

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

“Diseño del Módulo de Control de Flujo para un Dispensador de  
Fluidos a Base de Electro spray”

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

Rodrigo Alessandro González Ramírez

Michael Andrés Ruíz Altamirano

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo se lo dedico a mi abuelo Honorio, quien me motivó a iniciar mis estudios en esta prestigiosa universidad. A mi abuela Fabiola que me ha impulsado a buscar mi desarrollo profesional.

**Michael Andrés Ruiz Altamirano**

Este proyecto se lo dedico a mi esposa y a mis padres, quienes me han motivado a cumplir con esta meta tan importante.

**Rodrigo Alessandro González Ramírez**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mis padres, por su paciencia y confianza a lo largo de todos estos años de estudio. A mi hermana, por ser siempre mi guía y mi ejemplo. A Solange, quien se convirtió en la fuerza y motivación que necesitaba.

**Michael Andrés Ruiz Altamirano**

Agradezco a mis padres por su apoyo incondicional a pesar de todas las adversidades que he pasado.

**Rodrigo Alessandro González Ramírez**

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me(nos) corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; (*nombre de los participantes*) y doy(damos) mi(nuestro) consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

A handwritten signature in black ink that reads "Michael Ruiz". The signature is written in a cursive style with a long horizontal stroke extending to the right.

Michael Ruiz

A handwritten signature in black ink that reads "Rodrigo González". The signature is written in a cursive style with a large, circular initial "R" and a long horizontal stroke extending to the right.

Rodrigo González

# EVALUADORES

RODOLFO EZEQUIEL PAZ MORA  
Digitally signed by  
RODOLFO EZEQUIEL  
PAZ MORA  
Date: 2021.05.16  
14:03:06 -05'00'

---

**Rodolfo Paz**

PROFESOR DE LA MATERIA



Firmado electrónicamente por:  
EDUARDO ADAN  
CASTILLO OROZCO

---

**Eduardo Castillo**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

Este trabajo consiste en el diseño de un módulo de control de flujo para un sistema de electropray para la empresa CastilloLabs. El objetivo principal del módulo es controlar el flujo a través de una jeringa hipodérmica para poder dispensar el fluido con alta precisión, esto permite al sistema funcionar en modo dripping y microdripping en distintas aplicaciones como impresión de circuitos (PCB), energía solar, medicina, etc. Se desarrollaron matrices de selección y se calculó el rango de operación del módulo, así como el torque necesario para el impulso del émbolo de la jeringa. Del diseño realizado se obtuvo un control de flujo mediante un motor de engranajes DC de baja velocidad conectado a un controlador de velocidad que permite variar el flujo deseado acoplado un tornillo sin fin que realiza el desplazamiento del émbolo de la jeringa para la impulsión del fluido de trabajo. La validación del sistema se realizó con un motor de 3.5 rpm con un torque mínimo de 22lb.cm, un tornillo M6 y un controlador de velocidad por Arduino con lo que se logró un rango de caudal de 1 a 130 ml/h. Finalmente, a partir de la comparación del costo de fabricación del prototipo diseñado que fue de \$129,00, con el costo de compra de un equipo de similares características cuyo valor oscila en \$1.392,97 se concluyó que la fabricación del sistema tiene un ahorro representativo.

**Palabras Clave:** *Electrospray, bomba tipo jeringa, micro dripping, control de flujo*

## **ABSTRACT**

*This work consists of the design of a flow control module using an electrospray system for the CastilloLabs Company. The main objective of the module is controlling the flow through a hypodermic syringe to be able to dispense the fluid with high precision, so that it allows the system to operate in dripping and microdripping mode in different applications such as circuit printing (PCB), solar energy, medicine etc.*

*Selection matrices were developed, and it was found that the best possible solution for the project is to use an endless screw, then the appropriate components for the control module were selected and the operating range of the control module within which it can be perform dripping and micro dripping. The torque required to drive the syringe plunger was determined, which allowed us to correctly select the motor for the fluid dispenser. Finally, the validation of the project was carried out with the construction of the prototype, and it was delivered to Castillo Labs.*

*Through the design carried out, a flow control was obtained by means of a low-speed DC gear motor connected to a speed controller that allows the desired flow to be varied. The motor is coupled to an endless screw that moves the plunger of the syringe to drive the working fluid. The validation of the system was carried out with a 3.5 rpm motor with a minimum torque of 22lb.cm, an M6 screw and a speed controller by Arduino with which a flow range of 1 to 130 ml / h was achieved.*

*A flow control module was designed for the established range, which is obtained through the use of syringes whose capacity varies between 1ml and 60 ml. Said module can be coupled to the Castillo Labs aqueous solutions dispenser and finally from the comparison of the manufacturing cost of the designed prototype, which was \$ 129.00, with the purchase and import cost of a device with similar characteristics whose value was Quoted at \$ 1,392.97, it concluded that the manufacturing of the system has a representative economic saving.*

**Keywords:** *Electrospray, syringe pump, micro dripping, flow control*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	<i>II</i>
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA .....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE PLANOS.....	IX
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Definición del Problema .....	1
1.2. Justificación del proyecto .....	1
1.3. Objetivos .....	1
1.3.1. Objetivo General.....	1
1.3.2. Objetivos Específicos .....	1
1.3.3. Marco teórico .....	2
CAPÍTULO 2.....	5
2. METODOLOGÍA.....	5
2.1. Diseño Conceptual .....	5
2.1.1. Requerimientos de diseño .....	5
2.1.2. Generación de posibles soluciones .....	6
2.1.3. Análisis y Selección de la solución .....	9
2.2. Diseño Especifico.....	11
2.2.1. Sistema de movimiento rotacional.....	11
2.2.2. Sistema de control de velocidad.....	12
2.2.3. Especificaciones de la solución .....	12
2.3. Diseño detallado.....	16
2.3.1. Características del fluido de trabajo.....	16
2.3.2. Fuerza requerida para el desplazamiento del embolo de la jeringa.....	17
2.3.3. Velocidad de desplazamiento del embolo de la jeringa requerida .....	23

2.3.4. Cálculo de la velocidad angular mínima y máxima .....	24
2.3.5. Transmisión de potencia.....	26
2.3.6. Modelado del sistema de control de flujo.....	27
2.3.7. Planos de fabricación de componentes. ....	32
CAPÍTULO 3.....	36
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	36
3.1. Diseño del prototipo. ....	36
3.2. Validación del Sistema .....	35
3.3. Análisis de Viabilidad Económica.....	36
3.3.1. Presupuesto de fabricación del equipo.....	36
3.3.2. Costo de bomba en el mercado nacional .....	37
3.3.3. Costo de la bomba tipo jeringa internacional .....	38
3.3.4. Comparación de Costos. ....	39
CAPÍTULO 4.....	41
4. Conclusiones y Recomendaciones .....	41
4.1. Conclusiones.....	41
4.2. Recomendaciones.....	41
BIBLIOGRAFÍA	
APÉNDICES	

## **ABREVIATURAS**

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

ASTM American Society for Testing and Materials

NACE National Association of Corrosion Engineer

## SIMBOLOGÍA

mil	Milésima de pulgada
mm	Milímetro
nm	Nanómetro
$\mu\text{m}$	Micr
cm	Centímetro
l	litro
ml	Mililitro
$\text{m}^3$	Metro cubico
$\text{mm}^3$	Milímetro cubico
hr	Hora
s	Segundo
min	Minuto
kg	Kilogramo
N	Newton

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Clasificación de los fluidos reológicos .....	3
Figura 1.2. Curva de flujo de fluidos puramente viscosos independientes del tiempo dependientes del tiempo. ( <i>ChenDaniel_Xiongbiao_2002.pdf</i> , s. f.) .....	4
Figura 2.1. Árbol de objetivos del sistema de control .....	6
Figura 2.2. Sistema de desplazamiento por tornillo sin fin. (NBC Corporation) .....	7
Figura 2.3. Sistema de desplazamiento por Biela-Manivela. (Norton, 2004) .....	8
Figura 2.4. Sistema de desplazamiento por actuador eléctrico. ....	8
Figura 2.5. Árbol de objetivos del motor .....	13
Figura 2.6 Árbol de objetivos de Controlador del motor. ....	14
Figura 2.7. Viscosidad relativa del fluido vs Velocidad de corte. ....	17
Figura 2.8. Diagrama del transporte del fluido .....	18
Figura 2.9. Factor de fricción vs Numero generalizado de Reynolds para fluidos No-Newtonianos en tubería cilíndrica. Tomado de (Singh & Heldman, 2009) .....	21
Figura 2.10. Propiedades de pernos de acero SAE. Tomado de (Norton, 2011) .....	24
Figura 2.11. Dimensiones de tornillos estándar ISO. Tomado de (Norton, 2011) .....	26
Figura 2.12. Motorreductor de Alto Torque .....	27
Figura 2.13. Modelado de Motor DC. ....	28
Figura 2.14. Modelado de Varilla Roscada. Fuente: Elaboración Propia .....	29
Figura 2.15. Modelado de Tuerca M6. Fuente: Elaboración Propia .....	29
Figura 2.16. Modelado de Transmisor de Potencia. Fuente: Elaboración Propia .....	29
Figura 2.17. Modelado de Riel. Fuente: Elaboración Propia .....	30
Figura 2.18. Modelado de Prisionero M2. Fuente: Elaboración Propia .....	30
Figura 2.19. Modelado de Perno M4. Fuente: Elaboración Propia .....	30
Figura 2.20. Modelado de Jeringa de 60 ml. Fuente: Elaboración Propia .....	31
Figura 2.21. Modelado de Soporte de Jeringa. Fuente: Elaboración Propia .....	31
Figura 3.1. Prototipo del módulo de control de flujo .....	36
Figura 3.2. Ventana de ingreso de caudal requerido .....	34
Figura 3.3. Relación de Vueltas por minuto vs Bits .....	35
Figura 3.4. Bomba de Infusión CODEC (SYAMED, 2020) .....	38
Figura 3.5. Bomba de infusión de importación. ....	38

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Listado de atributos iniciales.....	6
Tabla 2.2. Ponderación de criterios de selección de solución .....	10
Tabla 2.3. Matriz de selección de solución .....	10
Tabla 2.4. Listado de atributos iniciales del motor.....	12
Tabla 2.5. Ponderación de criterios de selección del tipo motor.....	13
Tabla 2.6. Matriz de selección del motor .....	13
Tabla 2.7. Listado de atributos iniciales del controlador. ....	14
Tabla 2.8. Ponderación de criterios de selección del controlador.....	15
Tabla 2.9. Matriz de selección para del controlador del motor. ....	15
Tabla 2.10. Propiedades del fluido a transportar. ....	16
Tabla 2.11. Datos de las variables necesarias para obtener la fuerza .....	22
Tabla 2.12. Cálculo de velocidad mínima y máxima.....	23
Tabla 2.13. Factor de seguridad para los distintos tornillos.....	25
Tabla 2.14. características del motor seleccionado.....	27
Tabla 3.1. Cálculo de error porcentual de los valores experimentales obtenido.....	36
Tabla 3.2. Costo de los componentes del prototipo.....	37
Tabla 3.3. Costos de importación .....	39
Tabla 3.4. Cálculo de impuestos para importación.....	39
Tabla 3.5. Costo total de la nacionalización de la bomba tipo jeringa .....	39
Tabla 3.6. Comparación de bombas de infusión .....	39

## **ÍNDICE DE PLANOS**

- PLANO 1 Listado de Elementos
- PLANO 2 Dimensiones Generales del Ensamblaje
- PLANO 3 Planos de Fabricación del Tablero de Control
- PLANO 4 Planos de Fabricación del Soporte de la Jeringa
- PLANO 5 Planos de Fabricación del Transmisor de Potencia

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Definición del Problema

La empresa Castillo Labs requiere del diseño de un módulo de control de flujo para un sistema automático de dispensación de chorro de tinta a base de electrospray. Dicho modulo debe controlar la frecuencia de generación de gotas electro atomizadas mediante la regulación de la razón de flujo desde 0.75  $\mu\text{l/h}$  hasta 2000 ml/h. La regulación de la razón de flujo es permitida a través del accionamiento lineal de una jeringa hipodérmica. Las dimensiones del módulo están restringidas por el dispensador, ya que no debe sobresalir de los límites de éste. La fabricación del módulo debe tener un costo menor a \$1500 y además se debe utilizar materiales estandarizados.

### 1.2. Justificación del proyecto

La dispensación de fluidos con alta precisión tiene aplicaciones en distintas áreas como impresión de circuitos (PCB), incorporación final de componentes electrónicos, energía solar, medicina, militar, aeroespacial, etc. Este proyecto es la continuación de un trabajo previo del diseño de un sistema de dispensador de soluciones acuosas (tintas) que funciona a base de un electrospray que tiene como objetivo final establecer la producción continua de gotas electro atomizadas en función del voltaje y del flujo.

### 1.3. Objetivos

#### 1.3.1. Objetivo General

Diseñar el sistema de control del flujo a través de una jeringa hipodérmica mediante el accionamiento de una bomba.

#### 1.3.2. Objetivos Específicos

1. Diseñar un sistema de control de flujo que permita regular el caudal de trabajo entre 0,75ul y 2000ml.

2. Realizar el modelo CAD y planos de construcción del módulo de control con el software AutoCAD.
3. Realizar el presupuesto de producción del sistema y analizar su viabilidad económica.
4. Validar el correcto funcionamiento del prototipo diseñado.

### **1.3.3. Marco teórico**

#### **1.3.3.1. Distribución de fluidos por electrospray**

El término electrospray es usado para describir los procesos que involucran la distribución controlada de gotas usando un campo eléctrico, normalmente en un rango de cientos de nanómetros a decenas de micrómetros. Este proceso puede presentarse de dos formas distintas, se puede usar un campo eléctrico que causó la expulsión de gotas finas del líquido o se puede usar el campo eléctrico para controlar el tamaño de las gotas de líquido mientras estas son expulsadas por un medio diferente. (Gaskel, 1997)

Esta técnica de electro pulverización es utilizada en una gran gama de aplicaciones donde se incluyen el suministro y formulación de fármacos, encapsulación celular y deposición en capa fina. Además, se puede convalidar para aplicaciones en otras industrias tales como minería, militar, aeroespacial, etc. (Lopez & Pereda, 2020)

#### **1.3.3.2. Bombas de jeringa**

Las bombas de infusión tienen como principio fundamental suministrar fluidos a pacientes vía intravenosa, mediante el control de la cantidad de fluido administrado de forma segura, confiable y automatizada. La bomba jeringa es utilizada cuando se requiere administrar volúmenes bajos y tasas de flujo bajas, debido a que permiten controlar el embolo de la jeringa. El flujo que se suministra con este tipo de bombas puede ser de forma continua o en pasos en un tiempo establecido. Los componentes principales del mecanismo de una bomba jeringa son:

- Microprocesador para controlar los parámetros de operación.

- Jeringa para control de flujo con precisión.
- Motor paso a paso de corriente continua.
- Sistema de control y alarmas.
- Fuente de energía.

### 1.3.3.3. Introducción a los fluidos reológicos

Los fluidos utilizados en embalaje electrónico tal como adhesivos, epoxi, encapsulantes, etc., suelen clasificarse como fluidos reológicos o No-Newtonianos. La relación no lineal entre el esfuerzo cortante y velocidad constante es una de las características que diferencian los fluidos reológicos de los fluidos newtonianos. Estos tipos de fluidos suelen clasificarse en tres categorías; fluidos puramente viscosos independientes del tiempo, fluidos puramente viscosos dependientes del tiempo y fluidos viscoelásticos, tal como se muestra en la Figura 1.1 (*ChenDaniel\_Xiongbiao\_2002.pdf*, s. f.)



Figura 1.1. Clasificación de los fluidos reológicos

Los fluidos puramente viscosos independientes del tiempo son los que su velocidad de corte en un punto determinado depende exclusivamente del esfuerzo cortante instantáneo en dicho punto. En la Figura 1.2. (a) se muestra las características de curvas de flujo de varios fluidos reológicos independientes del tiempo, en donde  $\tau_o$  representa el límite elástico. La Figura 1.2. (b) muestra las curvas de flujo de dos clases de fluidos puramente viscosos dependientes del tiempo, tixotrópicos y reopécticos. Se dice que un fluido es tixotrópico si su viscosidad

disminuye con el tiempo; caso contrario es reopéctico. Se observa que estos fluidos poseen un bucle de histéresis cuya forma depende de la velocidad a la que se aplica el esfuerzo cortante. (ChenDaniel\_Xiongbiao\_2002.pdf, s. f.)

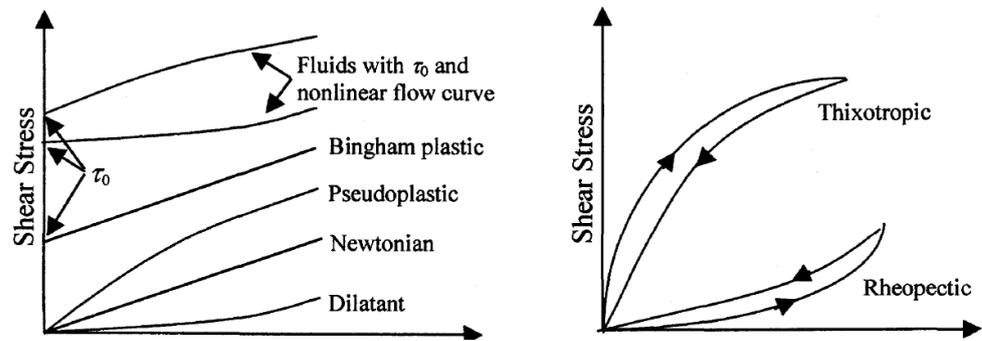


Figura 1.2. Curva de flujo de fluidos puramente viscosos (a) independientes del tiempo (b) dependientes del tiempo. (ChenDaniel\_Xiongbiao\_2002.pdf, s. f.)

Los fluidos viscoelásticos son los que poseen una recuperación elástica parcial tras la eliminación de una deformación por esfuerzo cortante. Dichos fluidos poseen propiedades tanto de fluidos como de sólidos elásticos. Normalmente los fluidos empleados para el envasado de productos electrónicos son puramente viscosos tanto independientes como dependientes del tiempo.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Diseño Conceptual

En esta parte fundamental para el proceso de diseño se generan las posibles soluciones que se van a tomar en cuenta para el diseño final del Proyecto.

