

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

"Diseño y construcción de una bomba tipo jeringa de bajo costo"

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Jaime Gabriel Chica Muñoz

David Ejanier Suárez Taco

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2018

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, quienes me demostraron su apoyo en todo lo que emprendí. Dedico también este trabajo a todos mis sobrinos, con los cuales lucho día a día para llegar a ser un ejemplo para ellos.

David Ejanier Suárez Taco

Dedico este trabajo a mi Abuelita Carmen, quien me demostró su infinito amor y su incondicional apoyo cada día de su vida.

Jaime Gabriel Chica Muñoz

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Ing. Geancarlos Zamora por contribuir con su conocimiento, ideas y soporte técnico durante la realización de este proyecto.

Agradezco a Dios por las bendiciones en mi vida, agradezco a mis padres por el apoyo infinito a cada momento y por inspirarme a ser mejor cada día. Agradezco a mis amigos: Danny Olmedo y Nicolás Chaves por su ayuda durante el proyecto.

David Ejanier Suárez Taco

Agradezco a Dios por la familia que tengo y por darme salud a lo largo de mi carrera universitaria. A mis padres por el eterno amor brindado y a mis hermanos por apoyarme en cada paso que doy. A mi compañero de tesis David Suárez por el trabajo en conjunto realizado y a Joselyn Pezo por su incondicional apoyo.

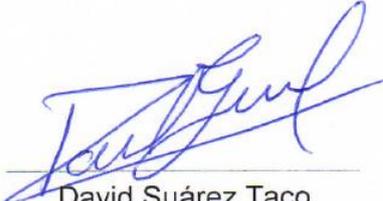
Jaime Gabriel Chica Muñoz

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Jaime Gabriel Chica Muñoz* y *David Ejanier Suárez Taco* damos 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”

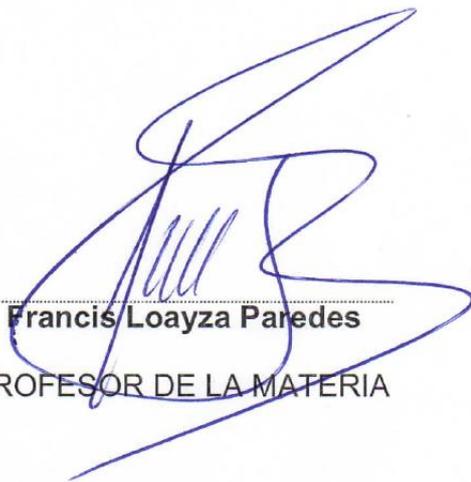


Jaime Chica Muñoz

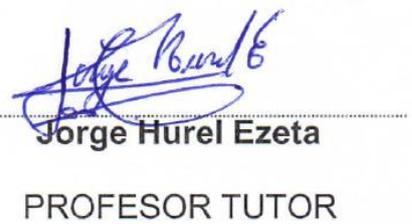


David Suárez Taco

EVALUADORES



Francis Loayza Paredes
PROFESOR DE LA MATERIA



Jorge Hurel Ezeta
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

El presente proyecto consistió en el diseño y construcción de una bomba tipo jeringa, el cual es un equipo que forma parte del sistema electrospinning que se desea implementar en el laboratorio de mecatrónica de la FIMCP para el estudio de nanofibras. Sin embargo, este equipo posee un costo elevado y no está disponible en el mercado local. Por tal motivo se procedió a diseñar y construir un prototipo de bajo costo, teniendo como objetivo el diseño del sistema de transmisión, sistema de control PID y fabricación de piezas impresas en 3D.

De esta forma, se procedió a seleccionar un motor de paso y un tornillo sin fin para el sistema de transmisión, mientras que para el sistema de control se utilizó un sensor de presión. Con el objetivo de lograr un flujo continuo se procedió a realizar un sistema de reducción de velocidades mediante la opción de micro pasos del driver del motor. Adicionalmente, el diseño del controlador PID del sistema de control fue sustituido por un controlador PI debido a mayor eficiencia y semejanza con el sistema, sin embargo, se procedió a utilizar un sistema de lazo abierto, ya que no se obtuvieron caudales constantes con la implementación del controlador PI.

Finalmente, se concluyó que la bomba tipo jeringa logró un flujo constante y preciso operando en lazo abierto, cuyo costo fue del 20% en comparación con una bomba jeringa importada. Además, debido al dimensionamiento del motor, el equipo puede operar con fluidos de viscosidades 30 veces mayores al de la celulosa.

Palabras Clave: Electrospinning, nanofibras, sistema de control, viscosidades.

ABSTRACT

The present project consisted in the design and construction of a syringe pump, which is part of the electrospinning system that will be implemented in the Mechatronics laboratory of the FIMCP for the study of nanofibers. However, this equipment has a high cost and is not available in the local market. For this reason, we proceeded to design and build a low-cost prototype, with the purpose of design the transmission system, PID control system and manufacture of 3D printed parts.

A stepper motor and worm screw were selected for the transmission system, and a pressure sensor was used for the control system. In order to generate a continuous flow, a speed reduction system was implemented using the micro-steps option of the motor driver. Additionally, the design of the PID controller was replaced by a PI controller due to a greater efficiency and similarity with the system, however, we proceeded to use an open loop system, because we did not obtain constant flows with the implementation of the PI controller.

Finally, it was concluded that the syringe pump achieved a constant and precise flow operating in an open loop, which cost is the 20% of an imported syringe pump. In addition, due to the sizing of the engine, the equipment can operate with fluids of viscosities 30 times higher than cellulose.

Keywords: *electrospinning, nanofibers, control system, viscosities*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
ÍNDICE DE PLANOS.....	XI
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del proyecto	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Marco teórico.....	3
1.4.1 Microfluidos.....	3
1.4.2 Elementos del Sistema Electrospinning.....	4
1.4.3 Bomba Tipo Jeringa.....	5
1.4.4 Inestabilidad de Rayleigh – Plateau.....	5
1.4.5 Solución de Polímero.....	6
CAPÍTULO 2.....	8
2. Metodología	8
2.1 Requerimientos de Diseño	8
2.2 Alternativas de diseño	10

2.2.1	Sistema de Transmisión	10
2.2.2	Sensor del Sistema de Control	15
2.3	Selección de la Mejor Alternativa	18
2.4	Consideraciones de Diseño.....	21
2.4.1	Diseño Conceptual del prototipo	22
2.4.2	Fuerza mínima para desplazamiento del émbolo	23
2.4.3	Velocidad Lineal del Émbolo.....	25
2.4.4	Velocidad angular del motor	25
2.4.5	Cálculo del Torque del motor:.....	27
2.5	Diseño de Forma.....	27
2.5.1	Sistema de Reducción de Velocidad	27
2.5.2	Mecanismo de Transmisión de Potencia	30
2.5.3	Sistema de Control	31
2.5.4	Fabricación de Piezas Impresas en 3D	37
CAPÍTULO 3.....		39
3.	Resultados Y ANÁLISIS	39
3.1	Diseño final del Prototipo.....	39
3.2	Sistema de Transmisión	40
3.2.1	Fuerza mínima para desplazamiento del émbolo	40
3.2.2	Velocidad Lineal del émbolo	41
3.2.3	Velocidad angular del motor	42
3.3	Implementación de Reductor de Velocidad	45
3.3.1	Voltaje de Referencia.....	45
3.4	Transmisión de Potencia	46
3.4.1	Torque del motor.....	46
3.5	Análisis del Sistema de Control.....	47
3.5.1	Cálculo de Presión Teórica.....	47

3.5.2	Amplificador Diferencial de Señal	49
3.5.3	Curva del Sistema.....	49
3.5.4	Respuesta del Sistema a una Entrada Escalón.....	51
3.5.5	Diseño Controlador PI.....	53
3.6	Análisis de Costo.....	55
3.6.1	Análisis de Costo del Prototipo	55
3.6.2	Costo Bomba Tipo Jeringa Comercial	56
CAPÍTULO 4.....		59
4.	Conclusiones Y RECOMENDACIONES.....	59
	Conclusiones:.....	59
	Recomendaciones:.....	60
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICE		

ABREVIATURAS

PID	Proporcional, Integral y Derivativo
PLA	Ácido Poliláctico
SAE	Society of Automotive Engineers
ACME	Aerospace, Civil and Mechanical Engineering
Bit	Binary Digit
ADC	Analogue Digital Converter

SIMBOLOGÍA

mL	Mililitro
kV	Kilovoltio
V	Voltio
cm	Centímetro
mL/hr	Mililitro por Hora
mm	Milímetro
mPas	MiliPoiseN
RPM	Revoluciones por minuto
N	Newton
s	Segundo
min	Minuto
Ω	Ohmio
Pa	Pascal
psig	Libra por pulgada cuadrada

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema del sistema electrospinning	2
Figura 1.2 Tamaños característicos de los microfluidos	4
Figura 2.1 Esquema del Diseño	9
Figura 2.2 Diagrama de Forma Alternativa A	11
Figura 2.3 Diseño de forma Alternativa B	12
Figura 2.4 Diseño de Forma Alternativa C	13
Figura 2.5 Esquema de una jeringa seccionada 1	21
Figura 2.6 Esquema de una jeringa seccionada 2	22
Figura 2.7 Diseño Conceptual del Prototipo.	22
Figura 2.8 Viscosidades Fluidos a 1 atm	24
Figura 2.9 Gráfica Torque vs Velocidad Motor NEMA 17	27
Figura 2.10 Configuración de pines de entrada driver A4988ET	28
Figura 2.11 Configuración de Conexiones entre dispositivos	30
Figura 2.12 Diagrama de Bloques del Sistema de Control	32
Figura 2.13 Esquema del Proceso del Sistema de Control	33
Figura 2.14 Especificaciones Conexiones Sensor PendoTECH	34
Figura 2.15 Esquema Cálculo de Presión	35
Figura 2.16 Amplificador Diferencial	36
Figura 3.1 Vista Isométrica del Prototipo Final.	39
Figura 3.2 Señal del motor a paso completo y a $\frac{1}{4}$ de paso	44
Figura 3.3 Gráfica Experimental Caudal vs Número decimal leído del ADC.	50
Figura 3.4 Respuesta del Sistema ante una Entrada Escalón	51
Figura 3.5 Respuesta del Sistema y Función Transferencia del Sistema	52
Figura 3.6 Lugar Geométrico de las Raíces Controlador PI	53
Figura 3.7 Respuesta Escalón Controlador PI	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1, Requerimientos de Diseño	8
Tabla 2.2 Matriz de Alternativas	10
Tabla 2.3 Especificaciones del Servomotor.....	11
Tabla 2.4 Especificaciones del Motor de Paso.....	12
Tabla 2.5 Especificaciones del Servomotor Lineal DC	13
Tabla 2.6 Criterios de Selección y Ponderación	15
Tabla 2.7 Especificaciones del Encoder de Desplazamiento Lineal.....	15
Tabla 2.8 Especificaciones del Sensor de Presión.....	16
Tabla 2.9 Especificaciones del Sensor de Temperatura	17
Tabla 2.10 Criterios de Selección y Ponderación	18
Tabla 2.11 Tabla de valores asignados según Precisión del Sistema de Transmisión .	18
Tabla 2.12 Tabla de valores asignados según el Costo del Sistema de Transmisión ...	18
Tabla 2.13 Tabla de valores asignados Corriente del Sistema de Transmisión	19
Tabla 2.14 Tabla de valores asignados Torque y Fuerza del Sistema de Transmisión.	19
Tabla 2.15 Tabla de valores asignados según el Costo del Sistema de Control	19
Tabla 2.16 Tabla de valores asignados para Resolución del Sistema de Control	19
Tabla 2.17 Tabla de valores asignados para Uso del Sistema de Control	20
Tabla 2.18 Tabla de valores asignados para Adaptabilidad del Sistema de Control	20
Tabla 2.19 Matriz de Decisión Sistema de Transmisión.....	20
Tabla 2.20 Matriz de Decisión Sistema de Control.....	21
Tabla 2.21 Dimensiones Específicas de Jeringa de 5 mL.....	22
Tabla 2.22 Viscosidad en función del porcentaje de Disolución	23
Tabla 2.23 Porcentaje de Torque en función de la división de paso	28
Tabla 2.24 Asignación de Bloques Sistema de Control.....	32
Tabla 2.25 Componentes Amplificador Diferencial.....	36
Tabla 2.26 Consideraciones Diseño de Piezas	37
Tabla 3.1 Costos detallados del proyecto.....	55
Tabla 3.2 Costo Total del Prototipo	56
Tabla 3.3 Costos para la Importación.....	57
Tabla 3.4 Cálculo de Tributos para Importación	57

Tabla 3.5 Costo Total de Nacionalización de la bomba jeringa	57
Tabla 3.6 Costo Total de Importación del Equipo.....	57

ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Ensamble Bomba Tipo Jeringa
- PLANO 2 Soporte del Montaje del Motor y Soporte del Émbolo
- PLANO 3 Soporte de Lengüeta y Soporte de Aguja
- PLANO 4 Motor, Soporte del Motor y Acople
- PLANO 5 Riel de Aluminio y Varilla circular
- PLANO 6 Varilla Roscada A304
- PLANO 7 Vista Lateral, Vista Frontal y Vista Superior de Ensamble

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La bomba de jeringa es un equipo que comprime y transporta una cierta cantidad de fluido, el cual depende de su aplicación. Comercialmente son probablemente los instrumentos más comúnmente utilizados en investigaciones que van desde la bioingeniería y las disciplinas biomédicas hasta la química y la nanotecnología.

