OMI 1.7L	Cocacola 1.5L	Jugo de Naranja
Desviación estándar (cm)	0,019	0,030	0,095
Media (cm)	1,068	0,789	0,991
Límite superior intervalo 90 % (cm)	1,106	0,849	1,180
Límite inferior intervalo 90 % (cm)	1,030	0,729	0,802
Ancho de intervalo (mm)	0,758	1,200	3,780
Espesor (mm)	0,310	0,360	0,360
Datos esperados			
Altura teórica (cm)	1,050	0,800	1,03
Límite superior teórico (cm)	1,110	0,860	1,090
Límite inferior teórico (cm)	1,060	0,740	0,970

El ancho de intervalo es 2 veces la desviación estándar de cada uno de las series de datos para cada botella. Al sumar y restar respecto al promedio de los datos, encontramos los límites de intervalo. Se observa que estos están dentro de los límites teóricos establecidos (los que son nuestro objetivo) para las 2 primeras botellas. Sin embargo, para la tercera botella, encontramos que ambos límites se salen de los límites teóricos establecidos.



Figura 100: Medición de la tira

9.0.3. Resistencia a la tracción y Modulo de Elasticidad

No se realizó un estudio sobre las propiedades mecánicas de una probeta fabricada con PET, de forma que pudiera ser comparada con resultados de otros estudios. A pesar de ello, se realizó un ensayo de tensión directamente sobre el filamento producido para identificar sus propiedades mecánicas. Los resultados se muestran en la tabla 4.

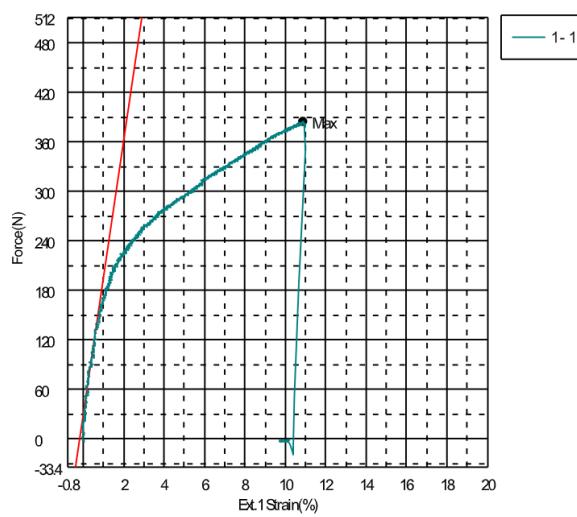


Figura 101: Gráfica Fuerza - deformación

Unidades	Fuerza _{max}	Desp _{max}	Estres _{max}
	N	mm	N/mm ²
1 - 1	385,453	5,41797	169,818
1 - 2	337,125	2,95313	148,526
1 - 3	349,563	4,78516	154,006
Media	357,38	4,38542	157,45
Desviación estándar	25,0945	1,28012	11,0559

Cuadro 4: Resultados de ensayo de tensión sobre filamento PET

Se concluye que la resistencia ultima a la tensión promedio de 157.45 N/mm².

9.0.4. Número de aperturas por metro de filamento

Se realizo una observación visual del filamento de la primera prueba y no se encuentran aperturas en el filamento.

9.0.5. Número de cortes por metro de filamento

Se realizo una observación visual del filamento de la primera prueba y no se encuentran cortes en el filamento.

9.0.6. Velocidad de extrusión

Durante las diversas pruebas realizadas con diferentes botellas y a diferentes temperaturas, se manejo velocidades entre 0.4 a 0.6 cm/s. Velocidades superiores a esta generaban aperturas en el filamento afectando su forma redonda. Por tanto, se concluye que no es posible cumplir con este requerimiento en el estado actual del proyecto.

9.0.7. Velocidad de corte

La validación consistió en hacer un ensayo de corte y medir el tiempo mientras se grababa el proceso. Se cortó una longitud de 310cm en 27 segundos, lo cual da como resultado una velocidad de corte de 11.48cm/s, lo cual cumple con el requerimiento de 5 cm/s.