#### 2.1.1. Requerimientos de diseño

El proyecto propuesto implica el diseño de un mecanismo de regulación de flujo para dispensadores de fluidos a base de electrospray que cumpla con los siguientes requerimientos:

- La regulación de la razón de flujo debe estar entre 0,75 l/hr hasta 2000 ml/hr.
- El sistema de regulación debe ser compacto ya que será montado sobre el banco de trabajo del dispensador de fluidos previamente realizado por CastilloLabs.
- El costo de producción de la máquina debe ser lo más bajo posible por debajo de las bombas de infusión encontradas en el mercado.
- En la máquina deben acoplarse diferentes tipos de jeringas con distintas capacidades volumétricas.
- Las jeringas por utilizar deben ser nacionales y de fácil adquisición.
- La alimentación de las jeringas debe de hacerse de forma manual.
- El fluido que se debe bombear es "Aceite de silicona 10 cSt

A continuación, en la Tabla 2.1 de acuerdo con la definición del problema y los objetivos de diseño planteados se definen los atributos del módulo de control de flujo para el sistema automático dispensador de fluidos a base de electro aerosol.

**Tabla 2.1. Listado de atributos iniciales**

Características*	O	R	F	M
Debe ser un mecanismo útil	x			
Debe ser un mecanismo versátil	x			
Debe regular el flujo del sistema			x	
Debe ser compacto		x		
Debe estar compuesto por elementos de fácil adquisición		x		
El fluido debe ser expulsado por una jeringa hipodérmica				x
El módulo de control debe ser preciso	x			
El módulo de control debe ser confiable	x			
El equipo debe ser de fácil mantenimiento		x		
Debe tener una vida útil mínima de 5 años		x		
El costo de fabricación debe ser menor a \$500		x		

\*O= objetivos; R=restricciones; F=funciones; M= medios

Una vez definidos los atributos requeridos por nuestro diseño es importante profundizar los objetivos principales de diseño, para lo cual se usó el árbol de objetivos presentado en la Figura 2.1.

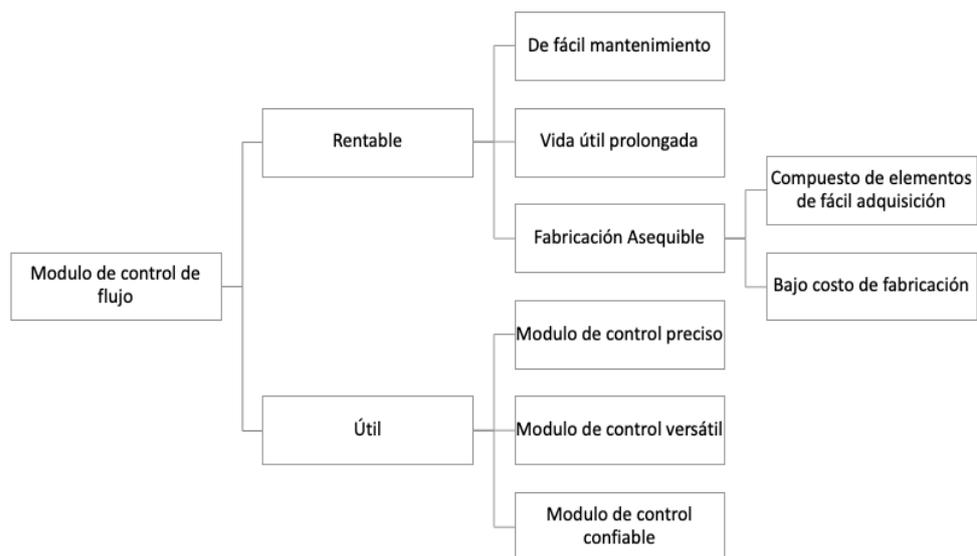


Figura 2.1. Árbol de objetivos del sistema de control

### 2.1.2. Generación de posibles soluciones

El sistema de bombeo consiste en empujar el embolo de la jeringa con

precisión para obtener el flujo deseado para esto se debe utilizar un método de desplazamiento lineal entre los cuales surgen las siguientes alternativas:

### 2.1.2.1. Sistema de desplazamiento por tornillo sin fin

La solución mostrada en la Figura 2.2 propone diseñar un tornillo sin fin en el cual podemos calcular el paso necesario para alcanzar la adecuada velocidad de desplazamiento del embolo de la jeringa y poder así tener un control del flujo que expulsa la misma. Este tornillo debe ser impulsado por un motor de baja velocidad angular. Esta solución es muy práctica ya que es de fácil fabricación u adquisición y de muy bajo costo.

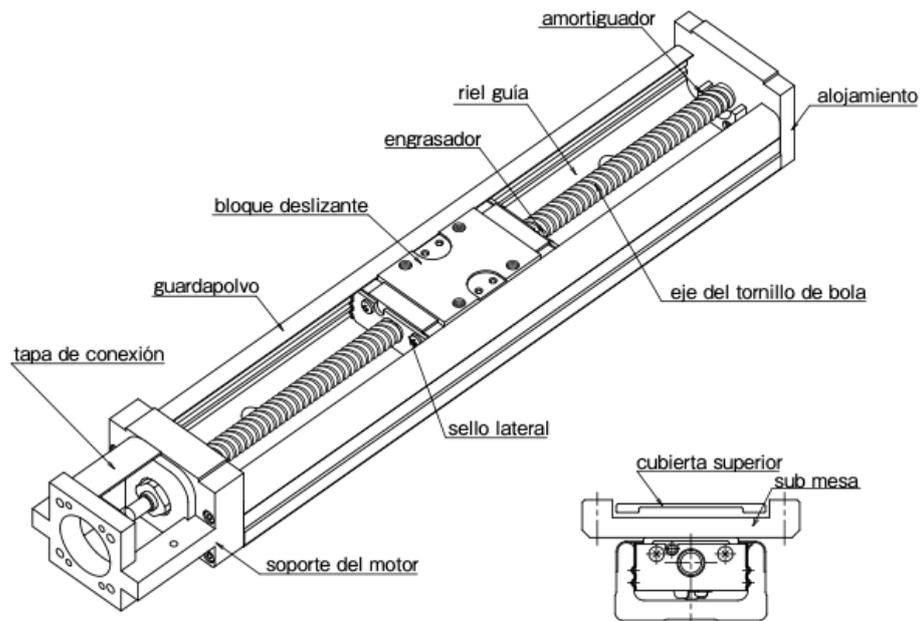


Figura 2.2. Sistema de desplazamiento por tornillo sin fin. (NBC Corporation).

### 2.1.2.2. Sistema desplazamiento por mecanismo biela-manivela

El sistema de control por biela manivela mostrado en la Figura 2.3 permite de igual manera controlar el desplazamiento lineal del embolo de la jeringa, para esto se debe diseñar el sistema adecuado que permita obtener la distancia recorrida por el embolo de la jeringa, aquí se presenta un inconveniente debido a que este método nos restringe a utilizar la misma longitud de embolo para todas las jeringas.

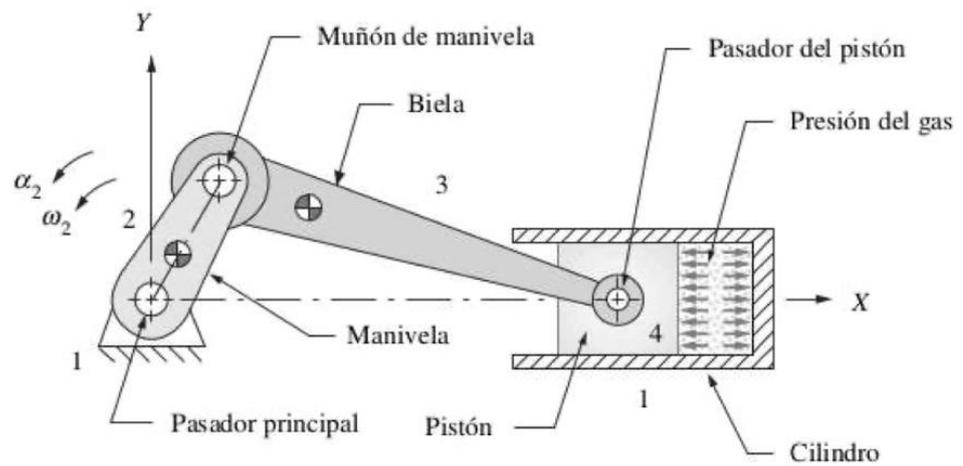


Figura 2.3. Sistema de desplazamiento por Biela-Manivela. (Norton, 2004).

### 2.1.2.3. Sistema de desplazamiento lineal por actuador eléctrico

Es actuador lineal eléctrico mostrado en la Figura 2.4 es un sistema por el cual se puede controlar el desplazamiento y la velocidad del embolo de la jeringa perfectamente al igual que un tornillo sin fin, pero su mantenimiento es más difícil y su costo es más elevado con respecto a otros sistemas.



Figura 2.4. Sistema de desplazamiento por actuador eléctrico. (Llamas, 2016)

### **2.1.3. Análisis y Selección de la solución**

#### **2.1.3.1. Definición de los criterios de selección**

En base a los requerimientos y objetivos determinados previamente se definen los criterios de selección que se deben considerar para la selección de la mejor solución.

1. Costo. La máquina no debe exceder el costo de las bombas de infusión encontradas en el mercado.
2. Precisión. La máquina debe ser precisa ya que el sistema de electropray trabaja con rangos de caudal muy bajos.
3. Confiabilidad. No deben existir fluctuaciones en el valor de caudal ya que de esto depende el correcto funcionamiento de la máquina.
4. Potencia. La potencia de la maquina debe ser la suficiente para desplazar el fluido de la jeringa a muy bajas velocidades.
5. Versatilidad. La máquina debe permitir el cambio de las jeringas para obtener un mayor volumen de trabajo.
6. Fácil mantenimiento. La máquina debe tener un fácil montaje y desmontaje para el mantenimiento o cambio de los componentes.
7. Vida útil prolongada. los componentes de la maquina deben ser de buena calidad para poder tener una vida útil prolongada.

#### **2.1.3.2. Selección del sistema de desplazamiento lineal del embolo de la jeringa**

Una vez determinados los criterios de selección y teniendo en cuenta las prioridades del cliente se procedió a determinar la importancia de cada característica para lo cual usamos una tabla de ponderación.

**Tabla 2.2. Ponderación de criterios de selección de solución**

Criterios de Selección	Costo	Precisión	Confiabilidad	Potencia	Versatilidad	Fácil Mantenimiento	Vida Útil	Puntaje
Costo	...	2	2	3	3	3	3	16
Precisión	2	...	2	3	3	2	2	14
Confiabilidad	2	2	...	2	2	1	1	10
Potencia	1	1	2	...	2	3	3	12
Versatilidad	1	1	2	2	...	2	2	10
Fácil Mantenimiento	1	1	3	1	2	...	2	10
Vida Útil 5	1	2	3	1	2	2	...	11

En la Tabla 2.2 se muestra que tan importante es cada criterio de selección con respecto a los otros, para esto se ha utilizado los números 1, 2 y 3 para definir como menos importante, igual de importante y más importante respectivamente.

Con los datos obtenidos en la Tabla 2.3 de ponderación se procede a realizar la matriz de decisión. Esta herramienta nos permite evaluar individualmente cada posible solución del sistema y determinar que opción es más viable para cumplir las expectativas del cliente.

**Tabla 2.3. Matriz de selección de solución**

Atributos	Ponderación	Alternativas					
		Tornillo sin fin		Biela - Manivela		Actuador neumático	
Costo bajo	0.19	4	0.76	3	0.57	2	0.38
Precisión	0.17	4	0.68	4	0.68	3	0.51
Potencia	0.15	3	0.45	2	0.30	4	0.60
Vida útil	0.13	4	0.52	4	0.52	4	0.52
Confiabilidad	0.12	4	0.48	3	0.36	4	0.48
Versatilidad	0.12	5	0.60	3	0.36	4	0.48
Mantenimiento	0.12	3	0.36	2	0.24	1	0.12
<b>TOTAL</b>	<b>1.00</b>	<b>3.85</b>		<b>3.03</b>		<b>3.09</b>	

Acorde con los resultados de la tabla se elige un sistema de control de flujo que opera por medio de un tornillo sin fin.

## **2.2. Diseño Especifico**

El sistema de control de flujo por tornillo sin fin necesita opera por medio de la transformación del movimiento rotacional de un motor a movimiento lineal el cual será transmitido a la jeringa para la expulsión del líquido a caudales determinados.

Para obtener el funcionamiento deseado del sistema adicionales es necesario realizar la selección de los sistemas de generación de movimiento rotacional y de reducción de velocidad que nos permitirán alcanzar el flujo deseado. A continuación, se realiza la generación de las posibles soluciones para dichos sistemas.

### **2.2.1. Sistema de movimiento rotacional**

El sistema de desplazamiento lineal debe ser accionado mediante un sistema rotacional, un motor el cual debe ser preciso y con un rango bajo de velocidad angular para poder satisfacer las necesidades del módulo de control de flujo.

#### **2.2.1.1. Motorreductor de alto torque**

Es un motor cuya velocidad varia con la variación del voltaje proporcionado, para regular la velocidad de éste se debe utilizar un controlador de esta manera podemos variar la velocidad de desplazamiento del tornillo sin fin.

#### **2.2.1.2. Motor paso a paso**

El motor paso a paso tiene una salida escalonada de igual manera que el de corriente continua convencional necesita un controlador de velocidad, pero al ser un motor de paso a paso depende su precisión del número de grados por paso para el cual esté fabricado.

### 2.2.1.3. Motor Brushless

Este motor no se conecta directamente a la corriente, sino que utiliza un controlador específico para este tipo de motor, donde se marca la velocidad a la cual se desea que giren, por este motivo son muy precisos pero su costo es un poco más elevado.

### 2.2.2. Sistema de control de velocidad.

El módulo de control de flujo debe operar a bajas velocidades por lo tanto es necesario encontrar un sistema que nos permita disminuir la velocidad del motor a utilizarse y obtener así el flujo establecido por CastilloLabs.

### 2.2.3. Especificaciones de la solución

#### 2.2.3.1. Selección del tipo de motor

Para obtener el flujo deseado se necesita un motor de baja frecuencia y muy preciso para satisfacer los requerimientos de la solución. Por tal motivo la selección se basó en atributos mostrados en la Tabla 2.4.

**Tabla 2.4. Listado de atributos iniciales del motor.**

Características	O	R	F	M
Debe ser un elemento preciso	x			
Debe tener una vida útil considerable.		X		
Debe ser fácil de ensamblar.			x	
Debe tener baja velocidad angular		X		
Debe ser pequeño		X		
Debe ser económico		X		
Debe ser comercial		X		

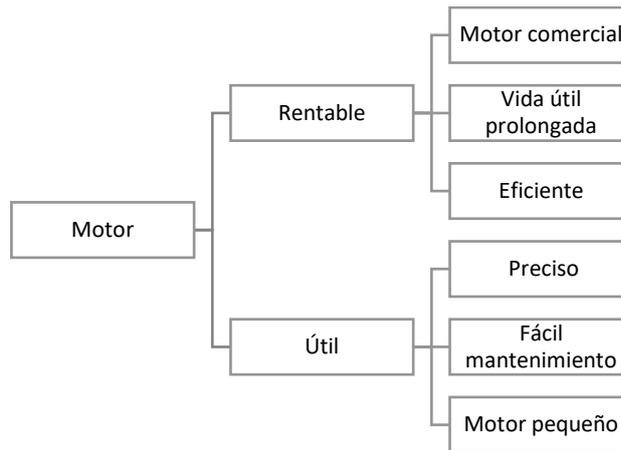


Figura 2.5. Árbol de objetivos del motor

En la Figura 2.5 se definen los objetivos que debe cumplir el motor a seleccionar para el módulo de control de flujo. Luego se realizan la ponderación de los criterios de selección y la matriz de selección del motor tal como se muestra en la Tabla 2.5 y la Tabla 2.6.

**Tabla 2.5. Ponderación de criterios de selección del tipo motor.**

Criterios de Selección	Costo	Precisión	Ensamblado	Eficiencia	Tamaño	Puntaje
Costo	...	2	3	3	2	10
Precisión	2	...	3	2	2	9
Ensamblado	1	1	...	1	1	4
Eficiencia	1	2	3	...	1	7
Tamaño	2	2	3	3	...	10

**Tabla 2.6. Matriz de selección del motor**

Atributos	Ponderación	Alternativas					
		Motorreductor de Alto torque		Servomotor DC lineal		Motor Brussless	
Costo	0.25	5	1.25	4	1.00	3	0.75
Tamaño	0.25	4	1.00	4	1.00	4	1.00
Precisión	0.22	4	0.88	3	0.66	5	1.10
Eficiencia	0.18	4	0.72	3	0.54	5	0.90
Ensamblado	0.10	3	0.30	3	0.30	2	0.20
	1.00	4.15		3.50		3.95	

Para la rotación del tornillo sin fin se obtuvo como resultado que un motorreductor de alto torque es la opción más apta para el módulo de control de flujo.

### 2.2.3.2. Selección del controlador del motor

El controlador del motor tiene como función regular la velocidad angular en la que opera el motor con la finalidad de poder controlar el desplazamiento del pistón conectado al tornillo según sea requerido.

En la Tabla 2.7 se definen los atributos del módulo de control del motor para el sistema.