En el campo médico, las bombas de jeringa o también llamadas bombas de infusión son utilizadas para la administración de fármacos intravenosos (anestesia, antibióticos, antiarrítmicos, agentes quimioterapéuticos) (Sanderson & Bertsch, 1993, p. 7). En el campo de la nutrición encontramos estas bombas para la administración de nutrientes en personas o animales que presenten dificultad de ingerirlos por la vía oral (Gemmell & Vogt, s. f., p. 4). Las bombas tipo jeringa son dispositivos que permiten la circulación de microfluidos, los cuales tienen aplicaciones en laboratorios como: inmunoensayos, separación de proteínas, ADN, entre otros. Por otro lado, en el campo de la ciencia, los sistemas microfluídicos han contribuido en el avance de la nanotecnología para lograr un alto rendimiento en la producción de nano dispositivos y servir como una sólida base para técnicas de química analítica como la electroforesis y la cromatografía. (John R. Lake, 2017)

Adicionalmente, la bomba de jeringa se utiliza en equipos de electrospinning para producir fibras hiladas a nano y microescala aplicando principios electrostáticos, por lo general el material de la fibra es una clase de solución de polímero. En el sistema electrospinning se administra un alto voltaje por medio de un campo eléctrico a la sustancia que se encuentra en forma líquida dentro de una jeringa, este voltaje se encuentra en un intervalo de 10 a 15 kV, dependiendo del polímero y el diámetro de la fibra hilada que se desea obtener. (Zheng-Ming Huang, 2003) Cuando las fuerzas eléctricas repulsivas superan las fuerzas de tensión superficial del extremo de la aguja de la jeringa, se genera un chorro que se dirige hacia un colector que se encuentra girando sobre un eje, el cual está cargado con la polaridad opuesta, como se muestra en la siguiente figura. (Subhas C. Kundu, 2010)

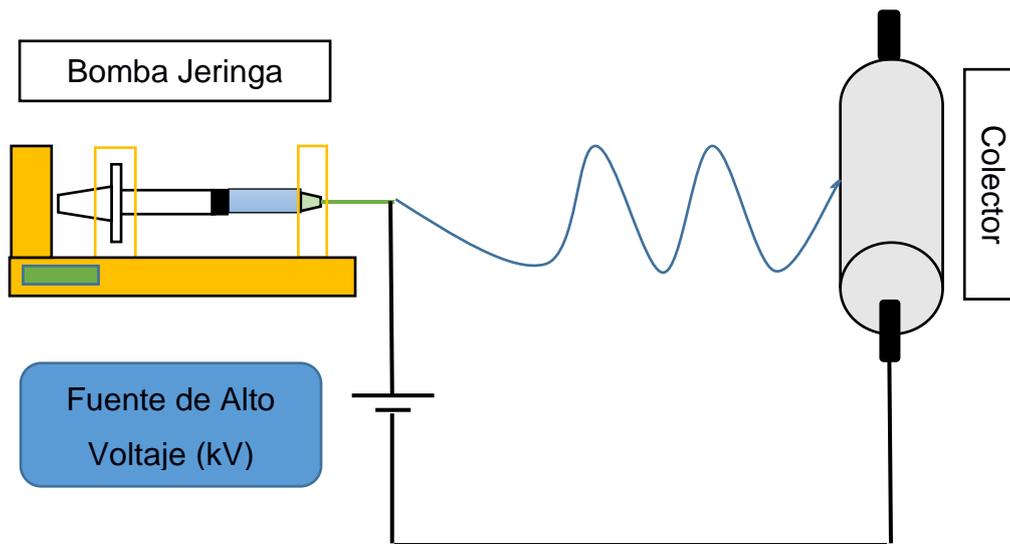


Figura 1.1 Esquema del sistema electrospinning

Este proceso posee un gran rango de aplicaciones, entre las cuales se encuentra la ingeniería de tejidos, la administración de fármacos y la obtención de membranas de nanocelulosa. (Horst A. von Recum, 2008)

1.1 Descripción del problema

El laboratorio de mecatrónica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción ha optado por desarrollar un proyecto acerca de un prototipo de sistema electrospinning para la producción de nano fibras a base de celulosa, el cual es un polímero de origen natural. Este equipo debe ser construido modularmente a través de varios proyectos de Materia Integradora de la universidad, donde el primer módulo tiene como objetivo construir una bomba tipo jeringa. Sin embargo, este elemento al igual que el sistema electrospinning, no se encuentra disponible en el mercado local y posee un elevado costo, aún sin considerar su costo de importación.

1.2 Justificación del proyecto

Uno de los objetivos planteados por el laboratorio de Mecatrónica es la producción de nanofibras a base de celulosa mediante un sistema electrospinning para la investigación y determinación de las propiedades mecánicas, físicas y químicas de las fibras naturales típicas provenientes del Ecuador. De esta forma, la construcción

de la bomba tipo jeringa ofrece una alternativa a los equivalentes comerciales de alto costo y es una solución más flexible para sistemas personalizados que a menudo se utilizan en un entorno de laboratorio de investigación.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseño y construcción de una bomba de jeringa, que expulse volúmenes o flujos precisos del líquido contenido en su interior, el cual se pueda utilizar como el primer módulo de un sistema electrospinning.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Diseño y selección de un mecanismo de transmisión de potencia que proporcione un desplazamiento lineal.
2. Implementación de un sistema de reducción de velocidades que proporcione un flujo continuo a la salida de la jeringa.
3. Diseño y construcción mediante impresión 3D de sistema de alojamiento de la jeringa.
4. Desarrollar un sistema de control PID para el control del flujo, a la salida de la jeringa.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Microfluidos

Microfluidos se define como la ciencia e ingeniería que estudia el comportamiento de los fluidos en la microescala. Se caracteriza por el uso y control de pequeños volúmenes de fluidos, pudiendo ser estos: líquidos o gases (Nam-Trung Nguyen, 2006). A continuación, se muestra la figura 1.1 la cual facilita la interpretación de los rangos donde se encuentran los micro fluidos.

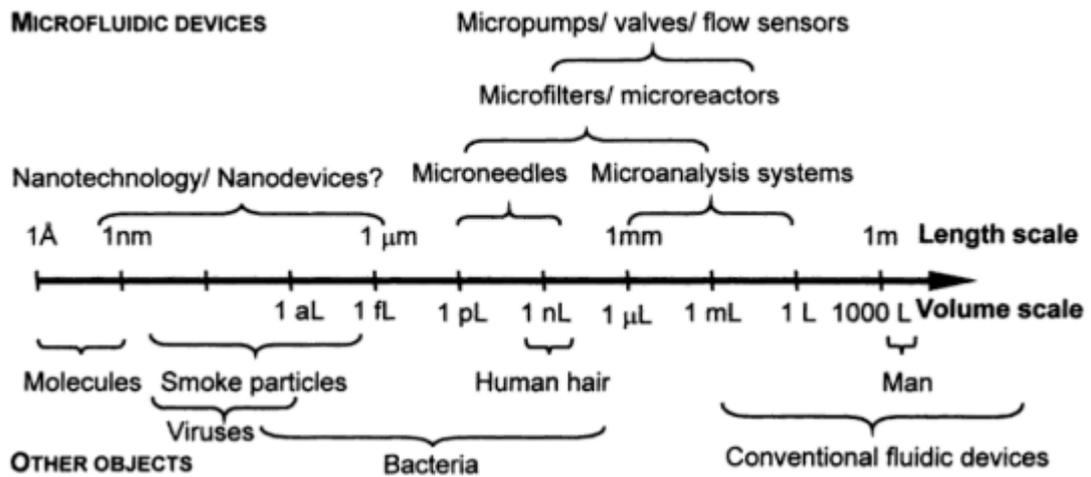


Figura 1.2 Tamaños característicos de los microfluidos

Fuente: (Nam-Trung Nguyen, 2006)

Las propiedades de los microfluidos varían respecto a su escala macro, dichos cambios se evidencian principalmente en: tensión superficial y disipación de energía, donde se ven disminuidas. Debido a estas propiedades, los microfluidos tienen posición en actividades relacionadas con: microfabricación, biología, mecánica, manufactura, química, etc. (Rivas, 2011).

De esta forma es importante utilizar un microfluído, ya que las fuerzas de tensión superficial deben ser bajas para evitar la inestabilidad del chorro, ya que esto ocasiona gotas no homogéneas en el chorro.

1.4.2 Elementos del Sistema Electrospinning

El sistema electrospinning está compuesto por tres elementos principales los cuales son: una bomba de jeringa, una fuente de alimentación de alto voltaje y un tambor colector. La bomba tipo jeringa expulsa un caudal en mL/hr, enviándolos a una fuente de alimentación, la cual debe proporcionar altos voltajes comprendidos entre 10 y 15 kV, para cargar positivamente la disolución que se encuentra contenida en la jeringa y escapar del cono de Taylor que se genera en la punta de la aguja (Zheng-Ming Huang, 2003). Posteriormente se adhiere a un tambor colector conectado a tierra (Calzón Gutiérrez, 2016), el cual gira a bajas velocidades mientras las fibras son depositadas en la superficie del colector (Katta, Alessandro, Ramsier, & Chase, 2004). Tanto la velocidad como el diámetro del tambor influirán

en la alineación de las nanofibras, la distancia entre la punta de la jeringa y la superficie del colector debe estar en el rango de 17 – 20 cm (Bhattarai, Edmondson, Veiseh, Matsen, & Zhang, 2005).

Considerando el objetivo general de este proyecto, esta sección se enfocará principalmente en el primer módulo del sistema electrospinning, el cual es una bomba tipo jeringa.

1.4.3 Bomba Tipo Jeringa

Es un dispositivo microfluídico, el cual proporciona un flujo en escala micro basándose en la inestabilidad de Rayleigh – Plateau; estos caudales están en el rango de 0.1 a 1000 mL/hr. Su accionamiento se realiza mediante un pequeño motor que acciona un tornillo sin fin, el cual desplaza el émbolo de la jeringa, proporcionando así un microfluido controlado. Considerando que, la aplicación de la presente bomba tipo jeringa será destinada a un sistema electrospinning utilizando celulosa como fluido, el rango estará comprendido entre 0.6 – 5 mL/hr. (Youn - Mook Lim, 2010)

Entre las ventajas respecto a otros dispositivos de emulsión de microfluidos es su fácil manejo, precisión y típicamente se obtiene un error menor al 5% respecto a su caudal. Por estas razones es que las bombas tipo jeringa se encuentran en varios campos como: industria alimenticia, cosmetología, infusión de medicina e investigación de laboratorio (Zida Li, 2013).

1.4.4 Inestabilidad de Rayleigh – Plateu

Consiste en la operación de la fuerza capilar, cuyo efecto se modela como un cilindro inestable el cual desprende cantidades infinitesimales de masas (fluido) por una superficie de menor área que la del cilindro. (Rayleigh, 1878)

Mediante un análisis perturbativo del sistema, aplicando las ecuaciones de Navier – Stokes, se puede aproximar el sistema como unidimensional: (Fontelos, s. f.)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial k}{\partial z} + 3\mu \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial t} \left(h^2 \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + v \frac{\partial h}{\partial z} = -\frac{h}{2} \frac{\partial v}{\partial z} \quad (1.2)$$

Donde:

z: se considera la coordenada del eje del tubo

v: velocidad en función de (z,t) a lo largo del eje

μ : es el número adimensional de Ohnesorge, el cual está en función de la viscosidad cinemática ν , la densidad ρ , la tensión superficial σ y el radio característico del chorro R.

$$\mu = \nu \sqrt{\frac{\rho}{R\sigma}} \quad (1.3)$$

k: es la curvatura media de la superficie

1.4.5 Solución de Polímero

El material de la fibra hilada es básicamente una de las consideraciones más importantes para el sistema de electrospinning, ya que este debe cumplir con ciertas propiedades como es la solubilidad, conductividad eléctrica, entre otros. De esta forma, polímeros como: polietileno, PLA y celulosa debido a sus propiedades, son la principal opción de uso, en aplicaciones tanto de administración de fármacos como de obtención de membrana nanoporosa. (Andreas Grenier, 2007). Además, dentro de la bomba de jeringa se debe colocar celulosa con una concentración que se encuentra entre 12.5 y 20% donde el solvente indicado es acetona o ácido acético. (Zheng-Ming Huang, 2003).