Figura 102: Ensayo de corte de la botella

9.0.8. Acomodo en la etapa de corte

Para la validación de este requerimiento, se cronometro el tiempo requerido para acomodar una botella en la etapa de corte. Se asume que se cuenta con una botella que ya tiene un corte en la base. Se obtuvo un tiempo de 4 segundos. El experimento se puede ver en el siguiente link: <https://youtu.be/obqx0kZ7Wgc>

9.0.9. Uniformidad de control de temperatura

Se realizo la extrusión de filamento PET y se observo que la temperatura mostrada por el controlador de temperatura REXC100 se mantuviera en el valor de la variable deseada con una desviación menor a 5 grados. Esto se cumplio durante toda la extrusión. Esto se observa en el siguiente video:

9.0.10. Pretratamiento en múltiples botellas

El pretratamiento fue exitoso al aplicarlo en diferentes botellas. Esto se observa en la figura 103, donde todas las botellas tienen una textura lisa sin rebordes.



Figura 103: Botellas después de pretratamiento

9.0.11. Tiempo de instalación del carrete

En un tiempo de 79 segundos se realizó el montaje del carrete dejándolo listo para enrollar. En el siguiente link se puede verificar la prueba: <https://youtu.be/GZJwZNAfysE>

El tiempo inicial planteado en el requerimiento fue de 10 segundos. El sistema no cumple con este tiempo pues requiere de realizar varias operaciones de larga duración con herramientas a la mano. Sin embargo, se considera que este es un tiempo razonable con respecto a maquinas ya existentes en el mercado, en las cuales se desmonta la maquina en su totalidad o se desenrolla todo el filamento del carrete.

9.0.12. Parada de emergencia

La parada de emergencia funciona exitosamente pues detiene la operación de la máquina inmediatamente. Esto se puede ver en el siguiente video: <https://youtu.be/X1vukqmiejs>.

9.0.13. Visualización y modificación de temperatura

Por medio del controlador REXC100, es posible visualizar la temperatura actual del bloque extrusor y modificar dicha temperatura a una deseada.

9.0.14. Visualización de velocidad

La visualización de la velocidad fue conseguida. Sin embargo, la implementación de el sensado de velocidad por medio de interrupciones generó dificultades en la visualización. Esto es debido a que

la interrupción ocurre muy frecuentemente que retrasa el código de visualización de la velocidad. Posibles soluciones a este problema es utilizar una frecuencia de reloj mayor en el microcontrolador o separar las funciones de visualización y sensado en dos microcontroladores diferentes.

Referencias

- [1] A. J. I. Carolina Cardona, Abigail H. Curdes, “Effects of filament diameter tolerances in fused filament fabrication,” 2016. [Online]. Available: <https://dademuch.com/2019/04/24/funcion-de-transferencia-del-motor-dc-y-su-carga/>
- [2] S. A. C. Karagiannidis P G and K. G. P, “Study of crystallinity and thermomechanical analysis of annealed poly,” 2008.
- [3] B. D. J. S. P. M. W. G. P. Brandon Sargent¹, Nathan Brown¹ and L. L. Howell¹, “Heat set creases in polyethylene terephthalate (pet) sheets to enable origami-based applications,” 2019.
- [4] Watlow, “Ez-zone users guide,” 2016.
- [5] “complete thermal systems solutions for plastic processing, author=Watlow, year=2009.”
- [6] AVIENT, “Additives colorants for pet,” 2021.
- [7] S. Mancini and M. Zanin, “Recyclability of pet from virgin resin,” *Materials Research*, vol. 2, 01 1999.
- [8] D. D. Walden, *Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities*, 4th ed. John Wiley amp; Sons Inc., 2015, p. 25–46.
- [9] R. Shishko, R. Aster, and R. C. Cassingham, *NASA Systems Engineering Handbook*. National Aeronautics and Space Administration, 1995, p. 17–42.
- [10] dademuchconnection, “Función de transferencia del motor dc y su carga,” Oct 2020, accessed: 2023-06-6. [Online]. Available: <https://dademuch.com/2019/04/24/funcion-de-transferencia-del-motor-dc-y-su-carga/>
- [11] LO-COG® DC Servo Motors Series 8000, 9000, 14000, Pittman, accessed: 2023-06-6. [Online]. Available: https://www.precisionmotorworks.com/pdf/Pittman_GM87xx.web.pdf
- [12] C. Powell, “What are the sizes and weights of your spools?” 2022. [Online]. Available: <https://support.3dfuel.com/hc/en-us/articles/360059449374-What-are-the-sizes-and-weights-of-your-spools->

Anexos

A. Cronograma