**Tabla 2.7. Listado de atributos iniciales del controlador.**

Características	O	R	F	M
Debe ser un mecanismo preciso	x			
Debe ser un componente confiable.	x			
Debe ser un mecanismo versátil	x			
Debe regular la velocidad angular del motor			x	
Debe ser compacto		x		
Debe ser de fácil adquisición		x		
Debe tener una vida útil prolongada		x		
El costo de adquisición debe ser asequible		x		

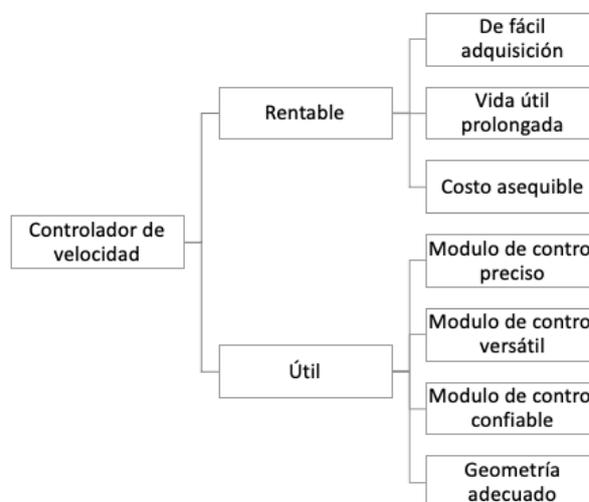


Figura 2.6 Árbol de objetivos de Controlador del motor.

Una vez definidos los objetivos del controlador de velocidad realizamos el pesado de los elementos en la Tabla 2.8. Conforme a la investigación de mercado realizada se presentan 3 diferentes controladores de velocidad que existen en el mercado y se realiza la selección del más adecuado a partir de la Tabla 2.8

**Tabla 2.8. Ponderación de criterios de selección del controlador.**

Criterios de Selección	Costo	Precisión	Confiabilidad	Versatilidad	Tamaño del Controlador	Vida Útil	Puntaje
Costo	...	2	3	3	2	3	13
Precisión	2	...	2	3	2	3	12
Confiabilidad	1	2	...	3	2	2	10
Versatilidad	1	1	1	...	3	1	7
Tamaño del Controlador	2	2	2	1	...	3	10
Vida Útil	1	1	1	3	1	...	7

A partir de la Tabla 2.8 se encontró que para la selección del controlador del motor los atributos con más importancia son costo y precisión.

**Tabla 2.9. Matriz de selección para del controlador del motor.**

Atributos	Ponderación	Alternativas					
		Siemens Micromaster 420		Uniquegoods CCM5D		ABB ACS 150	
Costo	0.22	3	0.66	5	1.10	3	0.66
Precisión	0.20	4	0.80	4	0.88	5	1.00
Confiabilidad	0.17	5	0.85	4	0.68	4	0.68
Tamaño	0.17	3	0.51	4	0.68	2	0.34
Vida útil	0.12	4	0.48	4	0.48	4	0.48
Versatilidad	0.12	4	0.48	5	0.60	4	0.48
<b>TOTAL</b>	<b>1.00</b>	<b>3.78</b>		<b>4.42</b>		<b>3.64</b>	

## 2.3. Diseño detallado

### 2.3.1. Características del fluido de trabajo

El fluido con el que la empresa Castillo Labs necesita trabajar es “Si, 10 wt% in DI wáter” cuyas propiedades se presentan en la Tabla 2.10.

**Tabla 2.10. Propiedades del fluido a transportar.  
Tomada de (Castillo-Orozco et al., 2020)  
<https://www.nature.com/articles/srep03137>**

Semiconductor	$\rho$	$\mu$	$\sigma$	$\gamma$	$^{(c)}r_0$	$^{(e)}r_0$			
nanosuspension	(g/ml)	(mPa.s)	( $\mu$ S/cm)	(mN/m)	(mm)	(mm)	$Ca$	$Bo$	$Ca_e$
Si, 2 wt% in DI water	1.010	1.48	991.6	46.7	1.20	1.18	0.035	0.202	0–2.91
Si, 5 wt% in DI water	1.033	1.82	1391.6	48.2	1.21	1.19	0.031	0.204	0–2.90
Si, 10 wt% in DI water	1.060	2.72	1411.2	47.1	1.19	1.13	0.083	0.209	0–3.21
SiC, 2 wt% in DI water	1.051	1.56	484.0	47.7	1.19	1.19	0.048	0.203	0–2.61
SiC, 5 wt% in DI water	1.127	4.79	545.0	48.5	1.20	1.19	0.139	0.220	0–2.57
SiC, 10 wt% in DI water	1.193	12.05	582.0	59.9	1.19	1.23	0.279	0.151	0–2.69
ZnO, 10 wt% in DI water	1.103	1.46	741.0	55.1	1.25	1.29	0.041	0.190	0–3.08
ZnO, 30 wt% in DI water	1.438	2.09	1400.0	52.4	1.07	1.08	0.055	0.204	0–2.88
ZnO, 50 wt% in DI water	1.930	18.50	1782.0	54.3	1.05	1.07	0.405	0.254	0–2.92

El fluido empieza a tener un comportamiento newtoniano a partir de una tasa de corte  $\dot{\gamma} = 64 \text{ s}^{-1}$ , encontrado a partir del modelo de flujo de Hagen-Poiseuille dentro del tubo capilar.

$$\dot{\gamma} = 2Q/\pi R_i^3 \quad (2.1)$$

donde  $\dot{\gamma}$  es la tasa de corte promedio,  $Q$  la tasa de flujo volumétrico o caudal dentro del tubo capilar, y  $R_i$  el radio interno del tubo capilar. (Castillo-Orozco et al., 2020).

De 2.1 con  $R_i = 0.255 \text{ mm}$  se obtuvo un flujo  $Q = 1.67 * 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$  por sobre el cual el fluido tiene comportamiento newtoniano. Esto se muestra claramente en la Figura 2.7, donde la línea punteada separa la sección derecha donde el comportamiento del fluido es No-Newtoniano y la sección de la derecha donde el fluido si tiene comportamiento newtoniano.

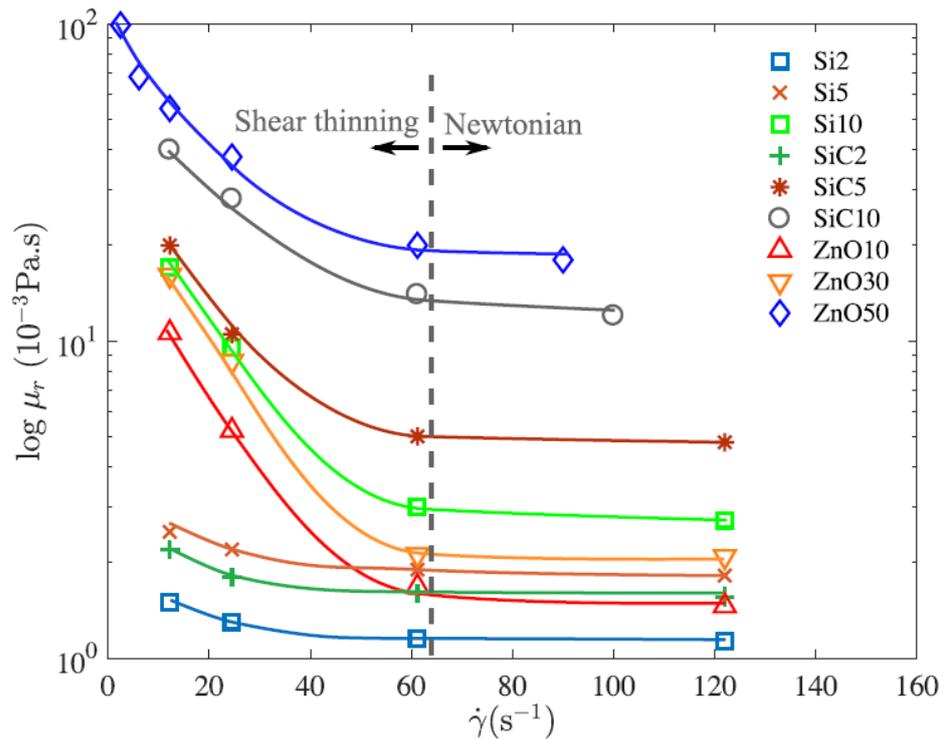


Figura 2.7. Viscosidad relativa del fluido vs Velocidad de corte.  
Tomada de (Castillo-Orozco et al., 2020)

### 2.3.2. Fuerza requerida para el desplazamiento del embolo de la jeringa

El caso más crítico de la fuerza aplicada al embolo de la jeringa se da cuando se trabaja con la jeringa de 1 y 60 ml para la fuerza mínima y máxima respectivamente.

Para calcular la fuerza se realizó un diagrama tal como se muestra en la Figura 2.8. Diagrama del transporte del fluido, donde  $L_s$ ,  $L_t$  y  $L_n$  representan la longitud de la jeringa, tubería y aguja respectivamente. Además, se hicieron las siguientes suposiciones:

- 1) El fluido es incomprensible e independiente del tiempo
- 2) El fluido está en estado de flujo laminar
- 3) No hay deslizamiento entre el fluido y las paredes de la jeringa como tampoco con las paredes de la tubería y de la aguja.
- 4) El diámetro interno de la jeringa es mucho más grande que el de la aguja.

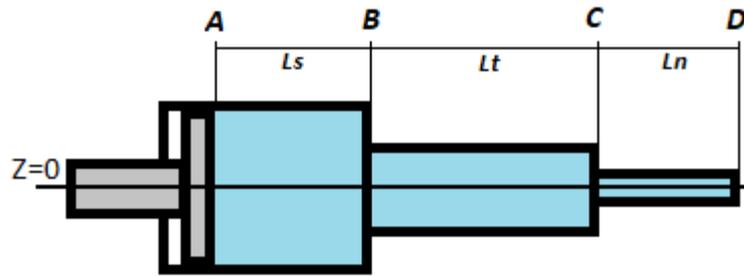


Figura 2.8. Diagrama del transporte del fluido

Aplicando la conservación de la energía donde hacen contacto embolo y el fluido en el punto A y en la salida de la aguja representada por el punto D se tiene que,

$$\frac{P_A}{\rho} + (L_s + L_t + L_n) * g + \frac{v_s^2}{2\alpha_1} = \frac{P_D}{\rho} + \frac{v_n^2}{2\alpha_2} + \sum F \quad (1.2)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $\mu$  y  $\alpha$  son la velocidad promedio y el factor de corrección de la energía cinética respectivamente, y  $\sum F$  representa la sumatoria de todas las perdidas por fricción desde el punto A hasta el punto D.

Los puntos A, B, C y D se encuentran a la misma altura con respecto al eje Z por lo tanto el segundo término de la (1.2) es igual a cero.

De la suposición 4, el termino  $\frac{v_s^2}{2\alpha_1}$  de la (1.2) es aproximadamente igual a cero y por lo tanto se puede eliminar, además implica que las pérdidas por fricción  $\sum F$  son más representativas en el flujo asociado a la tubería y la aguja. Entonces,

$$\sum F = \frac{\Delta P}{\rho} + K_c * \frac{\mu_2^2}{2} + K_c * \frac{\mu_t^2}{2} \quad (2.2)$$

Donde  $\Delta P$  es la caída de presión por fricción y  $K_c$  es el factor de corrección de perdida en la entrada. El primer término representa la energía utilizada para superar la fricción al fluir por tubería y la aguja, el segundo término

representa el efecto de las perdidas menores por efecto de entrada, ajuste de flujo, etc.

Sustituyendo la (2.2) en la (1) y despejando la presión en el punto D tenemos que:

$$P_D = \Delta P + P_A + \rho * v_n^2 \left( \frac{1}{2\alpha_n} + \frac{K_c}{2} \right) + \rho * K_c * \frac{v_t^2}{2} \quad (2.3)$$

Donde, para fluidos no-newtonianos el factor de corrección de energía cinética en función del índice de flujo ( $n$ ), para flujo laminar es,

$$\alpha = \frac{(2n + 1)(5n + 3)}{3(3n + 1)^2} \quad (2.5)$$

Y para flujo turbulento  $\alpha = 1$  (Singh & Heldman, 2009). El valor sugerido de  $K_c$  es 0.23 para una entrada ligeramente redondeada (Foust et al. ,1960). La presión a la salida de la aguja es la presión atmosférica por tal motivo se puede eliminar dicho término, entonces la presión en el punto D puede ser reescrita como,

$$P_D = \Delta P + \rho * v_n^2 \left( \frac{1}{2\alpha_n} + \frac{0.23}{2} \right) + 0.23 * \rho * \frac{v_t^2}{2} \quad (2.6)$$

Para encontrar  $\Delta P$  utilizamos la ley de potencia, la caída de presión para cualquier tramo de conducto se define como,

$$\Delta P = f_r * \frac{2 * L}{D} * \rho * v^2 \quad (2.7)$$

Donde  $f_r$  es el factor de fricción,  $L$  representa la longitud del tramo de tubería,  $D$  el diámetro de la tubería y  $v$  la velocidad promedio del fluido.

Para encontrar el factor de fricción de Fanning se calculó el número de Reynolds generalizado a partir de,

$$N_{Gre} = \frac{8 * D^n * v^{2-n} * \rho}{K} * \left( \frac{4n}{3n + 1} \right)^n \quad (2.8)$$

Para calcular la velocidad promedio en la tubería se utiliza la ecuación de la continuidad:

$$Q = A * v \quad (2.9)$$

Las variables n y K que representan el índice de flujo y el coeficiente de consistencia respectivamente, dichas variables fueron calculadas con ayuda del software ANSYS y su herramienta Polimat tal como se muestra en el Apéndice B. Como resultado se obtuvo que los valores de n y K generados automáticamente por el software son n=0.5099 y K =43.84 mPa.s, resolviendo la (2.8) para el tramo de la tubería y para el tramo de la aguja tenemos:

$$N_{GRe_t} = \frac{8 * D_t^n * v_t^{2-n} * \rho}{K} * \left( \frac{4n}{3n + 1} \right)^n$$

$$N_{GRe_t} = \frac{((5 * 10^{-3})^{0.5099} * (2.83 * 10^{-2})^{2-0.5099} * 1930)}{43.84 * 10^{-3}} * \left( \frac{4 * 0.5099}{3 * 0.5099 + 1} \right)^{0.5099}$$

$$N_{GRe_t} = 13.05 \text{ laminar}$$

$$\alpha_t = \frac{(2 * 0.5099 + 1)(5 * 0.5099 + 3)}{3(3 * 0.5099 + 1)^2}$$

$$\alpha_t = 0.58$$

$$N_{GRe_n} = \frac{((5 * 10^{-3})^{0.5099} * (2.72)^{2-0.5099} * 1930)}{43.84 * 10^{-3}} * \left( \frac{4 * 0.5099}{3 * 0.5099 + 1} \right)^{0.5099}$$

$$N_{GRe_n} = 11755.87 \text{ turbulento}$$

$$\alpha_n = 1$$

El factor de fricción para flujo laminar se determina con la siguiente ecuación, (Singh & Heldman, 2009):

$$f_r = \frac{16}{N_{GRE}} \quad (2.10)$$

$$f_{r_t} = \frac{16}{N_{GRE_t}}$$

$$f_{r_t} = 1.22$$

Para un flujo turbulento el factor de fricción se determina mediante la Figura 2.9, de donde, para  $N_{GRE_n} = 11755.87$  y  $n = 0.5099$  se obtuvo un valor de  $f_{r_n} = 0.0048$

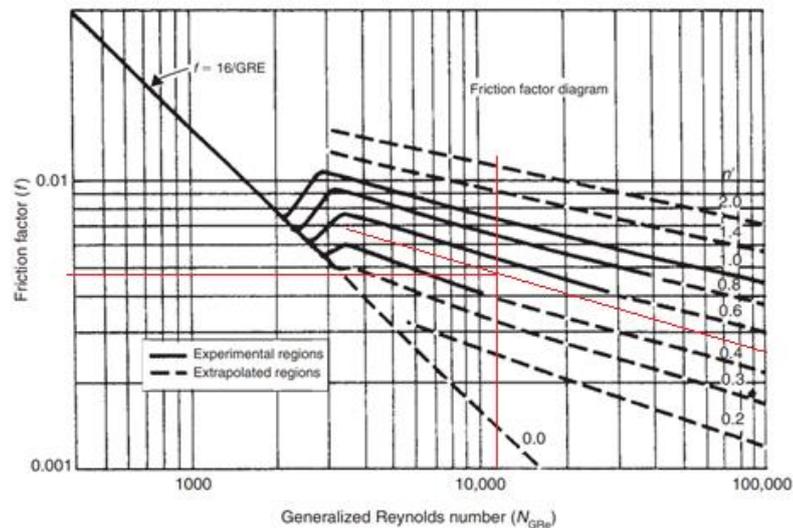


Figura 2.9. Factor de fricción vs Numero generalizado de Reynolds para fluidos No-Newtonianos en tubería cilíndrica. Tomado de (Singh & Heldman, 2009)

La caída de presión total es la suma de las caídas de presión en todos los tramos de la tubería, por lo tanto,

$$\Delta P = (\Delta P)_{B-C} + (\Delta P)_{C-D} \quad (2.11)$$

Reemplazando la (2.7) en la (2.11) tenemos:

$$\Delta P = f_{r_t} * \frac{2L_t}{D_t} * \rho * v_t^2 + f_{r_n} * \frac{2L_n}{D_n} * \rho * v_n^2 \quad (2.12)$$

Para obtener la fuerza se utiliza el concepto de presión, en el punto D, de donde

$$F_D = P_D * A_D \quad (2.13)$$

El área de la parte del embolo de la jeringa que empuja el fluido se puede calcular a partir del área de un cono,

$$A = \pi * R * m \quad (2.14)$$

$$A = 7.21 * 10^{-4} m^2$$

Donde  $R$  es el radio de la jeringa y  $m$  es la generatriz del cono. Al reemplazar (2.13) y (2.14) en la (2.6) tenemos la fórmula para obtener la fuerza necesaria para desplazar el embolo de la jeringa, así:

$$F_D = \left( f_{rt} * \frac{2L_t}{D_t} * \rho * v_t^2 + f_{rn} * \frac{2L_n}{D_n} * \rho * v_n^2 + \rho * v_n^2 \left( \frac{1}{2\alpha_n} + \frac{0.23}{2} \right) + 0.23 * \rho * \frac{v_t^2}{2} \right) * (\pi * R * m) \quad (2.15)$$

### 2.3.2.1. Fuerza máxima requerida ( $F_{max}$ )

Para obtener la fuerza  $F_d$  se utiliza la jeringa de 60 ml con una tasa de flujo  $Q_{max} = 2000ml/h$  y utilizaremos el fluido más viscoso, el Óxido de Zinc (ZnO, 50 wt% in DI wáter) tomado de la Tabla 2.10.