Cabe mencionar que la viscosidad de la disolución es uno de los parámetros más importante ya que si la solución posee una viscosidad baja, se facilita la formación de fibras hiladas finas y continuas y si la solución posee una viscosidad alta, el

diámetro de la fibra será mayor. Sin embargo, a mayor viscosidad, mayor será la dificultad para que las fibras sean expulsadas de la aguja. (Calzón Gutiérrez, 2016).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

El desarrollo del presente proyecto se realizó en 5 etapas, las cuales se detallarán a continuación con sus respectivas subetapas:

2.1 Requerimientos de Diseño

Entre los requerimientos del diseño se consideró cuatro aspectos importantes como son: Flujo de Operación, Flujo Continuo, Sistema de Control PID y Construcción de Piezas.

Tabla 2.1, Requerimientos de Diseño

Requerimiento de Diseño:	Descripción:
Flujo de Operación	Debido que la bomba está destinada para aplicaciones de electrospinning usando celulosa como fluido, el flujo de operación debe estar comprendido en el rango de $0.6 - 5 \text{ mL/hr}$.
Flujo Continuo	Para la correcta fabricación de nanofibras a base de celulosa, se debe tener un flujo continuo a la salida de la jeringa.
Sistema de Control	Se debe implementar un sistema de control en la bomba tipo jeringa el cual regule el caudal de salida en base a la señal que emita el sensor. El caudal debe ser regulado a través de la velocidad de rotación del motor.
Construcción de piezas	La fabricación de las piezas del sistema de alojamiento de jeringa y del sensor de presión debe ser construido mediante impresiones 3D debido a su rapidez y bajo costo.

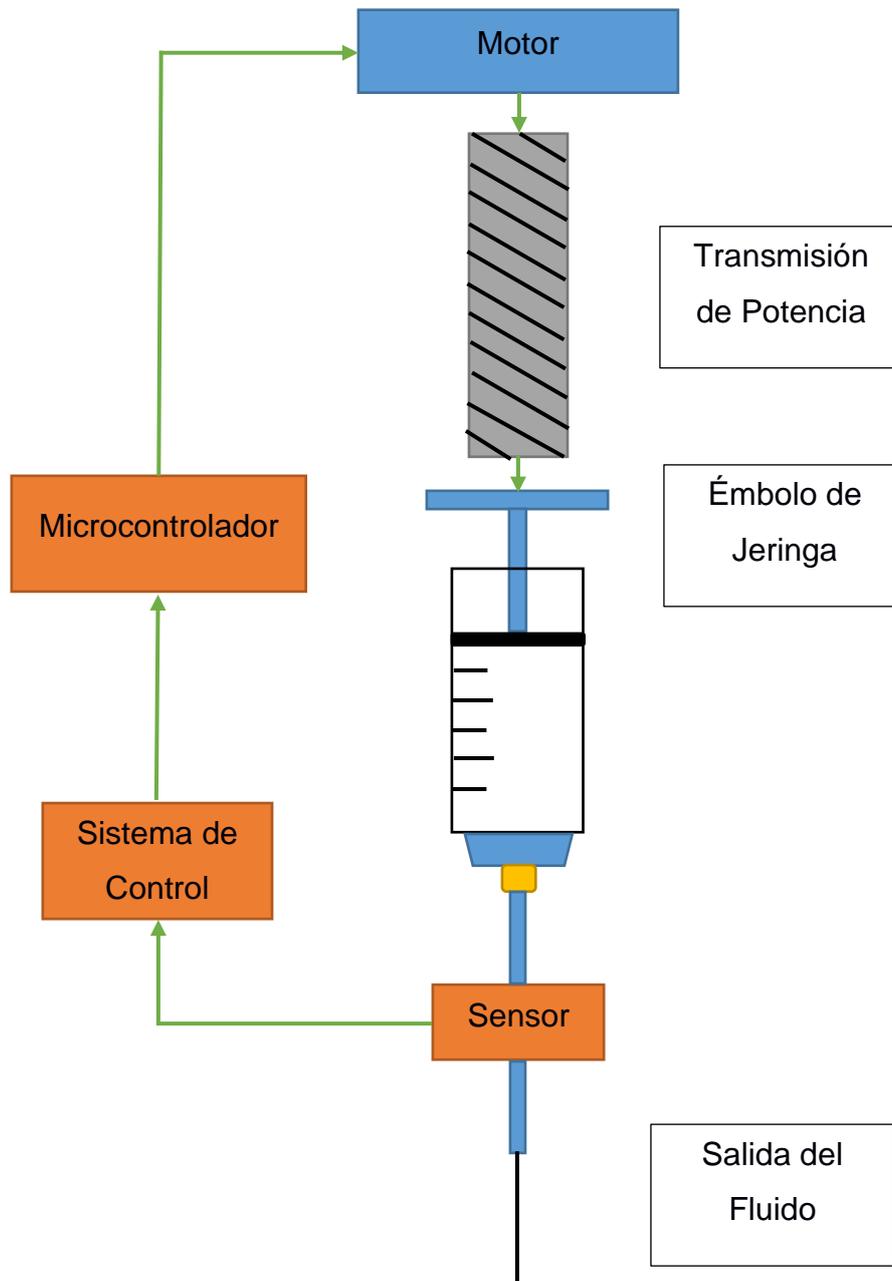


Figura 2.1 Esquema del Diseño

La figura 2.1 muestra un esquema del proceso para la bomba tipo jeringa, en el cual un motor acciona un sistema de transmisión de potencia y mediante este mecanismo se debe desplazar linealmente el émbolo de la jeringa, permitiendo la salida del fluido contenido en su interior, el cual posteriormente ingresa al sensor. El sensor seleccionado debe colocarse a la salida de la jeringa, en donde se crea un lazo cerrado entre el caudal de salida y la velocidad angular del motor, de esta forma se

regula la velocidad de giro del motor en base a la señal que emita dicho sensor, obteniendo así un flujo controlado.

2.2 Alternativas de diseño

2.2.1 Sistema de Transmisión

Con la finalidad de lograr las especificaciones del flujo, se procedió a analizar las opciones de motores eléctricos y sistemas de reducción de velocidad capaces de proporcionar bajas velocidades angulares y alta precisión.

La Tabla 2.2 mostrada a continuación, es una representación matricial resumida de las alternativas del sistema de transmisión, las cuales son evaluadas posteriormente.

Tabla 2.2 Matriz de Alternativas

Parámetros	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C
Tipo de accionamiento	Servomotor	Motor de paso	Servomotor DC Lineal
Sistema de Transmisión de Potencia	Tornillo sin fin	Tornillo sin fin	-
Reducción de Velocidad	Si	Si	Incluida

A continuación, se detalla los requerimientos y especificaciones de cada alternativa planteada:

2.2.1.1 *Alternativa A:*

La alternativa A consistió en un servomotor, donde la velocidad de salida debe ser reducida a través de una caja de reducción de engranes planetarios debido a que dicha clase de engranes poseen una alta reducción de velocidad. Los engranes pueden ser impresos en 3D, o mecanizados en acero. Cabe mencionar que los engranes están conectados a su vez a un tornillo sin fin con paso diametral de 1.25 mm mediante un acople.

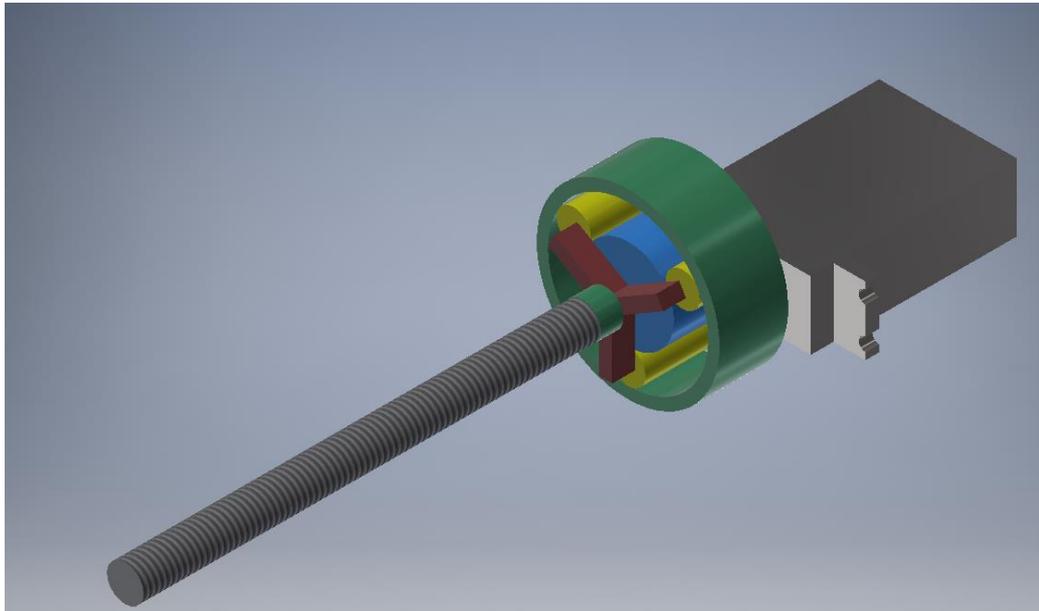


Figura 2.2 Diagrama de Forma Alternativa A

Tabla 2.3 Especificaciones del Servomotor

Servomotor:	AD15RSMG 360
Velocidad (RMP):	62.5
Torque:	148.13 N*cm
Voltaje:	5 – 7.4 V
Relación de Velocidad:	125:1
Corriente Nominal:	3 A
Costo:	\$20.55

2.2.1.2 Alternativa B:

La alternativa B consistió en utilizar un motor de paso, el cual tiene una resolución de 1.8 grados/paso y realiza 200 pasos/revolución. Debido a que la señal de salida del motor de paso es escalonada, se requirió un sistema de reducción de velocidad a la salida para poder linealizar dicha señal. De este modo, la reducción dependió de la resolución que se deseaba lograr a la salida del motor. Al igual que la alternativa A, la salida del sistema de reducción se conecta a un tornillo sin fin, el cual desplaza linealmente el émbolo de la jeringa.

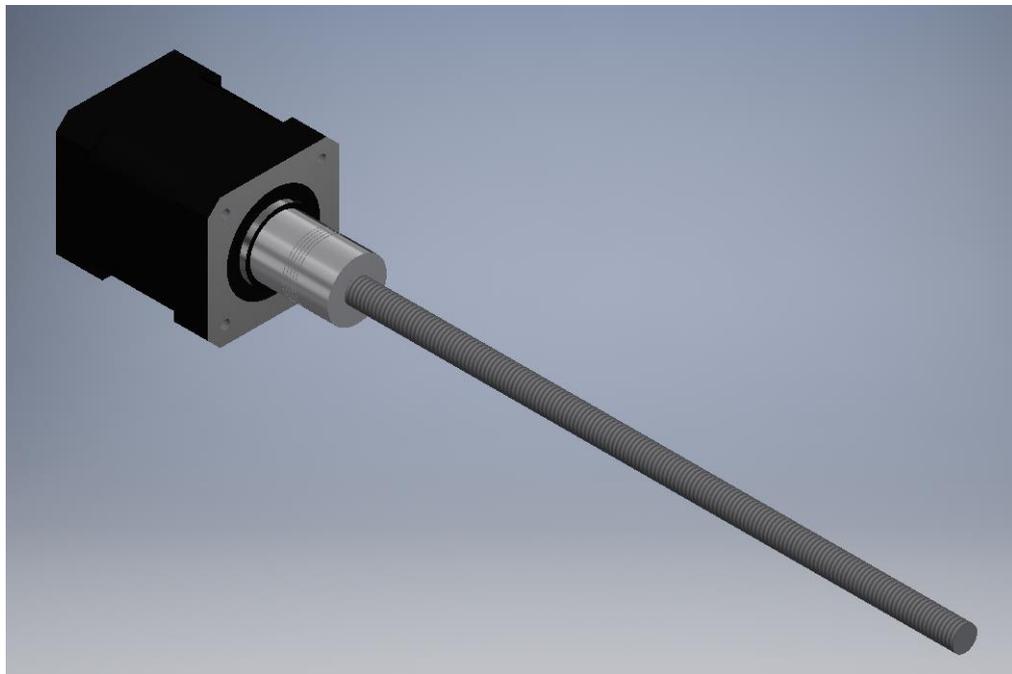


Figura 2.3 Diseño de forma Alternativa B

Tabla 2.4 Especificaciones del Motor de Paso

Motor:	Nema 17HD48002H-22B
Resolución:	1.8 grados/paso
Torque:	59 N*cm
Voltaje:	2.8 V
Corriente Nominal:	1.7 A
Costo:	\$13.99

2.2.1.3 Alternativa C:

La alternativa C consistió en un servomotor de corriente directa, el cual acciona un cilindro que empuja el émbolo de la jeringa. La ventaja de esta alternativa en comparación con las dos anteriores es la ausencia de sistema de reducción y de un mecanismo de transmisión de potencia.