**Tabla 2.11. Datos de las variables necesarias para obtener la fuerza**

Variable	Cantidad	Unidad
$\eta$	$18.5 * 10^{-3}$	$Kg/m.s$
$Q_{max}$	$5.56 * 10^{-7}$	$m^3/s$
$Q_{min}$	$2.083 * 10^{-13}$	$m^3/s$
$L_t$	1	$m$
$L_n$	0.03	$m$
$L_s$	0.06	$m$
$D_n$	$5.1 * 10^{-4}$	$m$
$D_t$	$5 * 10^{-3}$	$m$
$\rho$	1930	$kg/m^3$
$g$	9.8	$m/s$
$v_n$	2.72	$m/s$
$v_t$	$2.83 * 10^{-2}$	$m/s$
$R$	$14.65 * 10^{-3}$	$m$
$m$	$15.48 * 10^{-3}$	$m$
$A$	$7.21 * 10^{-4}$	$m^2$
$\alpha_t$	0.58	<i>adimensional</i>
$\alpha_n$	1	<i>adimensional</i>
$f_{rt}$	1.22	<i>adimensional</i>
$f_{rn}$	0.0048	<i>adimensional</i>

Como resultado se obtuvo una fuerza:

$$F_D = 12.24 N$$

La fuerza máxima que va a ejercer el motor es la suma de la fuerza para mover el fluido ( $F_D$ ), con la fuerza requerida para mover el soporte del embolo de la jeringa ( $F_{soporte}$ ) y se expresa asi,

$$F_{max} = F_D + F_{soporte} \quad (2.16)$$

$$F_{max} = F_D + m_{soporte} * g \quad (2.17)$$

$$m_{soporte} = V_{soporte} * \rho_{PLA} \quad (2.18)$$

Donde  $\rho_{PLA}$  la densidad del filamento PLA (Poliácido láctico). Como resultado se obtiene una fuerza máxima igual a:

$$F_{max} = F_D + V_{soporte} * \rho_{PLA} * g \quad (2.19)$$

$$F_{max} = 12.24N + 20.21 * 10^{-6}m^3 * 1240 \frac{kg}{m^3} * 9.8 \frac{m}{s^2}$$

$$F_{max} = 12.48 N$$

### 2.3.3. Velocidad de desplazamiento del embolo de la jeringa requerida

Mediante la (9) se calculó la velocidad mínima y máxima de desplazamiento lineal del embolo de la jeringa en función del caudal que debe proporcionar la misma para realizar el proceso de electrospray, en los rangos requeridos por Castillo Labs.

**Tabla 2.12. Cálculo de velocidad mínima y máxima.**

Jeringa [ml]	Diámetro [mm]	Área [m2]	Caudal max [m3/s]	Caudal min [ml/h]	v_max [m/s]	v_min [m/s]
1	4,40E-03	1,52E-05	5,56E-07	2,08E-13	3,66E-02	1,37E-08
3	8,66E-03	5,89E-05	5,56E-07	2,08E-13	9,44E-03	3,54E-09
5	1,21E-02	1,14E-04	5,56E-07	2,08E-13	4,87E-03	1,82E-09
10	1,45E-02	1,65E-04	5,56E-07	2,08E-13	3,37E-03	1,26E-09
20	1,91E-02	2,87E-04	5,56E-07	2,08E-13	1,93E-03	7,25E-10
30	2,17E-02	3,70E-04	5,56E-07	2,08E-13	1,50E-03	5,63E-10
60	2,93E-02	6,74E-04	5,56E-07	2,08E-13	8,25E-04	3,09E-10

De la Tabla 2.12 se encontró que el sistema cumple los requerimientos de caudal con la velocidad mínima de la jeringa de 1 ml y con la velocidad máxima de la jeringa de 60 ml. Por lo tanto:

$$v_{min_{req}} = 1.37 * 10^{-8} m/s$$

$$V_{max_{req}} = 8.25 * 10^{-4} m/s$$

#### 2.3.4. Cálculo de la velocidad angular mínima y máxima

Para establecer cuál es la velocidad angular mínima y máxima debemos seleccionar el tornillo que se ajusta mejor al módulo de control de flujo, ya que de esta variable depende la velocidad tal como se muestra en la (2.20).

$$\omega = \frac{V_{lineal\ del\ motor}}{v_{tornillo}} \quad (2.20)$$

Para seleccionar el tornillo se determinó el factor de seguridad ( $N$ ) a partir del esfuerzo por tensión ( $\sigma_s$ ) que soporta el tornillo y la resistencia a la fluencia ( $S_y$ ). La ecuación de factor de seguridad para esfuerzo uniaxial se define como,

$$N = \frac{S_y}{\sigma_s} \quad (2.21)$$

El valor de  $S_y = 57kpsi$  se obtuvo de la figura para el acero SAE grado 2.

Número de grado de la SAE	Intervalo del tamaño del diám. ext. (in)	Resistencia de prueba mínima (kpsi)	Resistencia a la fluencia mínima (kpsi)	Resistencia a la tensión mínima (kpsi)	Material
1	0.25-1.5	33	36	60	bajo o medio carbono
2	0.25-0.75	55	57	74	bajo o medio carbono
2	0.875-1.5	33	36	60	bajo o medio carbono
4	0.25-1.5	65	100	115	medio carbono, forjado en frío
5	0.25-1.0	85	92	120	medio carbono, Q&T*
5	1.125-1.5	74	81	105	medio carbono, Q&T
5.2	0.25-1.0	85	92	120	martensita al bajo carbono, Q&T
7	0.25-1.5	105	115	133	aleación al medio carbono, Q&T
8	0.25-1.5	120	130	150	aleación al medio carbono, Q&T
8.2	0.25-1.0	120	130	150	martensita al bajo carbono, Q&T

\* Templado y revenido

Figura 2.10. Propiedades de pernos de acero SAE. Tomado de (Norton, 2011)

El esfuerzo por tensión se define como la relación entre la fuerza y el área de esfuerzo por tensión.

$$\sigma_s = \frac{F}{A_t} \quad (2.22)$$

En la Tabla 2.13 se observa que todos los tornillos tienen un factor de seguridad mayor a, por lo tanto, cualquier medida de tornillo que se tome soportara el esfuerzo determinado.

**Tabla 2.13. Factor de seguridad para los distintos tornillos**

Área de esfuerzo por tensión [m2]	Esfuerzo axial [Pa]	Resistencia a la fluencia [Pa]	Paso diametral	Diámetro mayor [mm]	Factor de seguridad
5,03E-06	2,48E+06	3,93E+08	0,5	3	158
6,78E-06	1,84E+06	3,93E+08	0,6	4	213
8,78E-06	1,42E+06	3,93E+08	0,7	4	276
1,42E-05	8,80E+05	3,93E+08	0,8	5	446
2,01E-05	6,20E+05	3,93E+08	1	6	633
3,66E-05	3,41E+05	3,93E+08	1,25	8	1153
5,80E-05	2,15E+05	3,93E+08	1,5	10	1826
8,43E-05	1,48E+05	3,93E+08	1,75	12	2653
1,15E-04	1,08E+05	3,93E+08	2	14	3635
1,92E-04	6,49E+04	3,93E+08	2,5	18	6060
3,53E-04	3,54E+04	3,93E+08	3	24	11099
5,61E-04	2,23E+04	3,93E+08	3,5	30	17654
8,17E-04	1,53E+04	3,93E+08	4	36	25715

Ya que todos los tornillos siguen cumpliendo nuestro objetivo principal, vamos a seleccionar el de menor rango de velocidad angular y el de menor diámetro posible para que el costo final del prototipo se reduzca. Para esto se realizó la tabla donde se observa las revoluciones máximas y mínimas que se puede alcanzar con cada tornillo. Como resultado se seleccionó un tornillo M6.

$$\omega_{min} = \frac{8,25 * 10^{-4} \text{ m/s}}{1 * 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{vuelta}}} * \left( \frac{60\text{s}}{1 \text{ min}} \right) = 8,21 * 10^{-4} \text{ rpm}$$

$$\omega_{max} = \frac{1,37 * 10^{-8} \text{ m/s}}{1 * 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{vuelta}}} * \left( \frac{60\text{s}}{1 \text{ min}} \right) = 49,48 \text{ rpm}$$

## 2.3.5. Transmisión de potencia

### 2.3.5.1. Torque requerido del sistema

El torque necesario para desplazar el embolo de la jeringa fue 0.0125 N.m, el cual fue calculado utilizando un tornillo M6 cuyas características se obtienen de la Figura 2.11. y se observan sus dimensiones.

Tabla 11-2 Dimensiones principales de cuerdas de tornillos del estándar métrico ISO  
Datos calculados con las ecuaciones 11.1; véase la referencia 4 para mayor información

Diámetro mayor $d$ (mm)	Cuerdas gruesas			Cuerdas finas		
	Paso $p$ mm	Diámetro menor $d_r$ (mm)	Área de esfuerzo por tensión $A_t$ (mm <sup>2</sup> )	Paso $p$ mm	Diámetro menor $d_r$ (mm)	Área de esfuerzo por tensión $A_t$ (mm <sup>2</sup> )
3.0	0.50	2.39	5.03			
3.5	0.60	2.76	6.78			
4.0	0.70	3.14	8.78			
5.0	0.80	4.02	14.18			
6.0	1.00	4.77	20.12			
7.0	1.00	5.77	28.86			
8.0	1.25	6.47	36.61	1.00	6.77	39.17
10.0	1.50	8.16	57.99	1.25	8.47	61.20
12.0	1.75	9.85	84.27	1.25	10.47	92.07
14.0	2.00	11.55	115.44	1.50	12.16	124.55
16.0	2.00	13.55	156.67	1.50	14.16	167.25
18.0	2.50	14.93	192.47	1.50	16.16	216.23
20.0	2.50	16.93	244.79	1.50	18.16	271.50
22.0	2.50	18.93	303.40	1.50	20.16	333.06
24.0	3.00	20.32	352.50	2.00	21.55	384.42
27.0	3.00	23.32	459.41	2.00	24.55	495.74
30.0	3.50	25.71	560.59	2.00	27.55	621.20
33.0	3.50	28.71	693.55	2.00	30.55	760.80
36.0	4.00	31.09	816.72	3.00	32.32	864.94
39.0	4.00	34.09	975.75	3.00	35.32	1028.39

Figura 2.11. Dimensiones de tornillos estándar ISO. Tomado de (Norton, 2011)

$$T_{req} = \frac{F_{max} * d_p * (\mu * \pi * d_p + L * \cos\alpha)}{2 * (\pi * d_p * \cos\alpha - \mu L)} + \mu * F_{max} * \frac{d_c}{2} \quad (2.23)$$

Donde,

(P): Carga axial total aplicada (N)

( $d_p$ ): Diámetro de paso del tornillo (m)

(L): Paso de rosca (m)

( $\alpha$ ): Angulo de cuerda ACME

( $d_c$ ): Diametro medio de la tuerca hexagonal (m)

( $\mu$ ): Coeficiente de fricción cuerda-tuerca lubricado con aceite

Como resultado se obtuvo:

$$T_{req} = 0.0125 \text{ N.m}$$

$$T_{req} = 0.28 \text{ lb.cm}$$

Luego de buscar en el mercado un motor que cumpla con las condiciones establecidas se seleccionó el motor mostrado en la Figura 2.12, cuyas características se muestran en la Tabla 2.14.

**Tabla 2.14. características del motor seleccionado**

Tensión nominal:	12 V CC.
Relación de reducción	1: 401
Velocidad sin carga	50 RPM
Par nominal	105.02 lb.cm
Corriente nominal	0.16 A
Tamaño del eje de salida en forma de D	0.236 x 0.551 in
Tamaño del motor	1.425 x 1.311 in (D*L)



Figura 2.12. Motorreductor de Alto Torque

### 2.3.6. Modelado del sistema de control de flujo

Uno de los requerimientos del diseño es la capacidad de a ser adaptado a una mesa de trabajo previamente diseñada la cual cuenta con dimensiones

de 600x600 mm<sup>1</sup>. Usando esta medida como nuestra limitante se procedió a realizar el diseño de la geometría del sistema usando el software de dibujo asistido por computadora FUSION 360.

### 2.3.6.1. Modelado de elementos conocidos.

Se realizó el modelado del sistema partiendo de los planos del fabricante del motor DC que fuer seleccionados en la etapa de diseño específico. El dibujo de este componente se puede observar en la Figura 2.13.



Figura 2.13. Modelado de Motor DC.  
Fuente: Elaboración Propia

Conforme a lo discutido con el cliente y en función a los cálculos realizados se determinó que el elemento óptimo para realizar la transformación de movimiento rotacional a lineal es una varilla roscada de M6 con paso diametral de 1,00 mm<sup>2</sup>.

La varilla fue conectada al eje del motor por medio de un acople para que su rotación sea convertida en movimiento lineal por medio de una tuerca estándar M6. El dibujo de la varilla puede ser observado en la Figura 2.14, mientras que el de la tuerca se lo puedo apreciar en la Figura 2.15.

---

<sup>1</sup> (Lopez & Pereda, 2020)

<sup>2</sup> (Budynas & Nisbett, 2008)

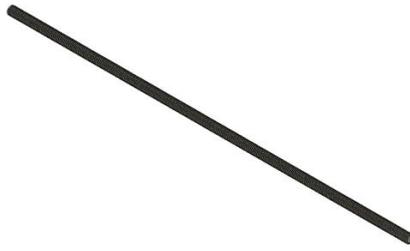


Figura 2.14. Modelado de Varilla Roscada. Fuente: Elaboración Propia

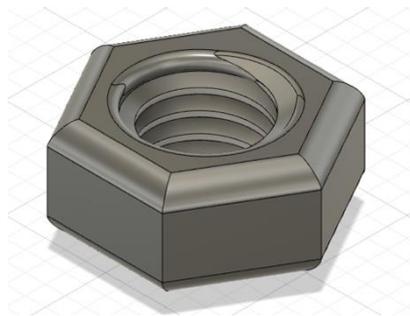


Figura 2.15. Modelado de Tuerca M6. Fuente: Elaboración Propia

El movimiento rotacional es limitado por un accesorio que acopla la tuerca en su interior el cual puede ser observado en la Figura 2.16. Éste transfiere la potencia generada por el motor a la jeringa, y cuenta con un sistema de sujeción que mantiene a la jeringa perpendicular al accesorio.

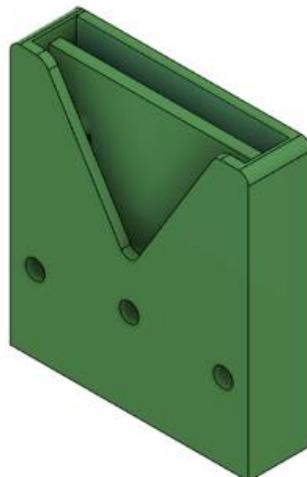


Figura 2.16. Modelado de Transmisor de Potencia. Fuente: Elaboración Propia

Para controlar que el movimiento sea el deseado el transmisor de potencia es guiado por dos rieles paralelas. El modelado de estos elementos se aprecia en la Figura 2.19.



Figura 2.17. Modelado de Riel. Fuente: Elaboración Propia

El armado del sistema fue realizado con diferentes elementos de sujeción entre los cuales están prisioneros M2x2,5 (Figura 2.20) y pernos M4 (Figura 2.21). Las dimensiones de los elementos regulados por norma fueron obtenidas de catálogos.

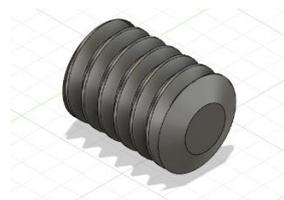


Figura 2.18. Modelado de Prisionero M2. Fuente: Elaboración Propia

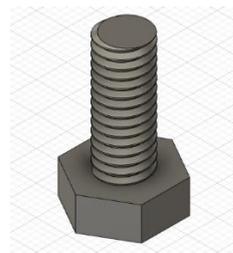


Figura 2.19. Modelado de Perno M4. Fuente: Elaboración Propia

El sistema diseñado fue realizado de tal que se puedan acoplar jeringas de diferentes dimensiones con la finalidad de poder abarcar el mayor rango de caudal. Para el modelado del sistema se consideró la jeringa de mayor capacidad ya que es la que determina los límites máximos del sistema. El dibujo realizado se presenta en la Figura 2.22.

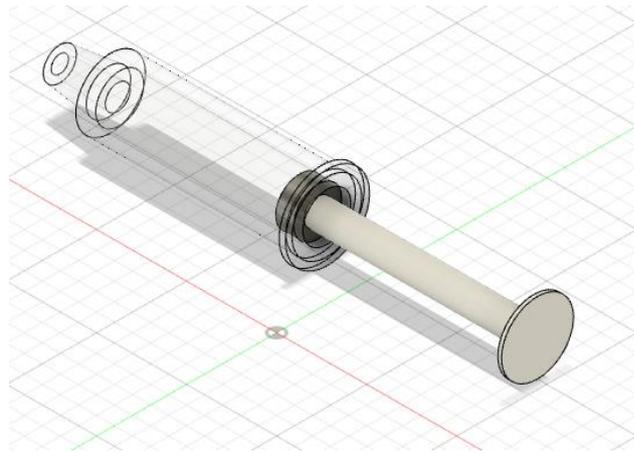


Figura 2.20. Modelado de Jeringa de 60 ml. Fuente: Elaboración Propia

La base de soporte que detiene el movimiento del cilindro exterior para que el pistón de la jeringa expulse el líquido se puede apreciar en la Figura 2.22. Este accesorio cuenta con un sistema desplazable para el ajuste de las jeringas que permiten regular el tamaño para trabajo con diferentes diámetros, el modelado de estos elementos se puede apreciar en la Figura 2.23.

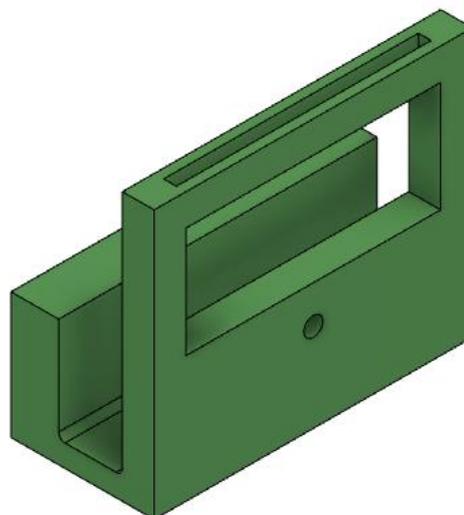


Figura 2.21. Modelado de Soporte de Jeringa. Fuente: Elaboración Propia

### **2.3.7. Planos de fabricación de componentes.**

A partir de los elementos conocidos y teniendo en consideración los requerimientos del sistema y los cálculos realizados se realizó el diseño y modelado de los siguientes elementos:

- Tablero de control del motor. Da protección al motor y mejora la estética del diseño al mantener los cables de conexión fuera del rango de visibilidad.
- Transmisor de potencia. Transfiere en forma regulada el movimiento lineal del sistema hacia la jeringa.
- Soporte de jeringa. Mantiene a la jeringa en la posición deseada para un correcto funcionamiento del sistema.

Los planos de fabricación de cada componente se encuentran en el Apéndice.

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1. Diseño del prototipo.

A partir de los elementos seleccionados para el sistema y de los componentes diseñados se realizó el ensamblaje del sistema de control de flujo para el dispensador de fluidos a base de electro spray.

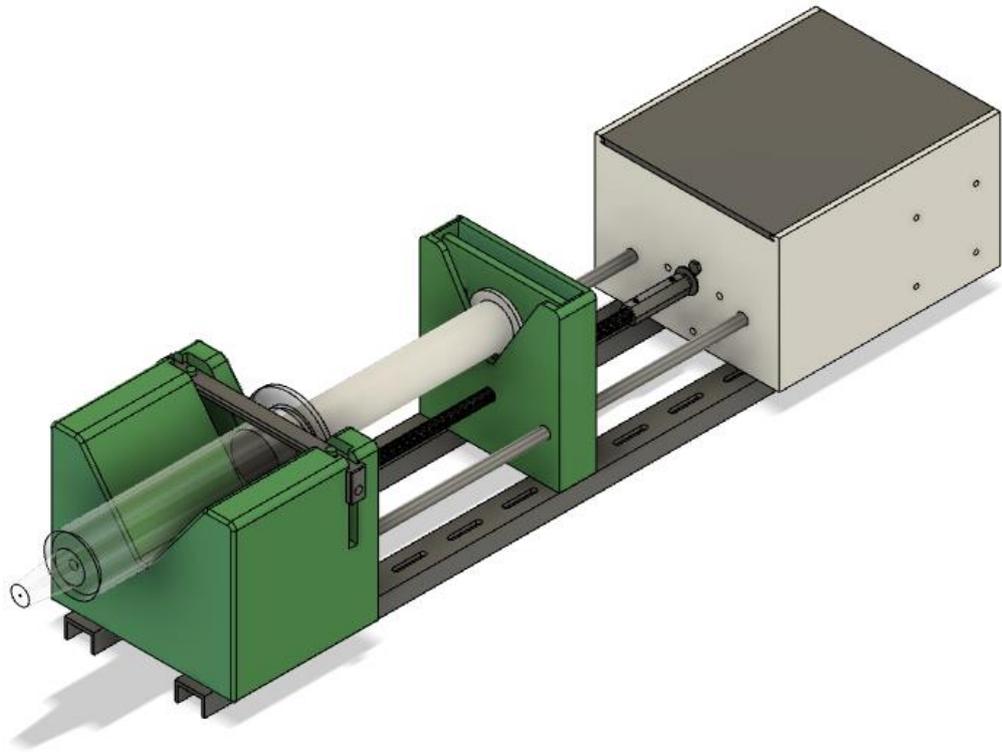


Figura 3.1. Prototipo del módulo de control de flujo

El sistema diseñado tiene una longitud máxima de 580.34 mm que está dentro del rango máximo de 600 mm requeridos por el cliente.

El sistema no pudo abarcar el rango inicial solicitado de 0,75  $\mu\text{l/h}$  a 20.000 ml/h, para cumplir este requerimiento era necesario obtener tanto un motor de mayor potencia como un controlador con mayor precisión. La obtención de equipos de mayor capacidad incrementaba considerablemente el costo de producción y por lo tanto no era una opción viable.

Con la finalidad de ampliar lo más posible el rango de control de flujo se diseñó el sistema de tal manera que pueda ser usado con jeringas de 1 a 60 ml que al trabajar en paralelo con el controlador de velocidad se obtuvo un rango de operación de 1ml/h a 160 ml/h.

Se calculó el torque máximo requerido por el sistema para su correcto funcionamiento, siendo éste 0,093 kg\*m

El código requerido para el módulo de sistema de control se realizó mediante el un Arduino y un puente H capaz de regular la velocidad angular del motor según sea requerido. Se usó el programa PYTHON para crear una interfaz de usuario donde sea posible ingresar el caudal requerido, y conforme a esta información el sistema indique que jeringa usar y establezca las vueltas por minuto requeridas. El código puede ser observado en la sección de apéndice.



Figura 3.2. Ventana de ingreso de caudal requerido

El código genera una ventana donde se ingresa la información de caudal requerido Figura. Mediante los datos obtenidos en la tabla, el programa asigna una jeringa en la cual el valor ingresado se encuentre dentro del rango de trabajo. Luego mediante la información de las jeringas resumida en la tabla y la ecuación 2.1 se obtienen la velocidad angular del motor.

Dado que el Arduino manda señales en forma de bits fue necesario encontrar la relación entre los rpm requeridos y los bits que generan la señal, para esto

se determinó experimentalmente la respuesta que se obtenía en el motor con diferentes señales y a partir de esta información se generó una ecuación de relación mediante regresión mediante la cual se determinó que la función que mejor representaba la relación era una hiperbólica de la cual se obtuvo la (3.24).

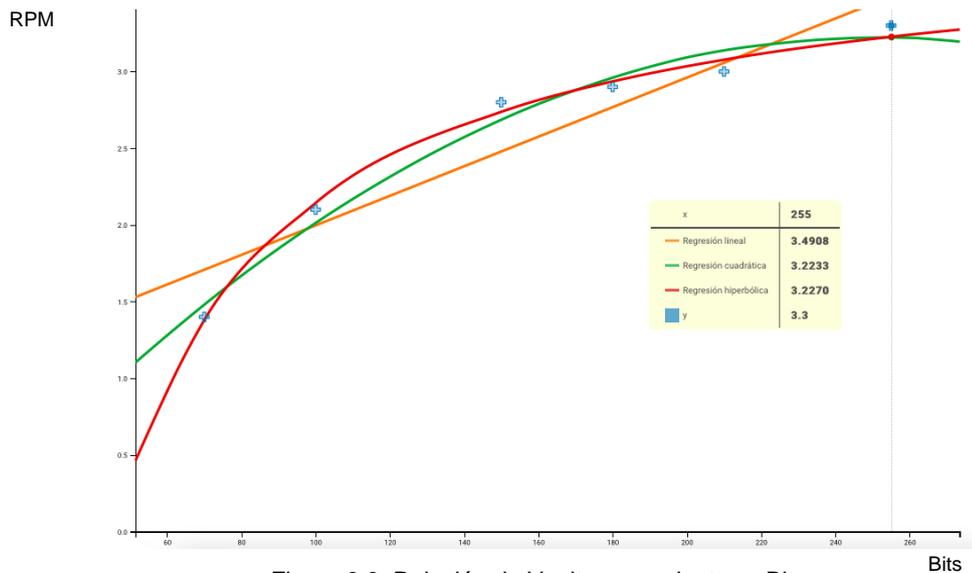


Figura 3.3. Relación de Vueltas por minuto vs Bits

$$y = 3.9261 - \frac{178.2829}{x} \quad (2.24)$$

Mediante la función de regresión hiperbólica se estableció la relación entre la señal en bits emitida por el Arduino y la velocidad resultante. Esta información fue usada en el código para que los datos ingresados por el usuario en el programa sean generados en la velocidad requerida para que el sistema emita el caudal deseado.

### 3.2. Validación del Sistema

Para verificar los datos teóricos obtenidos se realizó la fabricación y ensamblaje de un prototipo de equipo. Posteriormente, se ejecutaron pruebas de caudal las cuales fueron presentadas al cliente. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 3.15

**Tabla 3.1. Cálculo de error porcentual de los valores experimentales obtenido.**

Jeringa [ml]	Diámetro [mm]	Área [m <sup>2</sup> ]	Caudal Teórico [ml/h]	Caudal Experimental [ml/h]	%Error
1	4.4	1.52E-05	3.34	3.64	8.96%
60	29.3	6.74E-04	147.99	148.45	0.32%
60	29.3	6.74E-04	100	96.31	3.83%
60	29.3	6.74E-04	130	128.57	1.11%

De esta tabla de resultados podemos observar que los porcentajes de error al comparar los valores teóricos con los experimentales nunca exceden el 10%, lo cual implica que el diseño es confiable técnicamente. La Figura 3.27 muestra el prototipo fabricado.

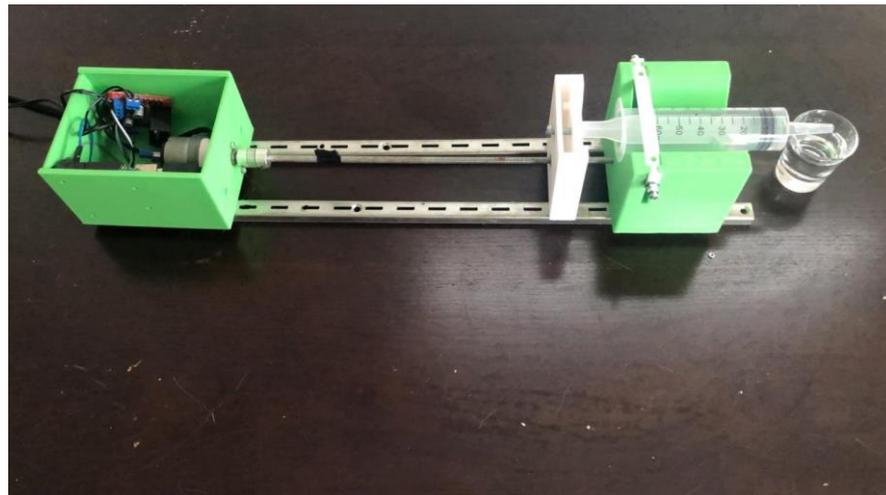


Figura 3.4. Bomba de Infusión Fabricada.

### **3.3. Análisis de Viabilidad Económica**

#### **3.3.1. Presupuesto de fabricación del equipo**

La inversión de los materiales y componentes requeridos para la elaboración del sistema de control de flujo son presentados en la Tabla 3.13.

**Tabla 3.2. Costo de los componentes del prototipo**

Descripción	Cantidad	Valor Unitario (\$)	Valor Total (\$)
Motor DC 3,5 RPM	1	\$19,50	\$19,50
Piezas de impresión en 3D	5 (19 ½ horas de impresión)	\$3/h	\$59,00
Acople de motor	1	\$8	\$8,00
Varilla roscada A304 M6x1mm	1	\$1,96	\$1,96
Varilla lisa M6x1mm	1	\$2,00	\$2,00
Riel Channel 1,5x1,6	1	\$6,00	\$6,00
Prisioneros M2x2,50	4	\$0,0893	\$0,36
Pernos M3x20mm	5	\$0,018	\$0,09
Pernos M4x20mm	10	\$0,027	\$0,27
Tuerca galvanizada M6	3	\$0,0268	\$0,09
Tuerca galvanizada M4	8	\$0,018	\$0,14
Fuente de alimentación 12 V	1	\$7,00	\$7,00
Jeringas (1ml,5ml y60ml)	3	Varios	\$1,20
Terminales de conexión	2	\$0,20	\$0,40
Arduino	1	\$15,00	\$15,00
Puente H	1	\$6,00	\$6,00
<b>Costo de Producción</b>			<b>\$129,00</b>

### 3.3.2. Costo de bomba en el mercado nacional

Se realizó la cotización de una bomba de infusión por jeringa de similares características a la fabricada en el mercado nacional, de lo cual se obtuvo la bomba de infusión “CONTEC SP750” (Figura 3.25). Su rango de flujo es

de 1ml/h – 699 ml/h y cuenta con una batería de 4 horas de duración. (SYAMED, 2020). Este equipo está valorado nacionalmente en \$699,00.



Figura 3.4. Bomba de Infusión CODEC (SYAMED, 2020)

### 3.3.3. Costo de la bomba tipo jeringa internacional

Se cotizo una bomba tipo jeringa “HOSPIRA LIFECARE PCA 3 SYRINGE INFUSION PUMP “(*Figura 26*) en DiaMedical USA, la cual está valorada en \$945 precio en Estados Unidos.



Figura 3.5. Bomba de infusión de importación.

El precio de la bomba importada a Ecuador tendría un valor adicional debido al costo de nacionalización que se debe cancelar. Para esto se encontró que las bombas tipo jeringa se clasifican en la subpartida arancelaria “9018.90.90.00” según la Nomenclatura de designación y Codificación de mercancías del Ecuador (PUDELECO, 2017). Como resultado se obtuvo que el costo total del producto importado a Ecuador es \$ 1392.97 como se muestra en la tabla 3.13.

**Tabla 3.3. Costos de importación**

(+) Costo del producto	\$ 945,00
(+) Flete marítimo	\$ 40,00
(+) Seguro 1%(Producto + flete)	\$ 9,85
(=) CIF (costo+transporte+seguro)	\$ 994,85

**Tabla 3.4. Cálculo de impuestos para importación**

(+) FODINFA (CIF *0.5%)	\$ 4,97
(+) IVA (FODINFA + CIF*12%)	\$ 124,35
(=) Total de impuestos	\$ 129,32

**Tabla 3.5. Costo total de la nacionalización de la bomba tipo jeringa**

(=) CIF	\$ 994,85
(+) Impuestos	\$ 129,32
(+) Costo de agente aduanero	\$ 268,60
(=) Costo total del producto	\$1.392,97

El costo total de la importación del producto es \$447,97 que representa casi el 50% del costo del producto.

### 3.3.4. Comparación de Costos.

Para poder realizar comparación de costos se resumió la información de los diferentes métodos de adquisición de la bomba de infusión en la Tabla 3.16.

**Tabla 3.6. Comparación de bombas de infusión**

Tipo de Bomba	Rango de Trabajo	Costo
Fabricación de Bomba de Infusión Diseñada	1 ml/h – 160 ml/h	\$129,00
Compra Nacional de Bomba CODEC	1 ml/h – 600 ml/h	\$690,00
Importación de Bomba HOSPIRA	1 ml/h – 800 ml/h	\$1.392,97

De los resultados obtenidos podemos observar que el proyecto representa un ahorro de \$586,00 en comparación con la bomba nacional, y un ahorro de \$1378,97 en comparación con la bomba importada. Por lo que podemos decir que el proyecto es viable económicamente, pero los rangos de operación son menores que ambas bombas.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

- A través del análisis del sistema se pudo determinar que el rango de caudal establecido inicialmente de 0,75  $\mu$ l/h a 2.000 ml/h representaba una inversión económica de motor y equipos de control demasiado elevada. Esto nos llevó a reducir el rango del sistema de 1ml/h a 130 ml/h.
- Se realizaron los dibujos CAD y planos de fabricación de los componentes. A partir del modelo realizado se determinó que el sistema diseñado cumple con la dimensión requerida para ser incluido en dispensador de fluidos a base de electrospray.
- Por medio de la fabricación del sistema se pudo corroborar que el diseño realizado es factible, ya que al comparar los valores de caudal experimental con los datos calculados teóricamente se obtuvo un porcentaje de error menor al 10% en todos los casos.
- El costo final de fabricación del sistema de módulo de control de flujo fue de \$129,00. Al compararlo con los costos de \$1.392,97 por la compra e importación de un equipo de similares características y con el costo de compra de \$699,00 por una bomba de infusión en el mercado nacional, nos permite concluir que el proyecto es viable y representa un ahorro considerable.

### 4.2. Recomendaciones

- Se recomienda analizar la posibilidad de implementar un sistema de control electrónico que permita el accionamiento de un motor adicional de mayor velocidad. El incluir un motor para la distribución de caudales de mayor valor permitiría alcanzar la razón de flujo de 2.000 ml/h, mientras que el motor de menores vueltas por minuto permitiría obtener mayor precisión a caudales más bajos.

- Se sugiere adquirir un controlador de velocidad de mejor calidad. Un equipo que pueda regular con mayor precisión el caudal de salida del sistema permitiría obtener caudales menores a los del sistema diseñado, lo cual implicaría un valor mínimo más cercano al de 0,75  $\mu\text{l/h}$  deseado inicialmente.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] Adamson, Arthur W. "Physical Chemistry of Surfaces", s. f., 12.
- [2] Alejandro, Chicaiza Poluchi Diego. "DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE BOMBEO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE BARBOTINA EN LA EMPRESA FV ÁREA ANDINA S.A.", s. f., 102.
- [3] Castillo-Orozco, Eduardo, Aravinda Kar, y Ranganathan Kumar. "Non-Dimensional Groups for Electrospray Modes of Highly Conductive and Viscous Nanoparticle Suspensions». *Scientific Reports* 10, n.º 1 (10 de marzo de 2020): 4405. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61323-5>.
- [4] Chen, X. B., G. Shoenau, y W. J. Zhang. "Modeling of time-pressure fluid dispensing processes». *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing* 23, n.º 4 (octubre de 2000): 300-305. <https://doi.org/10.1109/6104.895075>.
- [5] Chica Muñoz, Jaime Gabriel, y David Ejanier Suárez Taco. "Diseño y construcción de una bomba tipo jeringa de bajo costo". B.S. thesis, Espol, 2019.
- [6] Escobar Restrepo, Juliana. "Diseño y construcción de un prototipo de una jeringa de infusión para neonatología", 27 de abril de 2007. <http://repository.eafit.edu.co/handle/10784/288>.
- [7] Fenn, John B., Matthias Mann, Chin Kai Meng, Shek Fu Wong, y Craige M. Whitehouse. "Electrospray ionization—principles and practice". *Mass Spectrometry Reviews* 9, n.º 1 (1990): 37-70.
- [8] García López, Félix Antonio. "Sistema controlable de bomba de jeringa para micro fluidos", 2019.
- [9] Gaskell, Simon J. "Electrospray: principles and practice". *Journal of mass spectrometry* 32, n.º 7 (1997): 677-88.
- [10] "Hospira LifeCare PCA 3 Syringe Infusion Pump | DiaMedical USA". Accedido 18 de enero de 2021. <https://diamedicalusa.com/medical-equipment/infusion-dialysis/infusion-pumps/hospira/hospira-lifecare-pca-3-syringe-infusion-pump-3/>.
- [11] "La Casa del Perno - Resistencia de Pernos y Tuercas". Accedido 2 de febrero de 2021. [http://www.casadelperno.com/AyudaTecnica\\_Resistencia.html](http://www.casadelperno.com/AyudaTecnica_Resistencia.html).
- [12] Le Guen, M., y A. Bodin. "Bombas y jeringas de perfusión: principios de funcionamiento". *EMC-Anestesia-Reanimación* 45, n.º 3 (2019): 1-8.