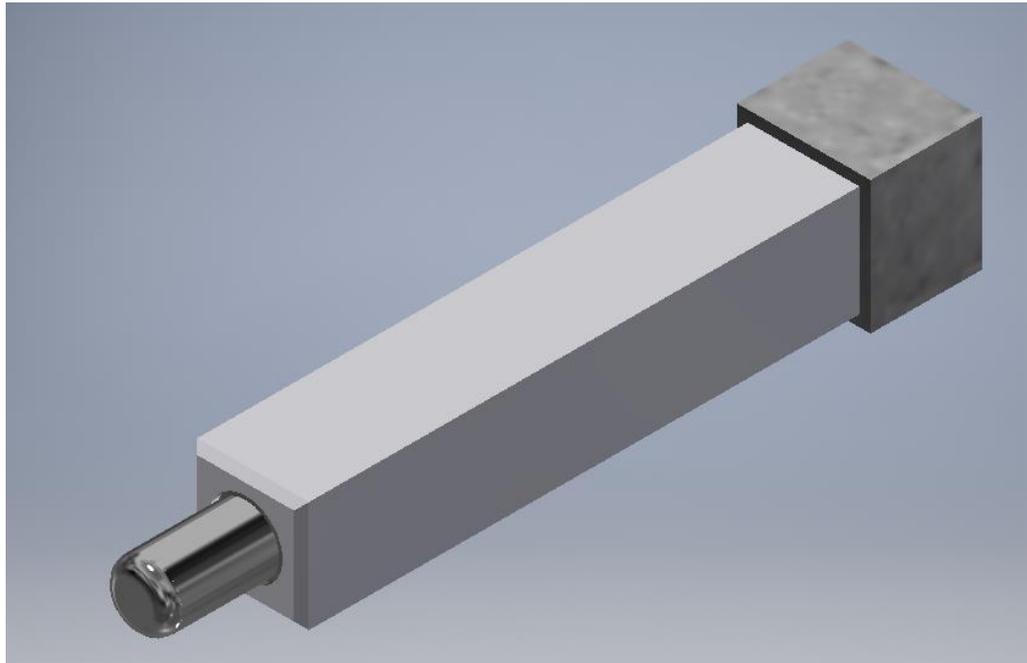


Figura 2.4 Diseño de Forma Alternativa C

Tabla 2.5 Especificaciones del Servomotor Lineal DC

Motor:	Minuature Linear Motion Series L12
Velocidad Lineal:	3.2 mm/s
Fuerza máxima:	80 N
Voltaje:	12 VDC
Relación de Velocidad:	210:1
Corriente Nominal:	185 mA
Costo:	\$69.99

2.2.1.4 Criterios de Selección y Ponderación del Sistema de Transmisión

Con la finalidad de seleccionar la mejor alternativa, se propuso varios criterios de selección, los cuales están fuertemente relacionados con los objetivos propuestos al inicio del proyecto. Los criterios propuestos fueron ponderados según su relevancia para el diseño, de esta manera se pudo evaluar las diferentes alternativas, para posteriormente seleccionar la mejor. A continuación, se presentan los diferentes criterios de selección con su respectiva justificación:

- **Precisión:** La precisión del avance lineal del émbolo de la jeringa debe ser altamente relevante para el diseño final, ya que este prototipo está destinado a un sistema electrospinning donde se requiere precisión para la fabricación de nanofibras.

- **Costo:** Uno de los objetivos planteados al inicio del proyecto fue construir una bomba tipo jeringa de bajo costo, la cual represente una diferencia significativa en comparación con las bombas de jeringas del mercado internacional.

- **Corriente Nominal:** La corriente nominal requerida está relacionada directamente con la emisión de calor, mientras mayor sea la emisión de calor mayor se ve afectada la integridad de las piezas construidas en impresión 3D.

- **Torque y Fuerza:** Para el accionamiento del émbolo se requiere una fuerza mayor a la fuerza viscosa de la disolución contenida en la jeringa que retiene el líquido en la punta de la aguja. Para el caso del tornillo sin fin se requiere el torque necesario y para el caso del cilindro, la fuerza que se debe aplicar en el émbolo de la jeringa. La Tabla 2.6 mostrada a continuación, muestra un resumen de los criterios de selección propuestos con su respectiva ponderación:

Tabla 2.6 Criterios de Selección y Ponderación

Criterio:	Ponderación:
Precisión	0.35
Costo	0.30
Corriente Nominal	0.20
Torque y Fuerza	0.15
Total	1.00

2.2.2 Sensor del Sistema de Control

Para el sistema de control fue necesario colocar un sensor en la bomba tipo jeringa, el cual tenía que ser lo suficientemente sensible, resistente a las perturbaciones del medio en que se encuentre y a su vez lograr adaptarse al diseño de las piezas impresas en 3D.

Por consiguiente, se procede a mostrar las diversas alternativas que se plantearon para posteriormente proponer criterios de selección y finalmente seleccionar la mejor opción.

2.2.2.1 Alternativa A – Encoder de Desplazamiento Lineal

El encoder de desplazamiento lineal trabaja de forma óptica, por lo tanto, no tiene rozamiento, lo que garantiza mayor eficiencia. La lectura se la realiza mediante una regla calibrada, donde un cabezal se desplaza por la regla, generando una señal eléctrica incremental, la cual es leída por el microcontrolador a emplear.

Tabla 2.7 Especificaciones del Encoder de Desplazamiento Lineal

Sensor:	Encoder ELAP KP-10
Variable de Instrumentación:	Desplazamiento
Resolución	0.010 mm/m
Rango de Desplazamiento:	Hasta 6500 mm
Uso:	Ilimitado
Costo:	\$32.99

2.2.2.2 Alternativa B – Sensor de Presión con Amplificador

La alternativa B estuvo compuesta por dos instrumentos los cuales se complementan para un correcto funcionamiento del sensor de presión. El extremo del cuerpo de la jeringa debe ser conectado a un tubo *Tygon*, el cual transporta el fluido al sensor de presión estático, el cual envía una señal hacia un amplificador con ganancia para obtener una mayor resolución y finalmente transportar esta señal a las entradas analógicas de la placa controladora.

Tabla 2.8 Especificaciones del Sensor de Presión

Sensor:	PendoTech PRESS-S-000
Diámetro:	1/16 in
Rango de Operación:	-7 a 75 psi
Tolerancia:	± 2% en rango de operación de 0 a 6 psi
Temperatura del Fluido:	-25 a 65 °C
Voltaje de Excitación:	2.5 a 10 V DC
Señal de Salida:	0.2584 mV/psi*Volt
Uso:	Limitado (Lavar con 70% solución etanol)
Costo:	\$46.00

2.2.2.3 Alternativa C – Sensor de Temperatura

La alternativa C consistió básicamente en 2 sensores de temperatura ubicados en el interior del cuerpo de la jeringa. Dichos sensores fueron ubicados a igual distancia respecto una resistencia térmica de alambre de nicrom, la cual transfiere calor por conducción al interior del cilindro.

Cuando la bomba jeringa opera, el caudal perturba la señal, obteniendo mayor índice de temperatura en el extremo cercano a la salida de la jeringa. Dicha diferencia de temperatura está relacionada con el caudal en su interior, donde se midió la diferencia de temperatura en milivoltios.

Tabla 2.9 Especificaciones del Sensor de Temperatura

Sensor:	LM35
Variable de Instrumentación:	Temperatura
Rango de Temperatura:	0 a 150 °C
Tolerancia:	± 0.5 °C a temperatura ambiente; ± 0.8 °C en rango completo
Señal de Salida:	10 mV/°C
Costo Unitario Sensor:	\$3.00
Costo Total:	\$6.10

2.2.2.4 Criterios de Selección y Ponderación del Sistema de Control

A continuación, se presentan los diferentes criterios de selección y ponderación para la selección del sensor para el sistema de control:

- **Costo:** El costo del sensor no debe elevar considerablemente el costo de la bomba.

- **Resolución y Sensibilidad:** Debido que la bomba opera a caudales bajos y desplazamientos lineales en micrómetros, el sensor debe tener la suficiente resolución para detectar dicha variación en el valor del caudal.

- **Uso:** Se debe considerar la cantidad de veces que el sensor puede operar en la bomba tipo jeringa, ya que el destino de este dispositivo es el laboratorio de mecatrónica, estará en constante uso por parte de los estudiantes o profesores.

- **Adaptabilidad:** Se debe tener en consideración que el sensor utilizado debe ser adaptable al diseño planteado, es decir pueda instalarse y acoplarse con facilidad al resto del prototipo.

La Tabla 2.10 mostrada a continuación, muestra un resumen de los criterios de selección propuestos con su respectiva ponderación:

Tabla 2.10 Criterios de Selección y Ponderación

Criterio:	Ponderación:
Costo	0.20
Resolución	0.30
Uso	0.25
Adaptabilidad	0.25
Total	1.00

2.3 Selección de la Mejor Alternativa

Para seleccionar la mejor alternativa para el diseño se procedió a realizar una matriz de decisión. Para evaluar las alternativas correspondientes a el sistema de transmisión se propuso los siguientes valores de asignación para cada criterio.

Tabla 2.11 Tabla de valores asignados según Precisión del Sistema de Transmisión

Valor:	Asignación:
1	Velocidad \geq 10 RPM
2	$7 \leq$ Velocidad \geq 9.99 RPM
3	$4 \leq$ Velocidad \geq 6.99 RPM
4	$1 \leq$ Velocidad \geq 3.99 RPM
5	Velocidad \leq 1 RPM

Tabla 2.12 Tabla de valores asignados según el Costo del Sistema de Transmisión

Valor:	Asignación:
1	Mayor a \$60
2	Entre \$50 - \$59.99
3	Entre \$30 - \$49.99
4	Entre \$20 - \$39.99
5	Inferior a \$19.99

Tabla 2.13 Tabla de valores asignados Corriente del Sistema de Transmisión

Valor:	Asignación:
1	Mayor a 3 A
2	-
3	Entre 1 – 3 A
4	-
5	Inferior a 1 A

Tabla 2.14 Tabla de valores asignados Torque y Fuerza del Sistema de Transmisión

Valor:	Asignación:
1	Inferior a 59 N*cm
2	Entre 60 – 79 N*cm
3	Entre 80 – 99 N*cm
4	Entre 100 – 119 N*cm -
5	Mayor 120 N*cm

De igual manera se definió las asignaciones para cada criterio de selección para el sensor del Sistema de Control:

Tabla 2.15 Tabla de valores asignados según el Costo del Sistema de Control

Valor:	Asignación:
1	Mayor a \$60
2	Entre \$50 - \$59.99
3	Entre \$30 - \$49.99
4	Entre \$20 - \$39.99
5	Inferior a \$19.99

Tabla 2.16 Tabla de valores asignados para Resolución del Sistema de Control

Valor:	Asignación:
1	Rango de Operación ≥ 2
2	-
3	$1\% < \text{Rango de Operación} < 2\%$
4	-
5	Rango de Operación $\leq 1\%$

Tabla 2.17 Tabla de valores asignados para Uso del Sistema de Control

Valor:	Asignación:
1	Limitado
2	-
3	Prolongado con limpieza
4	-
5	Ilimitado

Tabla 2.18 Tabla de valores asignados para Adaptabilidad del Sistema de Control

Valor:	Asignación:
1	No es adaptable
2	Muy poco adaptable
3	Adaptable
4	Muy adaptable
5	Completamente adaptable

Una vez definidos los valores correspondientes a los criterios de selección se procedió a realizar la matriz de decisión mostrada a continuación, la cual muestra la evaluación de las tres alternativas propuestas con sus respectivas calificaciones, seleccionando, para el caso del sistema de transmisión, la Alternativa B como la mejor alternativa debido a su bajo costo y alta precisión. Mientras que para el caso del sistema de control se seleccionó la alternativa B debido a su alta resolución y forma de medición directa.

Tabla 2.19 Matriz de Decisión Sistema de Transmisión

Criterios de Selección	Precisión	Costo	Corriente Nominal	Torque y Fuerza	Total
Alternativas	0.35	0.3	0.20	0.15	1.00
Alternativa A	4	4	1	5	3.55
Alternativa B	5	5	3	2	4.15
Alternativa C	2	1	5	4	2.60

Tabla 2.20 Matriz de Decisión Sistema de Control

Criterios de Selección	Costo	Resolución	Uso	Adaptabilidad	Total
	0.20	0.30	0.25	0.25	1.00
Alternativas					
Alternativa A	4	5	5	1	3.80
Alternativa B	3	5	3	5	4.10
Alternativa C	5	3	5	2	3.65

2.4 Consideraciones de Diseño

La bomba tipo jeringa será un elemento modular de un sistema electrospinning, por tal motivo, el rango de operación de los caudales del presente proyecto se encuentra entre $0.6 - 5 \text{ mL/hr}$, debido a esto, se procedió a calcular la velocidad a la que debe girar el motor y el tipo de jeringa que se debe utilizar para conseguir los caudales mencionados.

El prototipo de este proyecto utiliza jeringas de 5 mL , por lo tanto, se procedió a tomar las medidas de la jeringa mencionada con la ayuda de un calibrador Vernier para posteriormente calcular la velocidad de salida en función del caudal y del área transversal de la jeringa.

En las siguientes imágenes se muestra las respectivas partes que constituyen una jeringa, las cuales fueron necesarias para definir las dimensiones de dicho elemento.

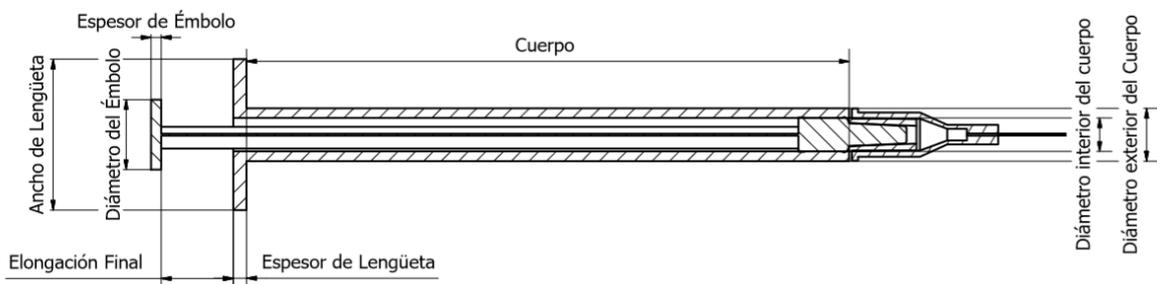


Figura 2.5 Esquema de una jeringa seccionada 1

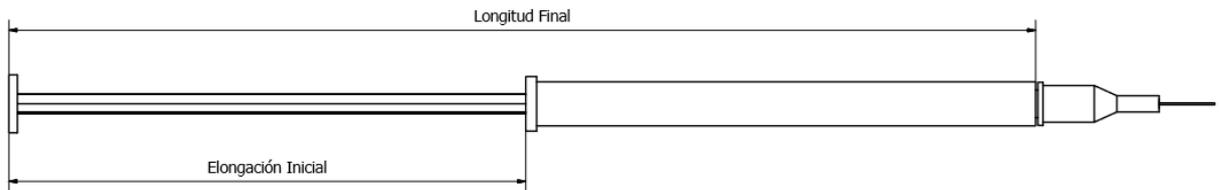


Figura 2.6 Esquema de una jeringa seccionada 2

Tabla 2.21 Dimensiones Específicas de Jeringa de 5 mL

Jeringa de 5 mL			
Diámetro Exterior	13.8 mm	Elongación Inicial	60.3 mm
Diámetro Interior	11.7 mm	Elongación Final	13.4 mm
Longitud Cuerpo	78.8 mm	Diámetro del émbolo	14 mm
Ancho Lengüeta	26.8 mm	Espesor del émbolo	1.5 mm
Espesor Lengüeta	1.3 mm	Longitud Final	139.0 mm

2.4.1 Diseño Conceptual del prototipo

Una vez seleccionado el sistema de transmisión, sistema de control y tipo de jeringa a utilizar, se procedió a realizar un diseño conceptual a mano, el cual se muestra a continuación.

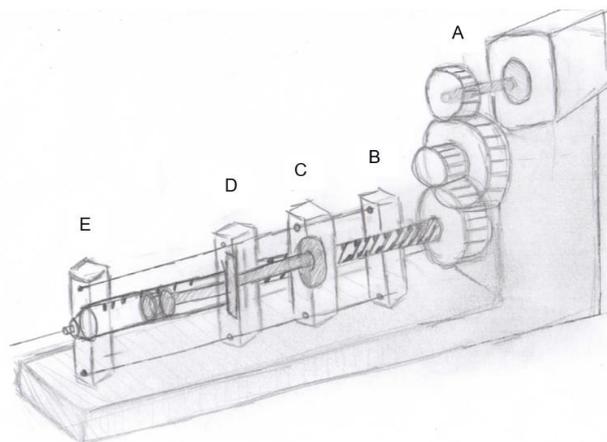


Figura 2.7 Diseño Conceptual del Prototipo.

(A Sistema de transmisión compuesto por un motor de paso y un tornillo sinfín. Adicionalmente se consideró utilizar un sistema de reducción de velocidad por medio de engranes. B Soporte a la salida del sistema de engranes. C Soporte para el émbolo de la jeringa encargado del desplazamiento lineal. D Soporte para la lengüeta de la jeringa. E Soporte para la aguja de la jeringa.)

Cabe mencionar que se consideró utilizar un sistema de reducción de velocidad por medio de engranes y dos varillas circulares las cuales se sitúan en la parte superior e inferior de cada soporte impreso en 3D, para obtener mayor estabilidad.

Con la ayuda de este diseño conceptual se procedió elaborar las piezas en el programa Autodesk Inventor. Los respectivos soportes seleccionados fueron impresos en 3D utilizando ácido poliláctico (PLA).

2.4.2 Fuerza mínima para desplazamiento del émbolo

La fuerza axial que debe aplicarse al émbolo debe ser lo suficiente para vencer las fuerzas de fricción entre la superficie interna de la jeringa y la tensión superficial del fluido contenido en su interior. Para calcular la fuerza axial mínima se realizó mediante experimentación, donde el primer paso fue conocer la viscosidad dinámica de la celulosa. La Tabla 2.10 muestra los valores de viscosidad a diferentes porcentajes de disolución.

Tabla 2.22 Viscosidad en función del porcentaje de Disolución

Porcentaje de Disolución:	Viscosidad:
1%	10 – 15 mPas
2%	20 – 45 mPas
Mayor a 4%	200 – 500 mPas

Con dicha referencia, se buscó un fluido que tenga una viscosidad similar que la celulosa para realizar la experimentación de la fuerza mínima para desplazar el émbolo. Obteniendo como resultado el aceite para motor SAE 10W30, cuya viscosidad es igual a 0.17 kg/ms o 170 mPas.

Viscosidades dinámicas de algunos fluidos a 1 atm y 20°C (a menos que se indique otra cosa)

Fluido	Viscosidad dinámica μ , kg/m · s
Glicerina:	
–20°C	134.0
0°C	10.5
20°C	1.52
40°C	0.31
Aceite para motor:	
SAE 10W	0.10
SAE 10W30	0.17
SAE 30	0.29
SAE 50	0.86
Mercurio	0.0015
Alcohol etílico	0.0012
Agua:	
0°C	0.0018
20°C	0.0010
100°C (líquido)	0.00028
100°C (vapor)	0.000012
Sangre, 37°C	0.00040
Gasolina	0.00029
Amoniaco	0.00015
Aire	0.000018
Hidrógeno, 0°C	0.0000088

Figura 2.8 Viscosidades Fluidos a 1 atm

Fuente: (Yunus A. Cengel, 2006)

Se procedió a llenar la jeringa de 5 mL con dicho fluido, ubicando el ensamble de forma vertical y se procedió a colocar una serie de masas sobre la jeringa hasta observar que el émbolo de la jeringa comenzara a desplazarse, tomando como referencia la salida de fluido en el extremo de la jeringa. Mediante una balanza se pesó las masas que se añadieron sobre el émbolo y se multiplicó por la gravedad como muestra la ecuación 2.1, obteniendo así la fuerza mínima para desplazar el émbolo.

$$F_{min} = m_{totales} * g \quad (ec\ 2.1)$$

Adicional a la fuerza mínima para el desplazamiento del émbolo se debe tomar en cuenta el peso del soporte impreso en 3D que contendrá el émbolo. Para determinar dicha fuerza fue necesario encontrar la masa del soporte impreso en 3D. De esta manera, se observó el volumen de la pieza en el programa Autodesk Inventor, y se la multiplicó por la densidad del material, en este caso la densidad del ácido poliláctico (PLA) como se muestra en la siguiente ecuación:

$$m_{soporte} = V_{soporte} * \rho_{PLA} \quad (ec. 2.2)$$

Finalmente, la fuerza total necesaria para desplazar el émbolo de la jeringa será la suma de la fuerza mínima y la fuerza de gravedad del soporte que contendrá el émbolo de la jeringa.

$$F_{total} = F_{min} + m_{soporte} * g \quad (ec. 2.3)$$

2.4.3 Velocidad Lineal del Émbolo

La velocidad lineal a la que debe desplazarse el émbolo estará dada por el caudal requerido, como muestra la ecuación 2.2 mostrada a continuación:

$$V_{\acute{e}mbolo} = \frac{Q}{A} \quad (ec. 2.4)$$

Donde:

Q: Caudal (m^3/s)

A: Área transversal del cilindro de la jeringa (m^2)

$V_{\acute{e}mbolo}$: Velocidad lineal del émbolo (m/s)

2.4.4 Velocidad angular del motor

La velocidad de avance lineal del tornillo sin fin viene dada por el paso diametral del tornillo y el número de pasos por revolución del motor como se muestra en la ecuación 2.5:

$$V_{\text{tornillo}} = \frac{P}{\text{steps}} \quad (\text{ec 2.5})$$

Donde:

P: Paso del tornillo sin fin (*mm*)

Steps: Número de pasos que da el motor por revolución (*Pasos*)

V_{tornillo} : Velocidad de avance lineal del tornillo ($\frac{\text{mm}}{\text{Pasos}}$)

Finalmente se obtuvo una velocidad angular equivalente que debe tener el motor mediante la ecuación 2.6, donde dicha velocidad dependerá de la velocidad lineal del émbolo y la velocidad de avance del tornillo.

$$\omega_{eq} = \frac{V_{\text{émbolo}}}{V_{\text{Tornillo}}} \quad (\text{ec 2.6})$$

Donde:

ω_{eq} : Velocidad angular equivalente ($\frac{\text{Pasos}}{\text{seg}}$)

Debido que la señal del motor de paso es escalonada, el caudal a la salida de la jeringa es pausado en lugar de un flujo continuo. Para corregir esta señal de salida se procedió a diseñar un sistema de reducción de velocidad utilizando la opción de micro pasos que viene incluida en el driver seleccionado. De esta forma la señal de salida se comporta de una forma más lineal y se obtiene un flujo continuo. Por lo tanto, se propuso una reducción de velocidad 4:1, por lo que la velocidad de salida del motor expresada en número de pasos por minuto aumenta en un factor de 4. Por esta razón, la nueva velocidad angular del motor equivalente se procedió a calcular con la ecuación 2.7 mostrada a continuación:

$$\omega_{eq \text{ corregida}} = \omega_{eq} * 4 \quad (\text{ec 2.7})$$

2.4.5 Cálculo del Torque del motor:

Debido a la velocidad establecida en la sección 2.4.3 se procedió a revisar la ficha técnica del motor, obteniendo así el torque nominal para la velocidad especificada.

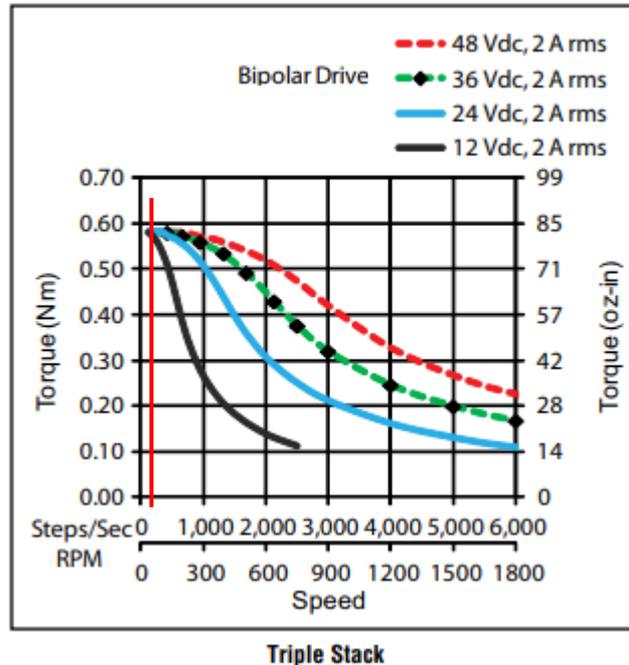


Figura 2.9 Gráfica Torque vs Velocidad Motor NEMA 17

Fuente: (PCB Linear , 2012)

Como se puede apreciar en la Figura 2.9, para el motor NEMA 17 de 12 Vdc Bipolar, se trabajó en el inicio de la curva, obteniendo 59 N*cm como torque nominal.