- [13] Norton, Robert L. *Diseño de Máquinas Un Enfoque Integrado Cuarta Edición*. Cuarta edición. México: Pearson Educación, 2011.
- [14] Reyes-González, E. A., S. Tello-Mijares, y J. J. Linares-Aranda. "Diseño y fabricación de bomba de infusión tipo jeringa para el análisis de muestras de Papanicolau en citología líquida". *Revista Ciencia* 1 (2019).
- [15] Saidi, Imen, Lilia Amraoui, y Mohamed Benrejeb. "Design of an Electrical Syringe Pump Using a Linear Tubular Step Actuator". *International Journal on Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering*, 1 de noviembre de 2010.
- [16] Singh, R. Paul, y Dennis R. Heldman. *Introduction to Food Engineering*. 4th ed. Food Science and Technology International Series. Amsterdam; Boston: Elsevier/Academic Press, 2009.
- [17] Zuluaga, Catalina Tobón, Natalia Higuera Castro, y Róbinson Torres Villa. "Diseño y construcción del prototipo de una bomba de infusión tipo PCA para la administración de medicamentos". *Revista CES Medicina* 17, n.º 2 (2003): 31-35.

# APÉNDICES

## APÉNDICE A

### CÓDIGO PYTHON PARA CONTROLADOR DE CAUDAL

```
import tkinter as tk
import sys
import serial
import time

ser = serial.Serial("COM3",9600,timeout=1) #Iniciar comunicación serial
time.sleep(1)

#Crear ventana
root = tk.Tk()
root.title("Control de Caudal")
root.geometry("300x230")
root.config(bg="white")

#Variables globales, caudal ingresado y área de las jeringas
caudalValor = tk.IntVar(value=0)
areaValor = tk.DoubleVar(value=0)

def calcular_jeringa(self):
    if not entryCaudal.get().isdigit(): #Mostrar error si ingresa letras o decimales
        labelCaudal.config(text="Debe ingresar un valor entero entre 1 y 130")
        labelJeringa.config(text="")
        caudalValor.set(int(0))
    else:
        caudalValor.set(int(entryCaudal.get()))
        if caudalValor.get() >= 1 and caudalValor.get() <= 3:
            labelCaudal.config(text="Caudal: "+str(caudalValor.get()) + " ml/h")
            labelJeringa.config(text="Jeringa requerida: 1 ml")
            areaValor.set(float(1.52 * (10**-5)))
        elif caudalValor.get() >= 4 and caudalValor.get() <= 11:
```

```

    labelCaudal.config(text="Caudal: "+str(caudalValor.get()) + " ml/h")
    labelJeringa.config(text="Jeringa requerida: 3 ml")
    areaValor.set(float(5.89 * (10**-5)))
elif caudalValor.get() >= 12 and caudalValor.get() <= 22:
    labelCaudal.config(text="Caudal: "+str(caudalValor.get()) + " ml/h")
    labelJeringa.config(text="Jeringa requerida: 5 ml")
    areaValor.set(float(1.14 * (10**-4)))
elif caudalValor.get() >= 23 and caudalValor.get() <= 32:
    labelCaudal.config(text="Caudal: "+str(caudalValor.get()) + " ml/h")
    labelJeringa.config(text="Jeringa requerida: 10 ml")
    areaValor.set(float(1.65 * (10**-4)))
elif caudalValor.get() >= 33 and caudalValor.get() <= 56:
    labelCaudal.config(text="Caudal: "+str(caudalValor.get()) + " ml/h")
    labelJeringa.config(text="Jeringa requerida: 20 ml")
    areaValor.set(float(2.87 * (10**-4)))
elif caudalValor.get() >= 57 and caudalValor.get() <= 130:
    labelCaudal.config(text="Caudal: "+str(caudalValor.get()) + " ml/h")
    labelJeringa.config(text="Jeringa requerida: 60 ml")
    areaValor.set(float(6.74 * (10**-4)))
else:
    labelCaudal.config(text="Debe ingresar un valor entero entre 1 y 130")
    labelJeringa.config(text="")
entryCaudal.delete(0,'end')

```

```
def iniciar_secuencia(self):
```

```
    caudalIMM = caudalValor.get() * 1000 / 3600
```

```
    velocidad = float(caudalIMM) / (float(areaValor.get()) * 1000000)
```

```
    rpm = float(velocidad) * 60
```

```
    bit = 178.2829 / (3.9261 - float(rpm))
```

```
if caudalValor.get() == 1:
```

```
    bit = 70
```

```
if caudalValor.get() == 4:
```

```
    bit = 70
```

```
ser.write((str(int(bit))+"*").encode())#Se envía por serial el valor PWM para el motor
time.sleep(.2)
```

```
def detener_secuencia(self):
    ser.write("0*".encode())
    time.sleep(.2)
```

```
def reiniciar_secuencia(self):
    ser.write("-1*".encode())
    time.sleep(.2)
```

```
labelIngresar = tk.Label(
    text = "Ingrese el caudal (Rango: 1-130)",
    background = "white"
)
labelIngresar.pack()
```

```
entryCaudal = tk.Entry(
    width=25
)
entryCaudal.pack()
```

```
calcular = tk.Button(
    text="Calcular Jeringa",
    width=25,
    bg="gray",
    fg="white"
)
calcular.bind("<Button-1>",calcular_jeringa)
calcular.pack()
```

```
labelCaudal = tk.Label(
    text = "",
    background = "white"
```

```
)
labelCaudal.pack()

labelJeringa = tk.Label(
    text = "",
    background = "white"
)
labelJeringa.pack()

start = tk.Button(
    text="Iniciar",
    width=25,
    bg="green",
    fg="white",
)
start.bind("<Button-1>",iniciar_secuencia)
start.pack()
stop = tk.Button(
    text="Detener",
    width=25,
    bg="red",
    fg="white",
)
stop.bind("<Button-1>",detener_secuencia)
stop.pack()
restart = tk.Button(
    text="Reiniciar",
    width=25,
    bg="gray",
    fg="white",
)
restart.bind("<Button-1>",reiniciar_secuencia)
restart.pack()
root.mainloop()
```

## APÉNDICE B

### Proceso para obtener $n$ y $K$ a través del software ANSYS.

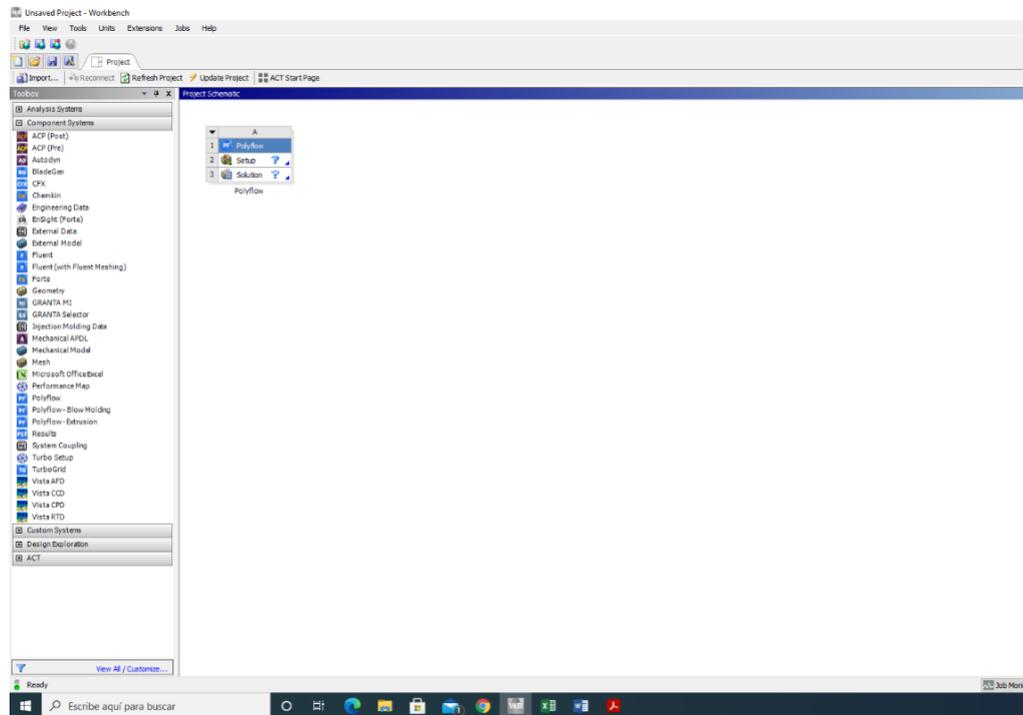


Figure 1. Ingreso al componente del sistema POLIFLOW

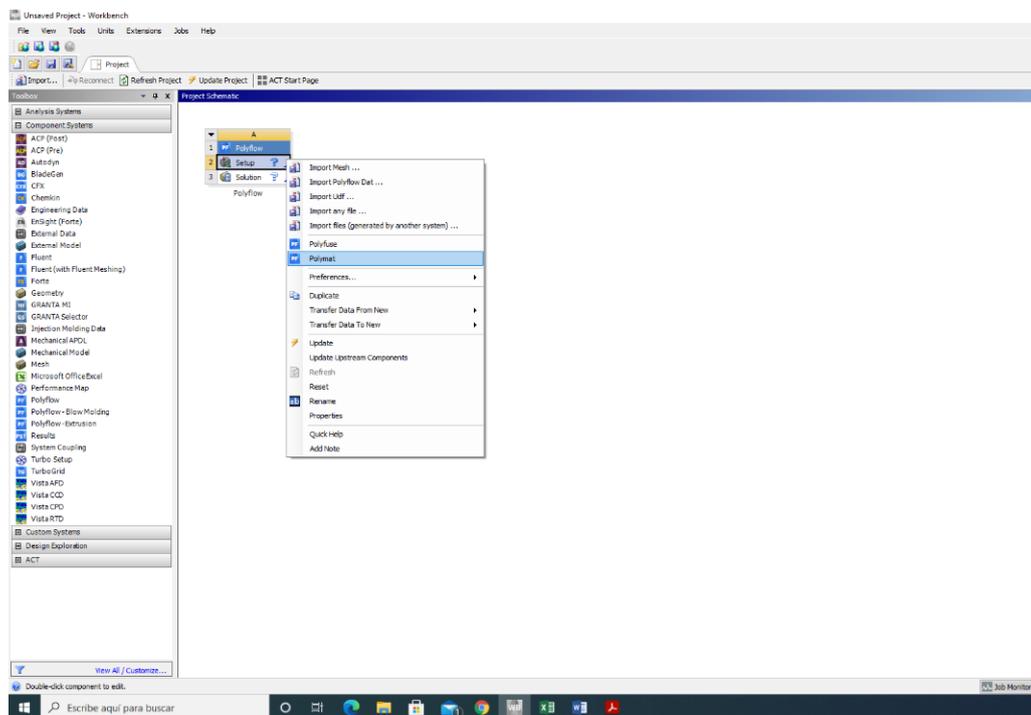


Figure 2. Ingreso a POLIMAT (clic derecho en setup)

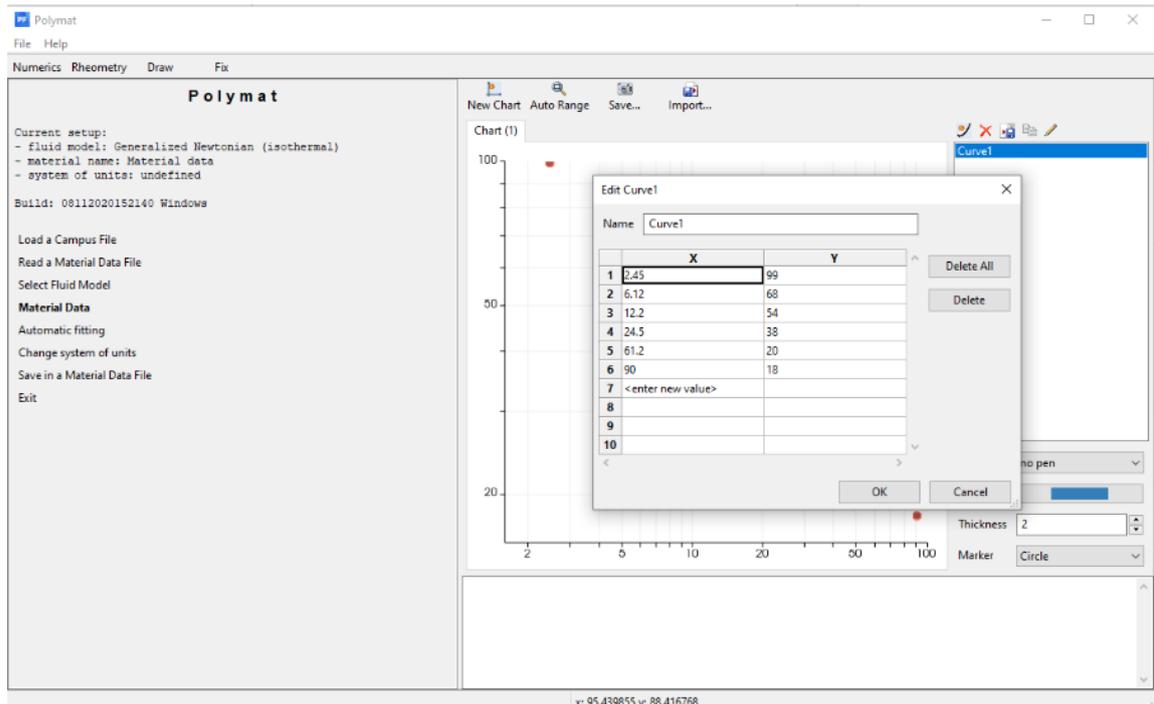


Figure 3. Ingreso de valores de viscosidad relativa en el eje Y, y velocidad de corte en el eje X