2.5 Diseño de Forma

2.5.1 Sistema de Reducción de Velocidad

Como se planteó en la sección 2.1 para lograr un flujo constante de 0.6 mL/h se debe diseñar un sistema de reducción de velocidad de 4:1 con el objetivo de suavizar la señal de salida. Este sistema se realizó mediante la opción de micro pasos que posee el driver conectado entre la tarjeta electrónica y el motor de paso. El objetivo de usar esta opción es dividir un paso del motor en varias secciones de pasos, obteniendo micro pasos. De esta manera se puede reducir la velocidad de

giro del motor, obteniendo un flujo menos pausado. Sin embargo, el torque generado por el motor disminuye.

La capacidad del torque usando la opción de micro paso incorporada en el driver viene dada por la tabla 2.24 mostrada a continuación:

Tabla 2.23 Porcentaje de Torque en función de la división de paso

Fuente: (Designfax, 2014)

Microsteps/full step	Holding Torque/Microstep
1	100%
2	70.71%
4	38.27%
8	19.51%
16	9.80%
32	4.91%
64	2.45%
128	1.23%
256	0.61%

Debido que la reducción de velocidad se realizó en 4:1, se debió seccionar un paso en 4 intervalos iguales, teniendo así un 38.27% del torque nominal del motor de paso seleccionado.

Para el seccionamiento de un paso en 4 secciones se debió configurar los pines de entrada del driver según lo especificado por el fabricante, la figura 2.10 mostrada a continuación muestra el tipo de configuración para los pines de entrada:

MS1	MS2	MS3	Microstep Resolution	Excitation Mode
L	L	L	Full Step	2 Phase
H	L	L	Half Step	1-2 Phase
L	H	L	Quarter Step	W1-2 Phase
H	H	L	Eighth Step	2W1-2 Phase
H	H	H	Sixteenth Step	4W1-2 Phase

Figura 2.10 Configuración de pines de entrada driver A4988ET

Fuente: (Allegro MicroSystems, 2016)

Esto quiere decir que se procedió a conectar pin MS2 del driver a una entrada de excitación como es la señal de 5V del microcontrolador Arduino, mientras que los pines MS1 y MS3 del driver fueron conectados a tierra. Sin embargo, para utilizar el driver de manera apropiada se debe considerar antes el amperaje máximo que va a soportar dicho instrumento, lo cual se muestra a continuación.

2.5.1.1 Voltaje de Referencia

El voltaje de referencia se lo procedió a calibrar en el driver para limitar la corriente por fase en las bobinas del motor, de esta manera el driver envía el amperaje necesario a las bobinas del motor de paso sin exponerlas a recibir un mayor amperaje del que pueden soportar. A continuación, se muestra la ecuación 2.8, la cual se utilizó para el cálculo del voltaje de referencia calibrado en el driver obtenida de la hoja técnica (Allegro MicroSystems, 2016):

$$V_{REF} = I_{MAX} * 8 * R_S \quad (ec\ 2.8)$$

Donde:

I_{MAX} : corriente nominal del motor de paso

R_S : Resistencia en Ohm del driver

2.5.1.2 Configuración del Driver A4988ET, Placa Electrónica y Motor de Paso

La Figura 2.11 mostrada a continuación muestra un esquema de las conexiones entre el motor de paso Nema17, microcontrolador Arduino y el driver A4988ET.

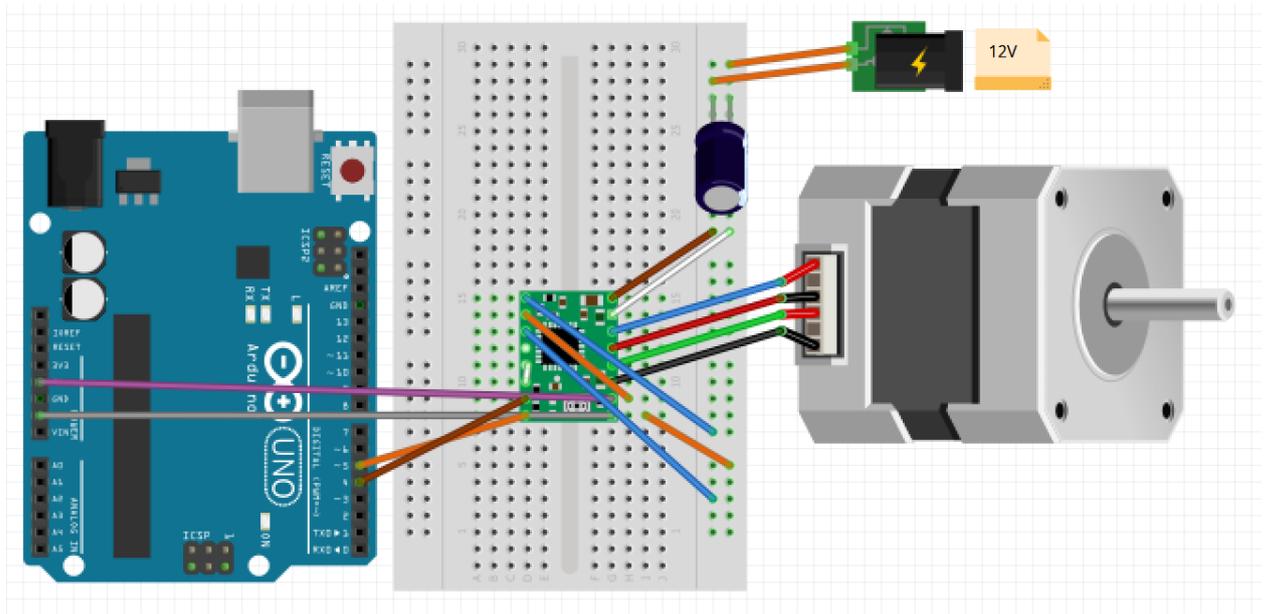


Figura 2.11 Configuración de Conexiones entre dispositivos

2.5.2 Mecanismo de Transmisión de Potencia

El actuador lineal que se utilizó es un tornillo de potencia de Acero Inoxidable (AISI 304) el cual se conecta directamente al motor de paso por medio de un acople. De esta forma, el torque aplicado por el motor seleccionado convierte el movimiento giratorio del tornillo de potencia en movimiento lineal, donde la tuerca hexagonal insertada en el soporte del émbolo desplaza dicho componente, el cual contiene el émbolo de la jeringa.

Para obtener el mínimo torque que debe aplicar el motor de paso al tornillo de normativas ACME, se utilizó la siguiente ecuación 2.9 obtenida del Libro de Diseño de Máquinas (Un enfoque integrado) Cuarta Edición (Norton, 2011), donde T es el torque necesario para desplazar el émbolo de la jeringa.

$$T_{\text{émbolo}} = \frac{P * d_p * (\mu * \pi * d_p + L * \cos \alpha)}{2 * (\pi * d_p \cos \alpha - \mu L)} + \mu_c * P * \frac{d_c}{2} \quad (\text{ec 2.9})$$

Se especifica cada variable de la ecuación a continuación:

(P): Carga axial total aplicada (N)

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

(L): Paso de rosca (m)

(α): Ángulo de Cuerda ACME

(d_c): Diámetro medio de la tuerca hexagonal (m)

(μ): Coeficiente de Fricción en un conjunto cuerda-tuerca lubricado con aceite

Una vez obtenido el torque necesario y el torque nominal final del motor se procedió a calcular el factor de seguridad del sistema en base a su capacidad de torque, el cual se obtuvo mediante la siguiente ecuación 2.10:

$$N = \frac{T_{final}}{T_{\acute{e}mbolo}} \quad (ec\ 2.10)$$

Donde:

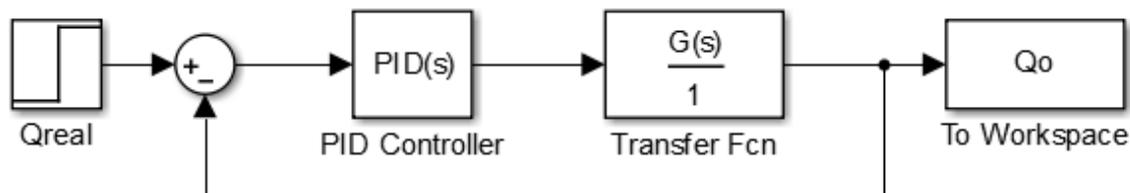
T_{final} : Es el torque Nominal multiplicado por el porcentaje correspondiente a $\frac{1}{4}$ de paso, mostrado en la Tabla 2.13.

$T_{\acute{e}mbolo}$: Es el torque requerido para desplazar el émbolo.

2.5.3 Sistema de Control

La bomba jeringa consta de un sistema de control el cual se propuso para monitorear la señal recibida por el sensor instalado en la jeringa, dicha señal entra al microcontrolador, el cual evalúa si el caudal a la salida de la jeringa es el mismo caudal solicitado por el usuario. Una vez evaluado, el microcontrolador envía una señal al driver, el cual mantiene, aumenta o disminuye la velocidad de giro del motor, ajustando el caudal de salida.

Figura 2.12 Diagrama de Bloques del Sistema de Control



La Figura 2.12 muestra el diagrama de bloques del sistema, en donde se procede a detallar la asignación de los bloques del proceso en la siguiente tabla:

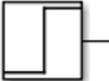
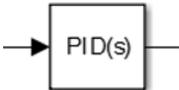
Bloque:	Asignación:
 Qreal	Señal de entrada del sistema, en este caso particular, la velocidad de giro del motor.
	Sumador
 PID Controller	El controlador PID, el cual tiene inmerso el sensor.
 Transfer Fcn	La Función Transferencia del Sistema.
 To Workspace	La señal de salida del Sistema, en este caso particular el Caudal de salida.

Tabla 2.24 Asignación de Bloques Sistema de Control

Para controlar el flujo se utilizó una tarjeta electrónica Arduino UNO, la cual funciona como canal de conexión entre el driver del motor de paso y el sensor. El sensor adquiere las señales de voltaje para enviar dichos valores a la tarjeta electrónica Arduino UNO, la cual recepta estas señales de manera analógica, para luego en base al código utilizado, realizar la configuración respectiva para controlar los pasos y las revoluciones del motor de paso.

2.5.3.1 Configuración Sistema de Control con Sensor de Presión PendoTECH

El sistema de control estuvo conformado por los siguientes elementos:

- Sensor de Presión PendoTECH
- Amplificador Diferencial
- Tarjeta microcontroladora Arduino UNO

A continuación, se muestra un esquema del Sistema de Control utilizando el sensor de presión PendoTECH en el prototipo de bomba jeringa.

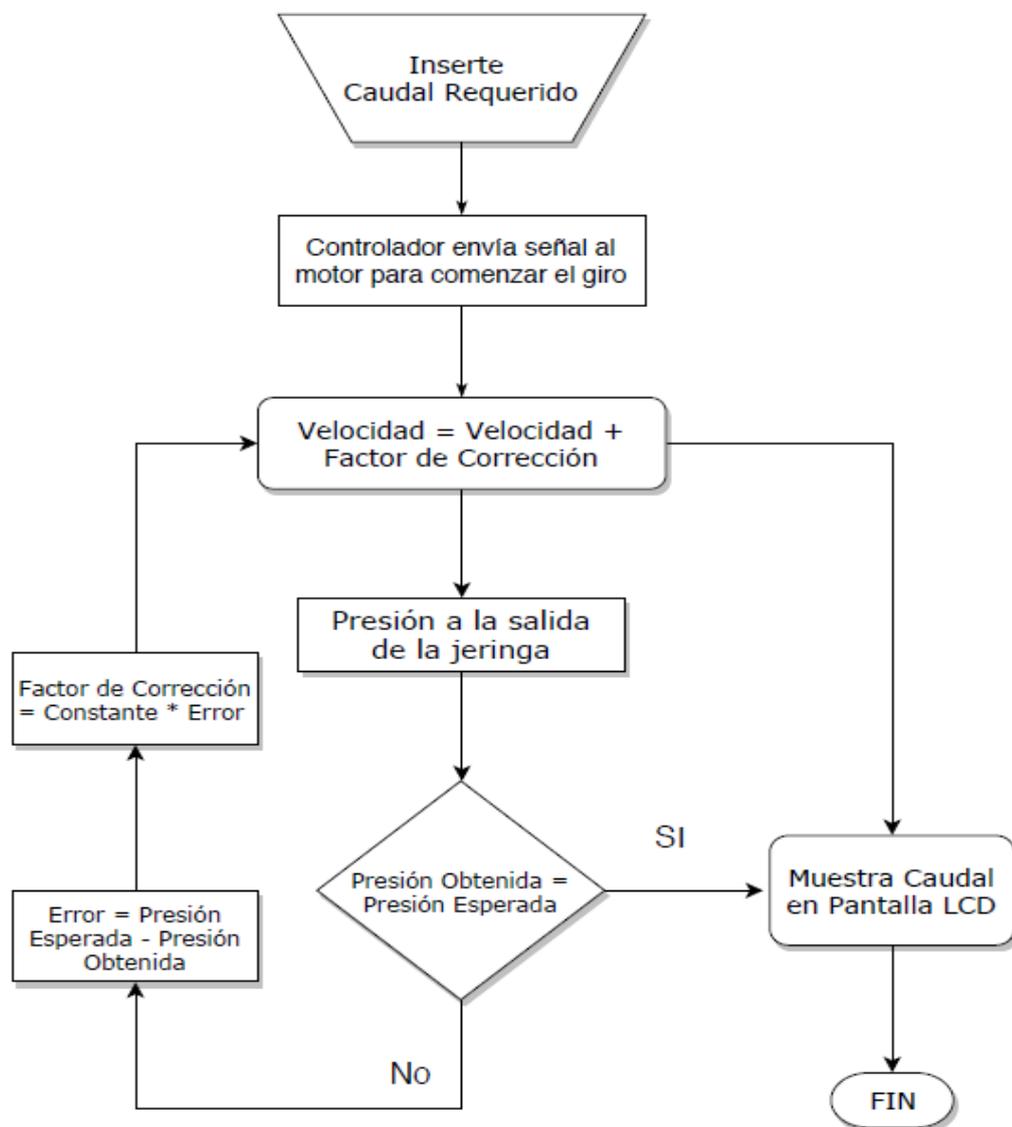


Figura 2.13 Esquema del Proceso del Sistema de Control

Una vez configurado el intervalo de velocidades en el motor de paso, se procedió a medir el caudal en función de la presión a la salida de la jeringa, el sensor se conectó a un amplificador diferencial con el propósito de ampliar la resolución del sensor. Finalmente se procedió a elaborar la curva de calibración del sensor de presión en función del caudal suministrado.

El punto de operación del sistema se obtiene en base a un pulso enviado al controlador. Se observó el comportamiento de la señal de salida del sensor, su tiempo de estabilización y el sobre nivel porcentual. Dichos valores permitieron definir la función transferencia del sistema, para posteriormente diseñar el controlador mediante la herramienta Sisotool del programa Matlab, obteniendo así, los parámetros del controlador.

2.5.3.2 Conexiones del Sensor

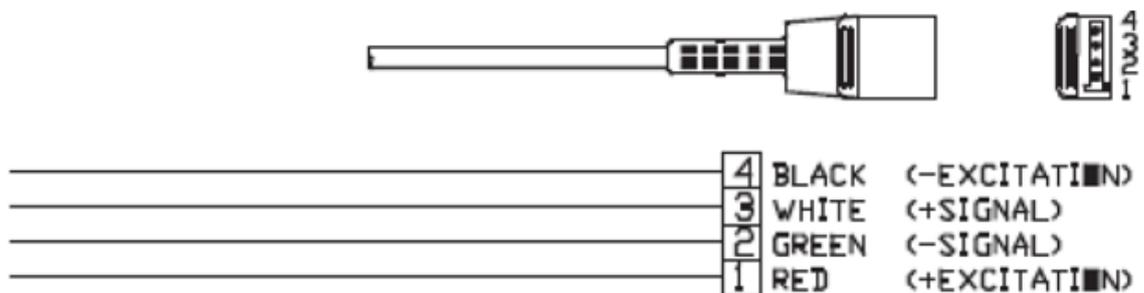


Figura 2.14 Especificaciones Conexiones Sensor PendoTECH

(Pendo Tech, 2016)

Dada la configuración de conexiones del sensor PendoTECH se procedió a conectar los cables: blanco (3) en la alimentación de 10 V DC, el cable verde (2) se conectó a tierra, el cable negro (4) y rojo (1) al amplificador que posteriormente se conectó al puerto analógico del Arduino (A0).

2.5.3.3 Cálculo de Presión Teórica

El rango de operación de caudales de la bomba tipo jeringa es de 0.6 – 5 mL/hr, mediante la ecuación de Bernoulli se procedió a calcular los rangos de presión a los cuales opera el sensor de presión:

De la igualdad de Bernoulli tenemos:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho gh_2$$



Figura 2.15 Esquema Cálculo de Presión

Como se muestra en la Figura 2.15, el punto 1 es la salida de la jeringa, donde se calculó el valor de presión correspondiente al valor del caudal. Debido que el punto 1 y 2 se encuentran al mismo nivel, se simplifican la energía potencial en dichos puntos. El punto 2 se encuentra abierto a la atmósfera, por lo tanto, la presión manométrica es igual a cero. Finalmente obtenemos la siguiente expresión:

$$\Delta P = \frac{1}{2}\rho V_1^2 \quad (\text{ec 2.11})$$

Donde:

(ρ): Densidad del fluido (kg/m^3)

(V_1): Velocidad del fluido la cual será calculada en base al caudal y área transversal de la jeringa (m/s)

2.5.3.4 Amplificador Diferencial de Señal

La señal a la salida del sensor de presión PendoTECH está limitada en la escala del pico psig (Ver cálculos en la Sección A de Apéndice), por lo tanto, se procedió a amplificar dicha señal con la finalidad de ampliar la resolución del sensor (milivoltios) el cual está conectado a la señal analógica del Arduino.

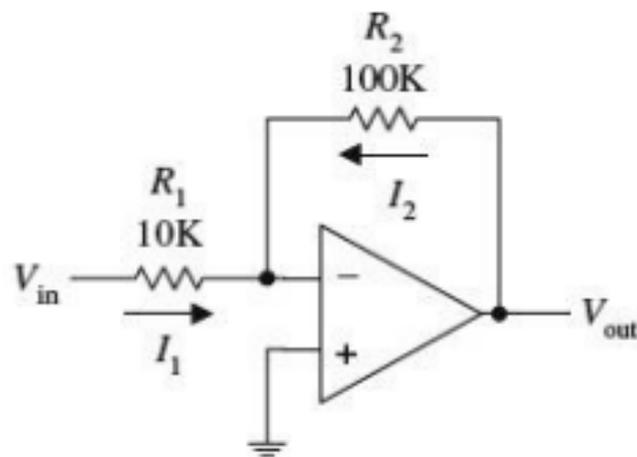


Figura 2.16 Amplificador Diferencial

(Paul Scherz, 2016)

Como se muestra en la Figura 2.16 se elaboró un amplificador utilizando una relación de resistencias de 1:500, es decir, la señal de salida se amplificó 500 veces la señal de entrada. Los componentes para el amplificador se detallan a continuación:

Tabla 2.25 Componentes Amplificador Diferencial

Amplificador:	LM293d
2 Resistencias:	10 k Ω
2 Resistencias:	220 Ω
2 Resistencias:	100 k Ω

Finalmente se procedió a conectar la salida del amplificador al puerto analógico del Arduino, en donde se observó la respuesta del sensor al aplicar un caudal.

2.5.3.5 Programación de microcontrolador Arduino Software (IDE)

Para la programación de la tarjeta electrónica Arduino Uno se incluyó un LCD Keypad Shield, el cual se utilizó para ingresar los valores de caudales directamente por el usuario. Por lo tanto, el código propuesto en Anexos A, contiene tanto la configuración del motor de paso, como la configuración de la interfaz de usuario del LCD Keypad Shield. Cabe mencionar que en este código se utilizó las librerías LiquidCrystal y LCDKeypad.

2.5.4 Fabricación de Piezas Impresas en 3D

2.5.4.1 Consideraciones de Diseño

Para la fabricación de piezas impresas en 3D se procedió a diseñar los cuatro elementos como se mencionó en la sección 2.4.1. A continuación, se muestra en la siguiente tabla las consideraciones de diseño que se tuvo para cada pieza.

Tabla 2.26 Consideraciones Diseño de Piezas

Pieza	Consideración de Diseño
Soporte del Montaje del Motor de Paso	Debido que el montaje del motor posee un ancho mayor al riel de aluminio se debe colocar un soporte. Este soporte debe acoplarse al riel y poseer 4 agujeros que permitan ensamblarlo al montaje del motor mediante tornillos.
Soporte del Émbolo	La zona superior donde se coloca el émbolo posee una longitud igual a 14.30 mm, para que ingrese el émbolo con presión.
Soporte de Lengüeta	La parte superior donde se coloca la lengüeta tiene un espacio mayor a 1.3 mm, el cual es el ancho de la lengüeta utilizada.
Soporte de Aguja	El agujero donde reposa la aguja posee un diámetro mayor a 11.7 mm, el cual es el diámetro interior del cuerpo de la jeringa.

Cabe mencionar que el agujero principal de los soportes del émbolo, lengüeta y aguja deben ser concéntricos con respecto a la varilla roscada.

2.5.4.2 Consideraciones de Impresión en 3D

Para la impresión de las piezas mencionadas en la sección 2.5.4.1 se usó la técnica FDM (*Fused Deposition Modeling en sus siglas en inglés*), donde se utilizó el software *Matter Control*, donde se consideró el porcentaje de relleno para las piezas, temperaturas de calentamiento para el PLA, la inclusión de soportes, etc. Finalmente se obtuvo el código G para la fabricación de las piezas, dicho código se insertó en la impresora 3D del Laboratorio de Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción por medio de una tarjeta extraíble SD.

Es importante mencionar que las primeras piezas fueron destinadas como prototipo del sistema, donde se probó se funcionamiento y ensamble, por lo cual, las primeras piezas fueron del 30% de relleno. Una vez culminadas todas las pruebas de funcionamiento y especificaciones de diseño, se procedió a imprimir las piezas finales con un relleno del 40%, aumentando el tiempo de impresión y la cantidad de PLA utilizado.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Diseño final del Prototipo

El diseño final del prototipo se muestra a continuación en vista isométrica, donde se realizaron cambios con respecto al diseño conceptual inicial. Los planos de cada elemento de la bomba jeringa con sus respectivas dimensiones se encuentran en Apéndice B.

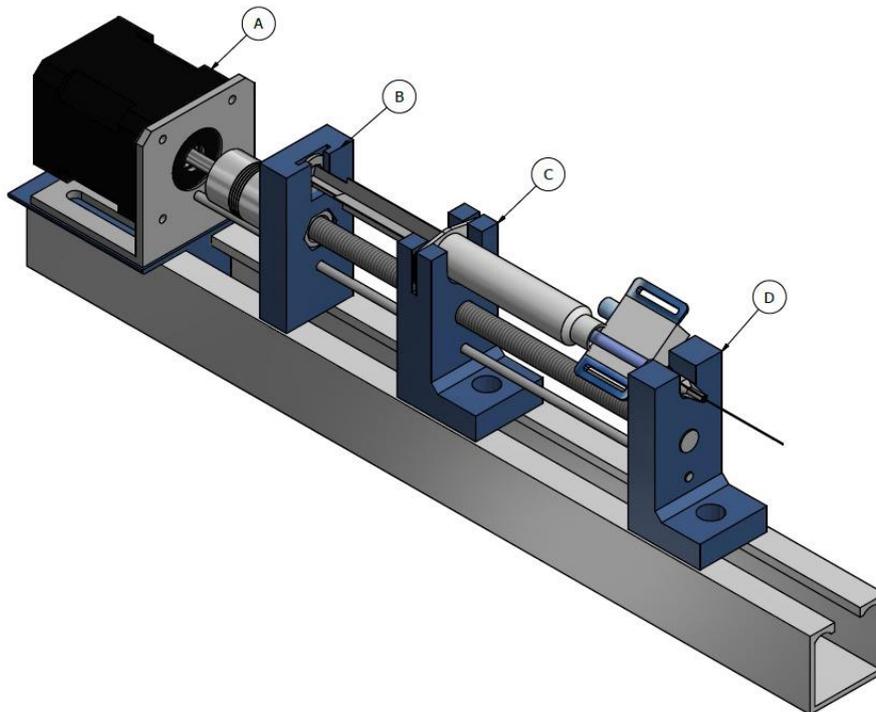


Figura 3.1 Vista Isométrica del Prototipo Final.