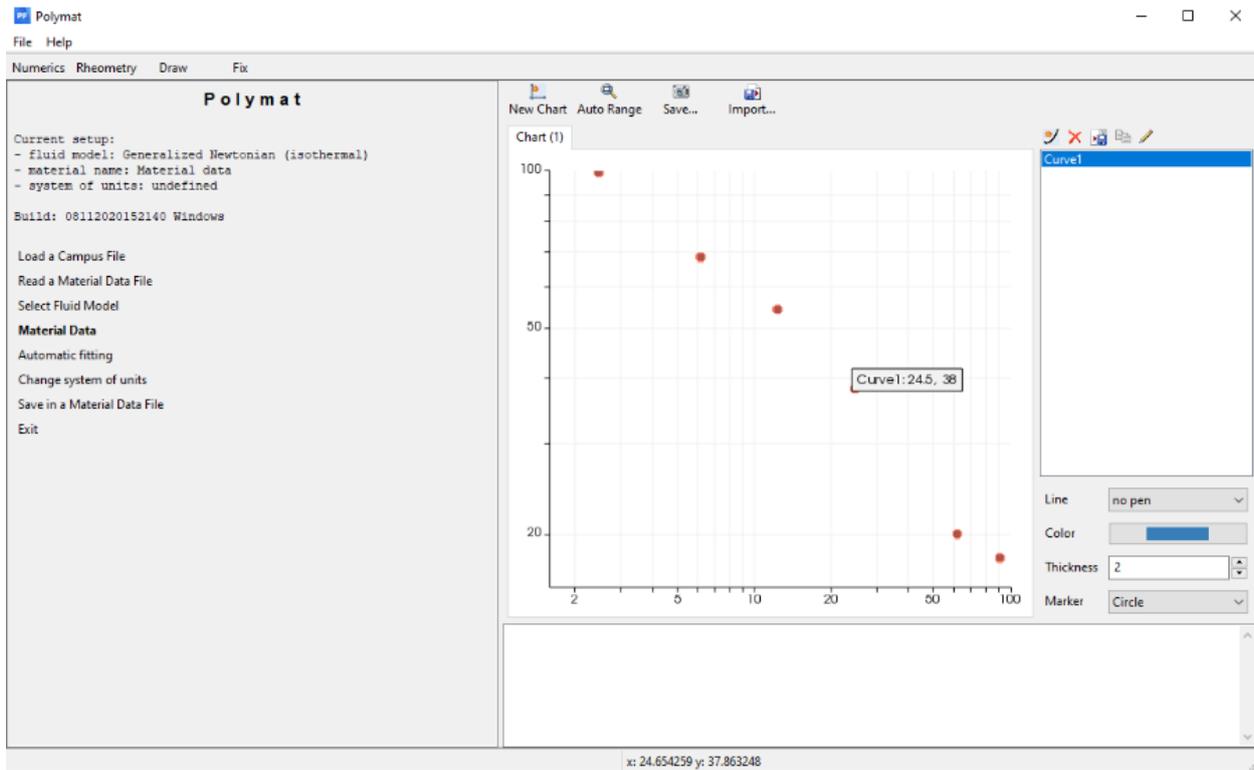


Figure 4. Al guardar los datos se muestran los puntos para la curva

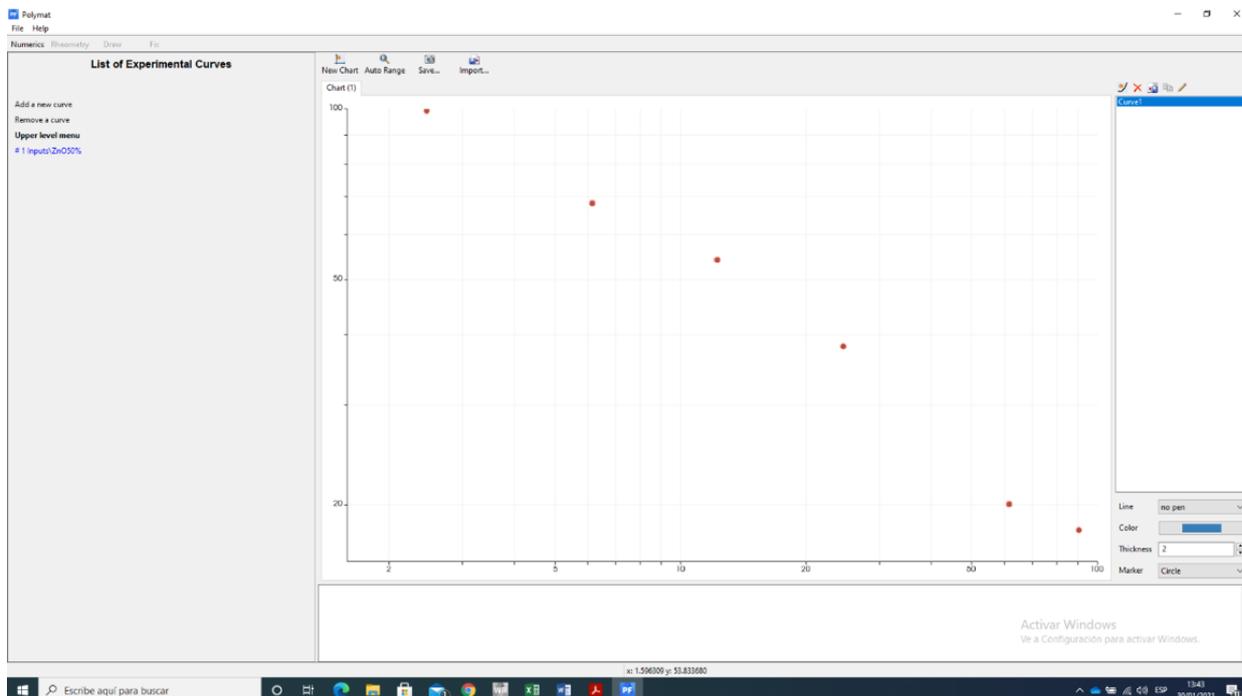


Figure 5. Se agregó la misma curva guardada como ZnO50%

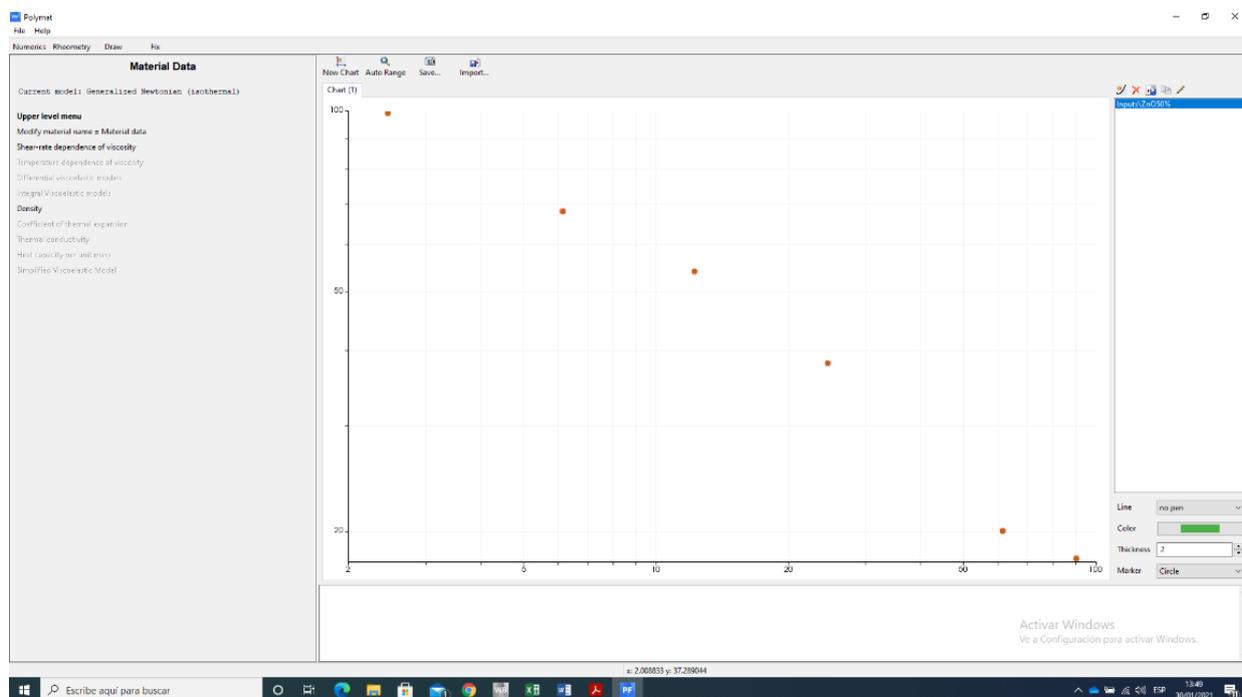


Figure 6. Se escogió la dependencia de la viscosidad con la velocidad de corte mediante

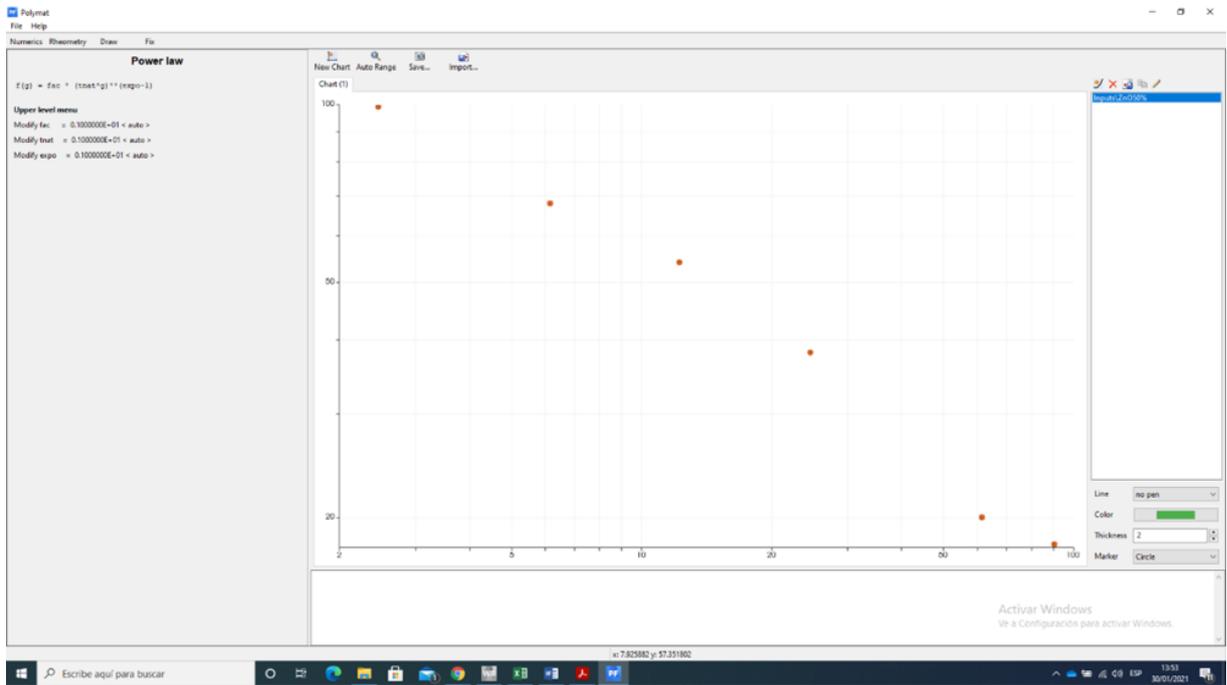


Figure 7. Se escogió el modelo de Ley de potencia

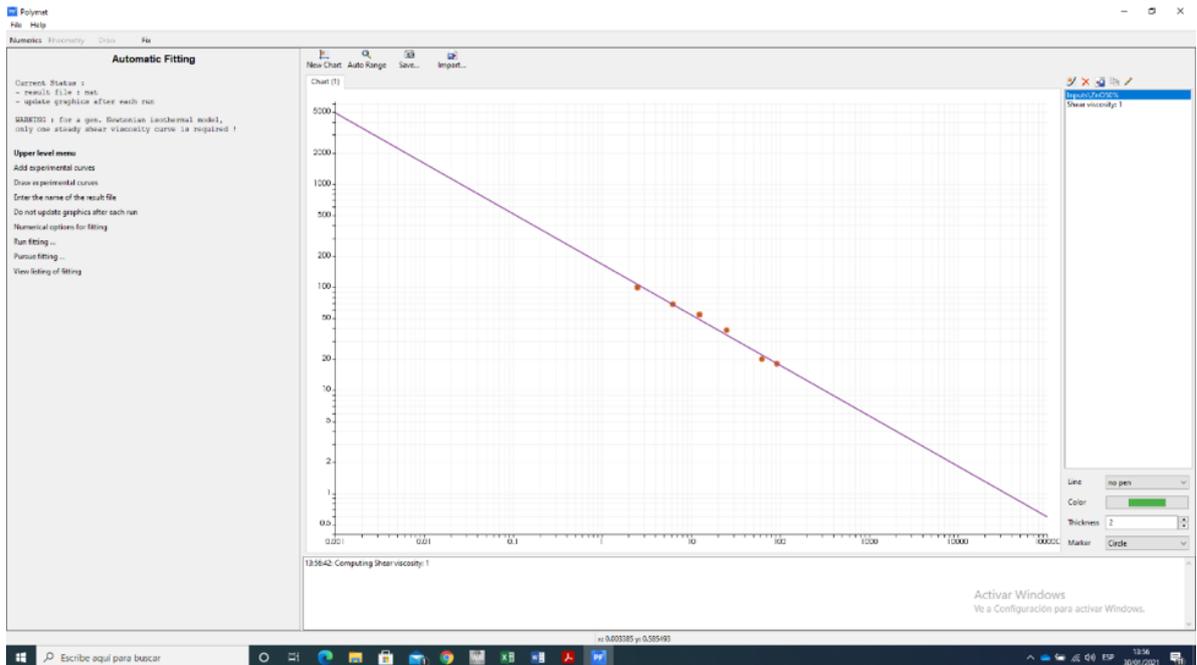
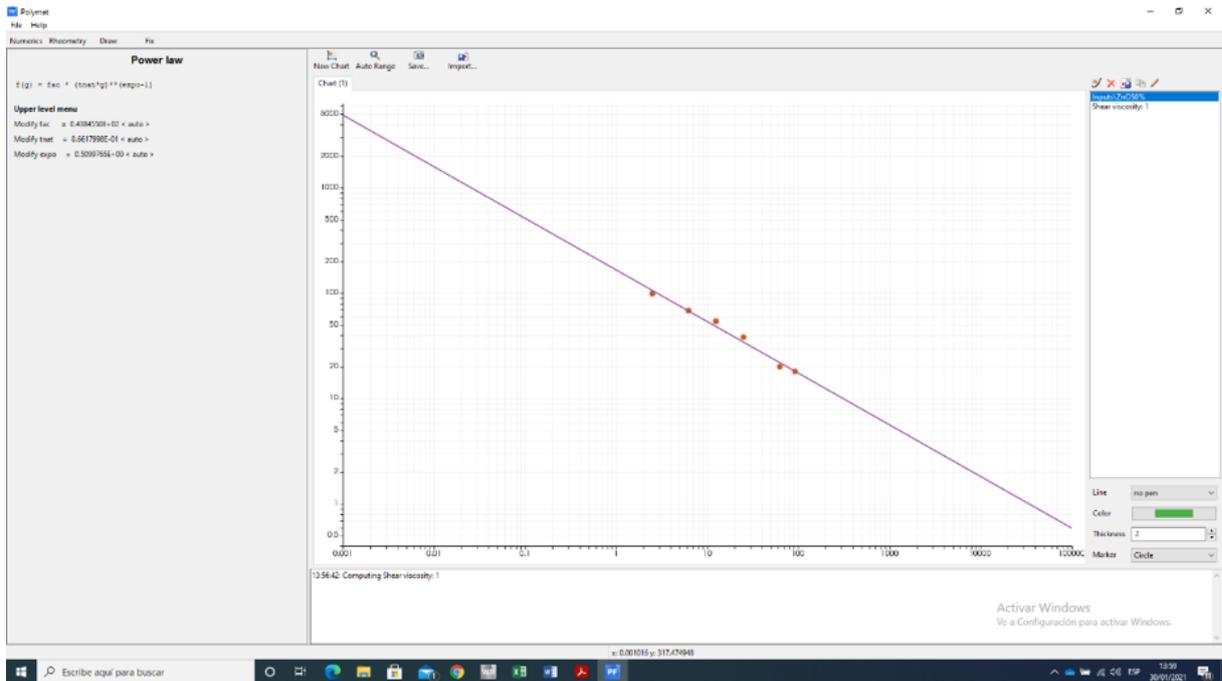
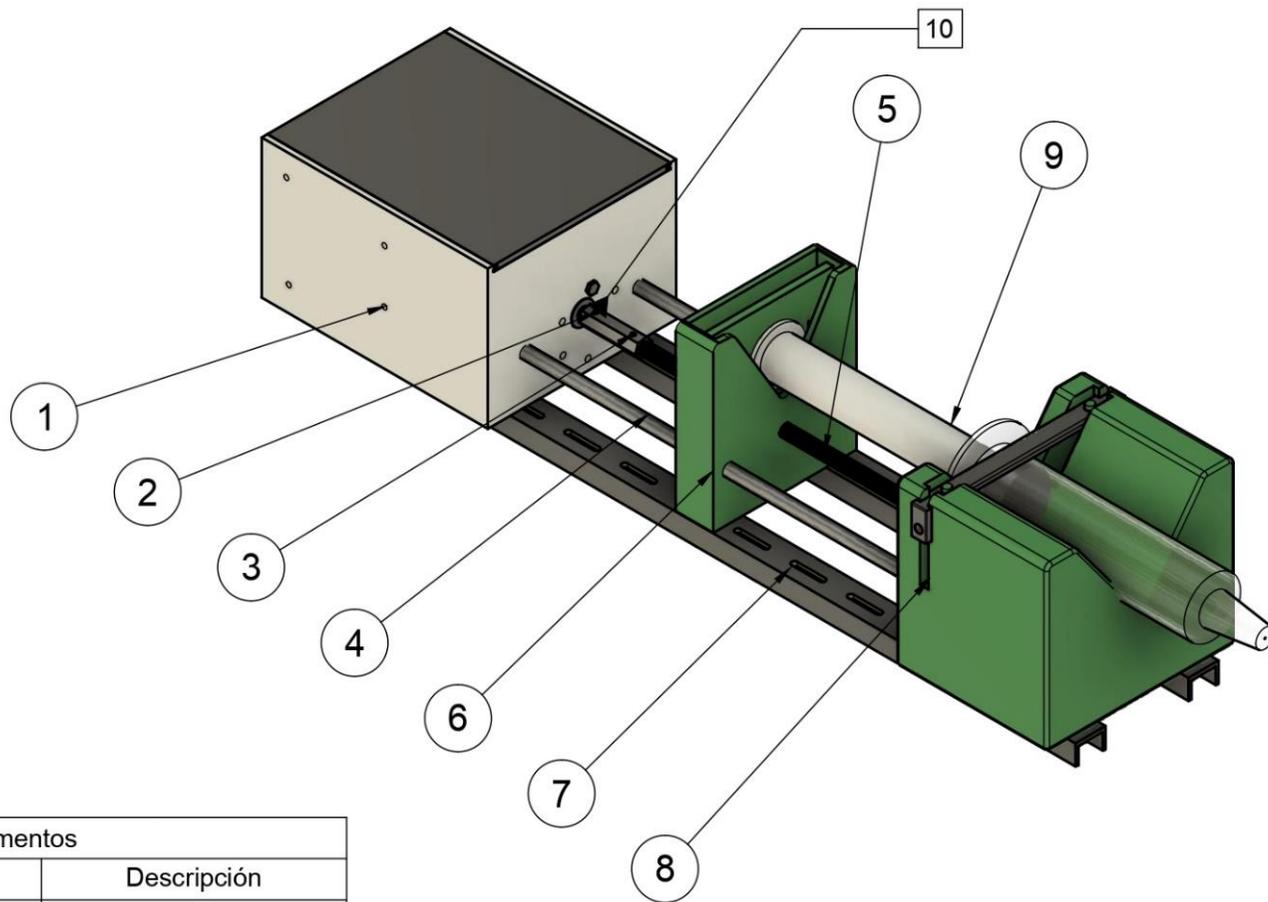


Figure 8. Se realizó el run fitting en la sección Automatic fitting (Cálculo automático de las constantes n y K)



**Figure 9. Se regresó al modelo de Ley de potencia donde se observa que los valores de n y K han sido generados automáticamente, los cuales son  $n=0.5099$  y  $K=43.84$**

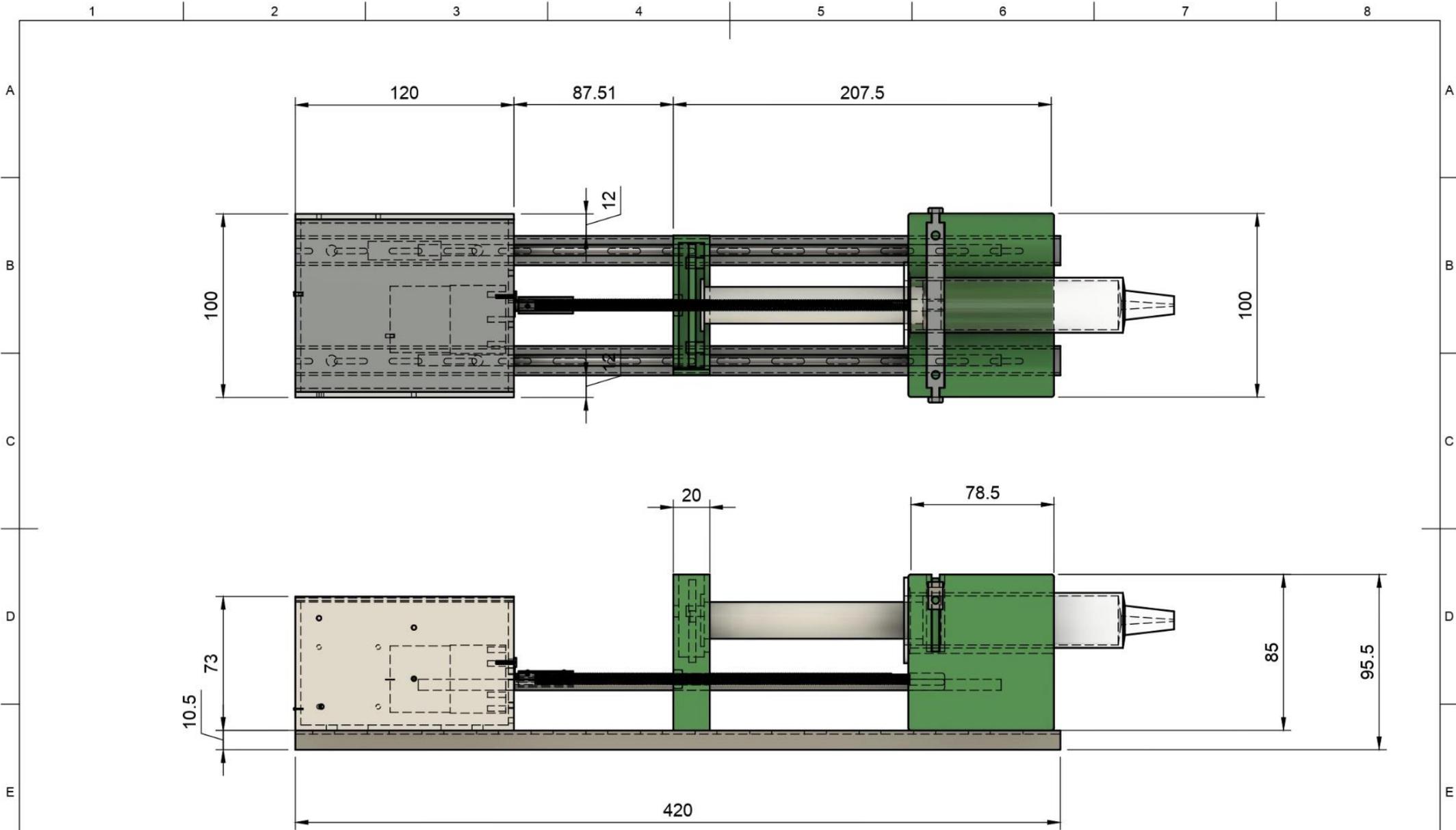
**APÉNDICE C**  
**PLANOS DE FABRICACIÓN**



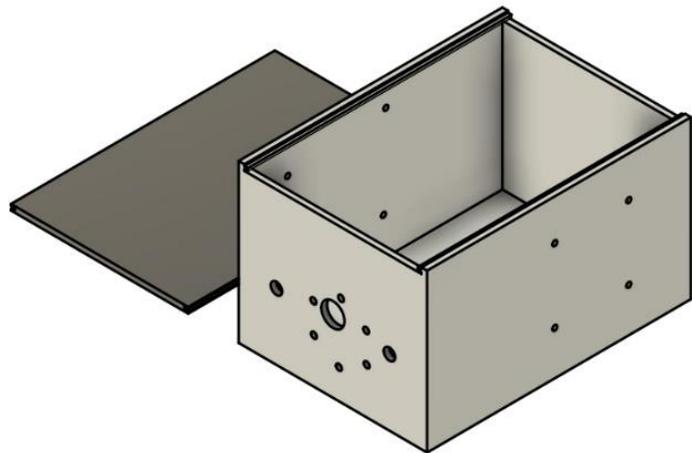
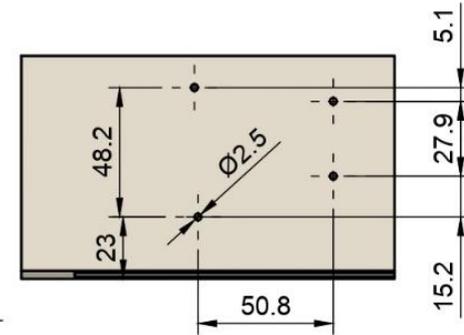
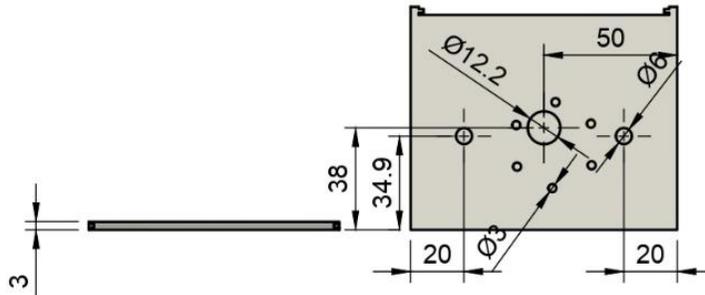
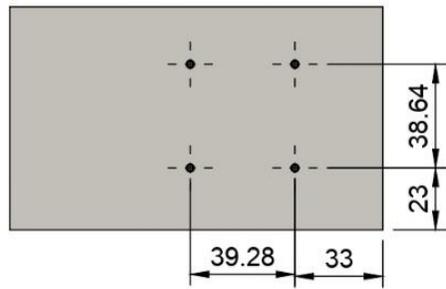
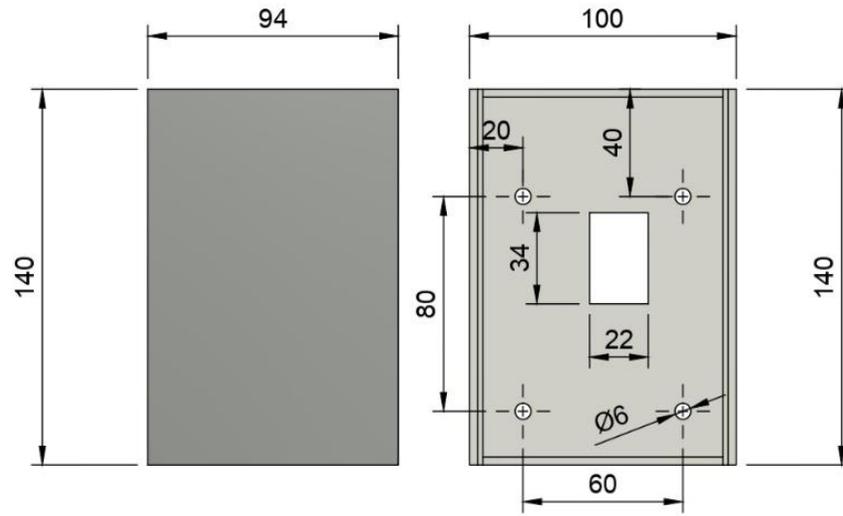
Listado de Elementos

Item	Cant.	Nombre	Descripción
1	1	Caja de Control	Impresión 3D
2	1	Acople	Tuerca larga hexagonal
3	3	Prisionero	M2x2,5
4	1	Varilla Lisa	M6 Hierro
5	1	Varilla Roscada	M6 Inoxidable
6	1	Transmisor de Potencia	Impresión 3D
7	2	Riel Guia	Hierro
8	1	Base de Apoyo	Impresión 3D
9	1	Jeringa	1 - 60 ml
10	1	Motor DC	5 RPM/ 24 Va

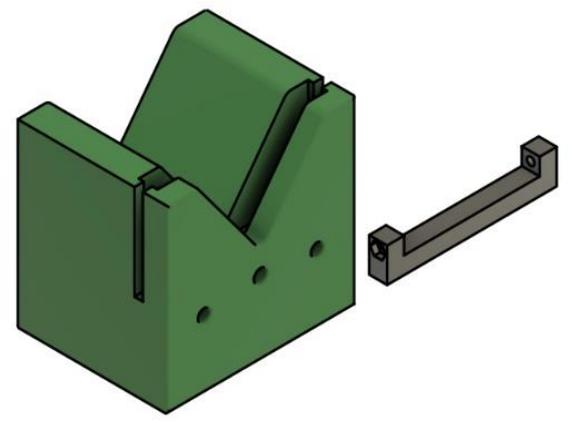
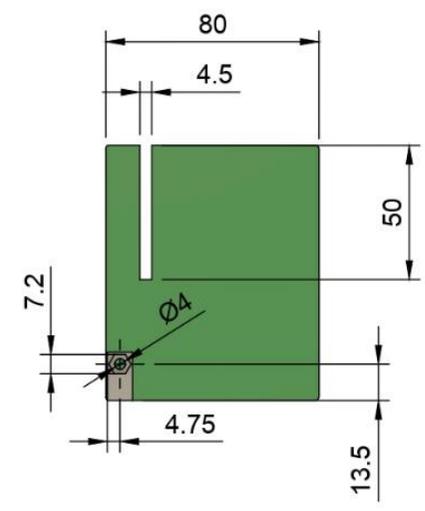
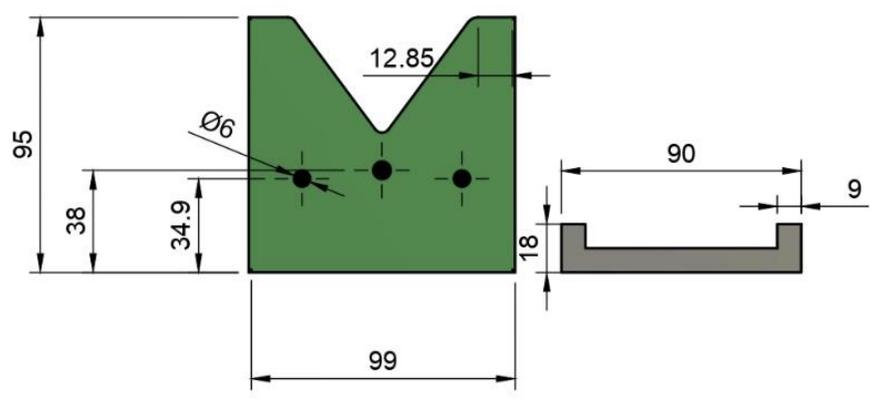
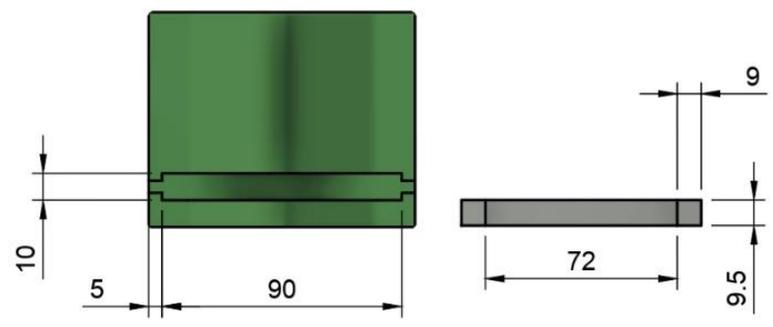
Dept.	Technical reference	Created by <b>Michael Ruiz, Rodrigo Gonzales</b>	Approved by <b>Ing. Eduardo Castillo</b>
		Document type <b>Listado de Elementos</b>	Document status
		Title <b>Ensamblaje</b>	DWG No. <b>1</b>
Rev.	Date of issue <b>19/1/2021</b>	Sheet <b>1/1</b>	



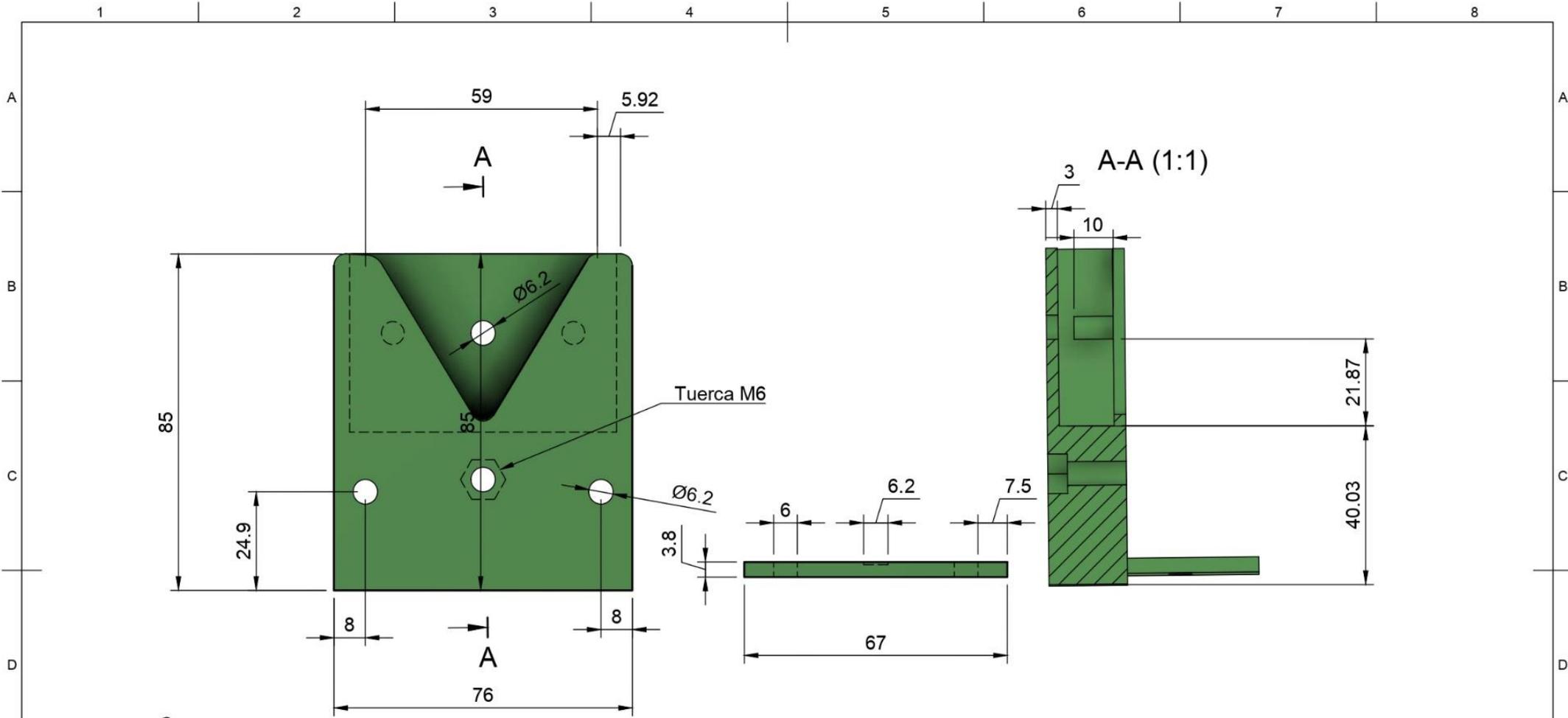
Dept.	Technical reference	Created by <b>Michael Ruiz, Rodrigo Gonzales</b>	Approved by <b>Ing. Eduardo Castillo</b>
		Document type <b>Dimensiones Generales</b>	Document status
		Title <b>Ensamblaje</b>	DWG No. <b>2</b>
Rev.	Date of issue	Sheet <b>1/1</b>	



Dept.	Technical reference	Created by <b>Michael Ruiz, Rodrigo Gonzalez</b>	Approved by <b>Ing. Eduardo Castil</b>
		Document type <b>Planos de Fabricación</b>	Document status
		Title <b>Tablero de Control</b>	DWG No. <b>3</b>
Rev.	Date of issue	Sheet <b>1/1</b>	

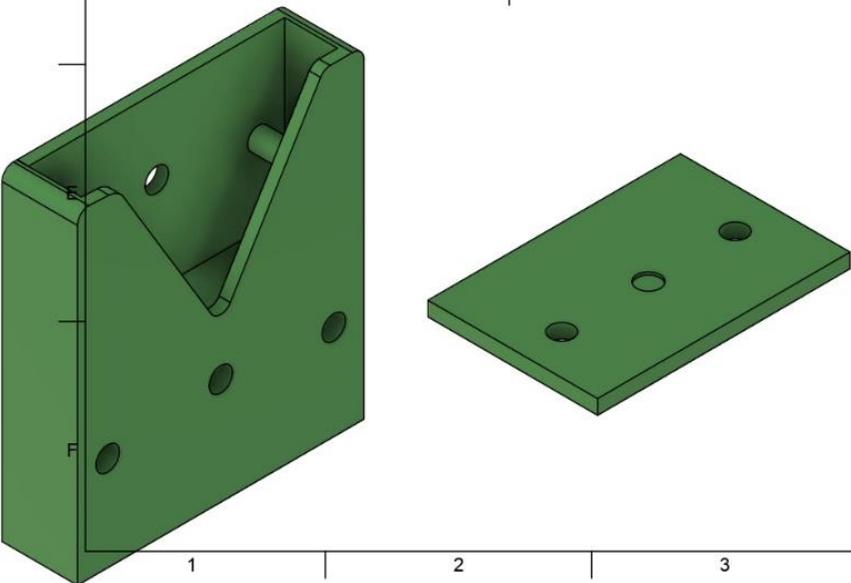


Dept.	Technical reference	Created by <b>Michael Ruiz, Rodrigo Gonzalez</b>	Approved by <b>Ing. Eduardo Castillo</b>
	Document type <b>Planos de Fabricación</b>	Document status	
	Title <b>Soporte de Jeringa</b>	DWG No. <b>4</b>	
	Rev.	Date of issue	Sheet <b>1/1</b>



Tuerca M6

A-A (1:1)



Dept.	Technical reference	Created by Michael Ruiz, Rodrigo Gonzales	Approved by Ing. Eduardo Castillo
		Document type Plano de Fabricación	Document status
		Title Transmisor de Potencia	DWG No. 5
Rev.	Date of issue	Sheet 1/1	