(A. Montaje del Motor sobre riel de aluminio. B. Soporte del émbolo, incluida tuerca hexagonal en su interior. C. Soporte de Lengüeta. D. Soporte de aguja)

Cabe mencionar, que para el diseño final se consideró solo una varilla circular en la zona inferior y se eliminó el sistema de engranes debido al uso de la opción de micro pasos que posee el driver del motor utilizado, por lo que se utilizó un acople para unir el motor de paso al tornillo sinfín.

3.2 Sistema de Transmisión

3.2.1 Fuerza mínima para desplazamiento del émbolo

Como se definió en la sección 2.4.1 la fuerza mínima para desplazar el émbolo de una jeringa de 5 mL viene dado por la ecuación 2.3. Debido que no se obtuvo la celulosa, se procedió a calcular la fuerza utilizando aceite SAE 10W30 con una viscosidad de 0.17 kg/ms de marca Chevron, obteniendo como resultado una fuerza aproximada de 4 N.

$$\begin{aligned}F_{min} &= m_{totales} * g && \text{(ec. 2.1)} \\F_{min} &= (0.4) \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \\F_{min} &= \mathbf{3.924 \text{ N}}\end{aligned}$$

Mediante la ecuación 2.2 se calculó el peso de la pieza impresa en 3D, la cual aloja el émbolo de la jeringa. El peso de la pieza es de aproximadamente 24 gramos.

$$\begin{aligned}m_{soporte} &= V_{soporte} * \rho_{PLA} && \text{(ec. 2.2)} \\m_{soporte} &= 19.401 \text{ cm}^3 * 1.24 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \\m_{soporte} &= \mathbf{24.0574 \text{ g}} \\m_{soporte} &= \mathbf{0.0241 \text{ kg}}\end{aligned}$$

Finalmente se obtuvo la fuerza total mediante la ecuación 2.3, la cual suma la fuerza mínima para desplazar el émbolo y el peso del soporte.

$$\begin{aligned}F_{total} &= F_{min} + m_{soporte} * g && \text{(ec. 2.3)} \\P &= 3.92 + (0.0241) * (9.81) \\P &= \mathbf{4.1560 \text{ N}}\end{aligned}$$

3.2.2 Velocidad Lineal del émbolo

Mediante la ecuación 2.4 se calculó la velocidad lineal del émbolo en función del caudal que debe suministrar la jeringa y el área transversal de la jeringa de 5 mL, obteniendo como resultado una velocidad lineal del émbolo de 5.58 mm/hr para un caudal de 0.6 mL/hr. Debido a las bajas velocidades de avance lineal se usó un tornillo sin fin con un paso de 1.25 mm, de esta forma se pudo obtener mayor precisión del avance lineal del émbolo de la jeringa.

$$V = \frac{Q}{A} \quad (\text{ec 2.4})$$

$$V_{0.6 \text{ mL/hr}} = \frac{\left(0.6 \frac{\text{mL}}{\text{hr}} * \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}\right)}{\pi * \left(\frac{(11.7 * E - 3)^2 \text{ m}^2}{4}\right)}$$

$$V_{0.6 \text{ mL/hr}} = 5.58 \frac{\text{mm}}{\text{hr}}$$

Para un caudal de 5 mL/hr:

$$V_{5 \text{ mL/hr}} = \frac{\left(5 \frac{\text{mL}}{\text{hr}} * \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}\right)}{\pi * \left(\frac{(11.7 * E - 3)^2 \text{ m}^2}{4}\right)}$$

$$V_{5 \text{ mL/hr}} = 46.5 \frac{\text{mm}}{\text{hr}}$$

3.2.3 Velocidad angular del motor

Mediante la ecuación 2.5 se procedió a calcular el avance lineal del tornillo sin fin, el cual es de denominación ACME, con un diámetro exterior de 8 mm y un paso diametral de 1.25 mm. El motor de paso tiene una resolución de $1.8 \frac{\text{grados}}{\text{paso}}$, es decir $200 \frac{\text{pasos}}{\text{revolución}}$.

$$V_{\text{tornillo}} = \frac{P}{\text{steps}} \quad (\text{ec 2.5})$$

$$V_{\text{tornillo}} = \frac{1.25 \text{ mm}}{200 \text{ pasos}}$$

$$V_{\text{tornillo}} = 0.00625 \frac{\text{mm}}{\text{paso}}$$

La velocidad angular equivalente del motor de paso se definió en la ecuación 2.6, la cual relaciona la velocidad lineal del émbolo de jeringa con la velocidad de avance del tornillo sin fin, calculando así el número de pasos por minuto que debe dar el motor para lograr el caudal deseado.

$$\omega_{eq} = \frac{V_{\text{émbolo}}}{V_{\text{tornillo}}} \quad (\text{ec 2.6})$$

$$\omega_{eq \text{ 0.6 mL/hr}} = \frac{5.58 \frac{\text{mm}}{\text{hr}}}{0.00625 \frac{\text{mm}}{\text{paso}}}$$

$$\omega_{eq \text{ 0.6 mL/hr}} = 892.8 \frac{\text{pasos}}{\text{hora}} = 14.88 \frac{\text{pasos}}{\text{min}}$$

$$\omega_{eq \text{ 0.6 mL/hr}} = 0.248 \frac{\text{pasos}}{\text{seg}}$$

De igual manera, se procedió a calcular la velocidad angular equivalente del motor para un caudal de 5 mL/hr:

$$\omega_{eq\ 5\ mL/hr} = \frac{46.5\ \frac{mm}{hr}}{0.00625\ \frac{mm}{paso}}$$

$$\omega_{eq\ 5\ mL/hr} = 7440\ \frac{pasos}{hora} = 124\ \frac{pasos}{min}$$

$$\omega_{eq\ 5\ mL/hr} = 2.067\ \frac{pasos}{seg}$$

De esta manera, se procedió a calcular el intervalo de tiempo en el cual el motor dará cada paso, para un caudal de 0.6 mL/hr:

$$Intervalo = \frac{60}{14.88}$$

$$Intervalo = 4.03\ s \approx 4\ s$$

De igual manera se calculó el intervalo de tiempo en el cual el motor dará un paso para un caudal de 5 mL/hr:

$$Intervalo = \frac{60}{124}$$

$$Intervalo = 0.48\ s \approx 0.5\ s$$

Este resultado quiere decir que para un caudal de 0.6 mL/hr, el motor debe dar un paso cada 4.03 segundos, lo que dio como resultado una señal de salida escalonada, mientras que para un caudal de 5 mL/hr el motor dará 2 pasos por cada segundo. Por lo tanto, el caudal de salida para 0.6 mL/hr no fue constante. De esta forma, se utilizó la opción de micro pasos que posee el driver con el fin de linealizar dicha señal. La Figura 3.1 muestra una interpretación de la señal de salida sin el sistema de reducción de velocidad (gráfica color azul) y la señal de salida

aplicando un sistema de reducción de 4:1 (gráfica color naranja). Cabe recalcar que dicho sistema de reducción es netamente eléctrico.

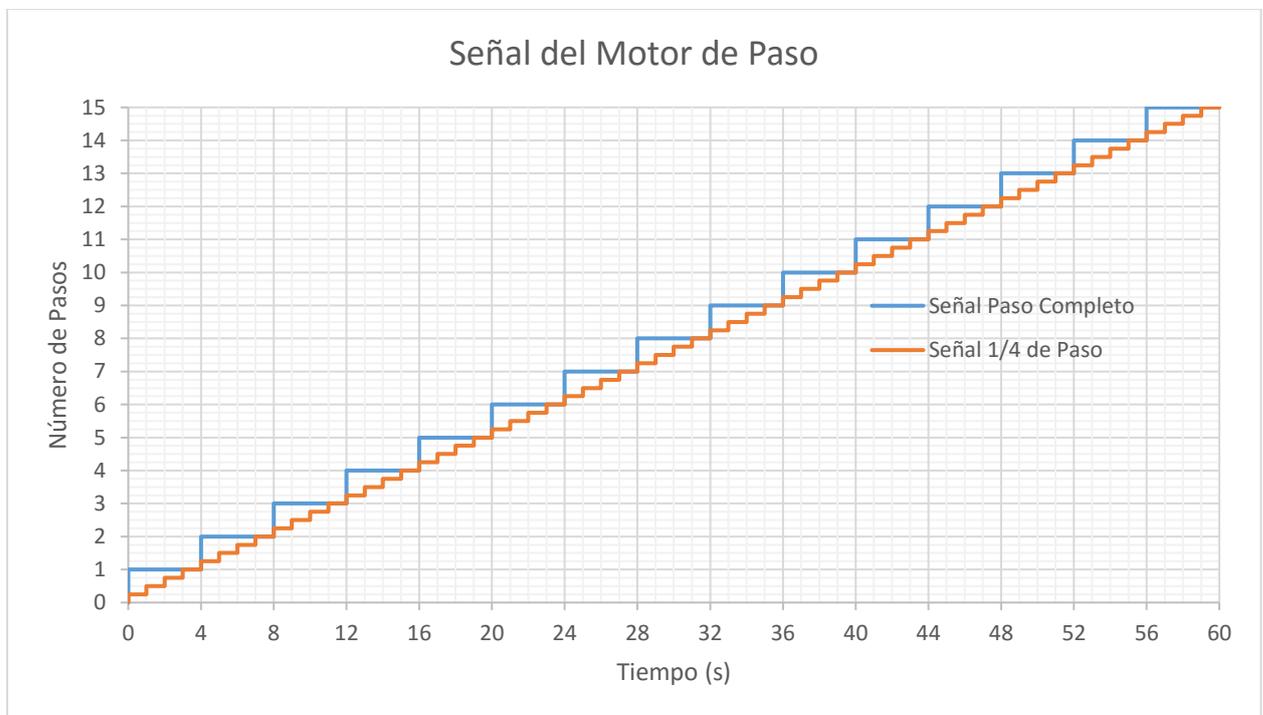


Figura 3.2 Señal del motor a paso completo y a ¼ de paso

Mediante la ecuación 2.7 se calculó la velocidad angular corregida de salida para el motor de paso con el propósito de obtener un caudal continuo mediante una división de pasos que del driver A4988ET.

Velocidad angular equivalente corregida para 0.6 mL/hr:

$$\omega_{eq\ corregida} = \omega_{eq} * 4 \quad (ec\ 2.7)$$

$$\omega_{eq\ corregida} = 14.48 \frac{pasos}{min} * 4$$

$$\omega_{eq\ corregida\ a\ 0.6\ \frac{mL}{hr}} = 59.52 \frac{micropasos}{min} = 0.992 \frac{micropasos}{seg}$$

$$\omega_{eq\ corregida\ a\ 0.6\ \frac{mL}{hr}} \approx 1 \frac{micropasos}{seg} = 0.298\ RPM$$

Velocidad angular equivalente corregida para 5 mL/hr:

$$\omega_{eq\ corregida} = 124 \frac{pasos}{min} * 4$$

$$\omega_{eq\ corregida\ a\ 5\ mL/hr} = 496 \frac{micropasos}{min} = 8.267 \frac{micropasos}{seg}$$

$$\omega_{eq\ corregida\ a\ 5\ mL/hr} \approx 8.30 \frac{pasos}{seg} = 2.48\ RPM$$

3.3 Implementación de Reductor de Velocidad

Como se planteó en la sección 2.5.1, se implementará un reductor de velocidad, con la finalidad de suavizar la señal de salida del motor, obteniendo así un caudal constante.

3.3.1 Voltaje de Referencia

Como primer punto, se procedió a calibrar el valor de voltaje de referencia, el cual viene dado por la ecuación 2.8 mostrada en la sección 2.5.1.2, donde se obtuvo un voltaje de referencia con un valor de 0.86 V.

$$V_{REF} = I_{MAX} * 8 * R_S \quad (ec\ 2.8)$$

$$V_{REF} = (1.7\ A) * 8 * (0.063\ \Omega)$$

$$V_{REF} = 0.86\ V$$

Para la calibración del voltaje de referencia en el driver se procedió a conectar la fuente de 5 V al driver para lo cual se utilizó la tarjeta electrónica programable Arduino y un multímetro para medir el voltaje en el potenciómetro del driver. De esta manera, con ayuda de un desarmador se graduó el potenciómetro hasta obtener un voltaje de 0.86 V.

3.3.1.1 Calibración del Driver A4988ET

Al finalizar la regulación del voltaje de referencia se procedió a comprobar que el motor no pierda pasos debido al ajuste de los micro pasos, para ello se empleó una cinta de papel, la cual se colocó sobre el eje del motor se marcó su punto inicial y final durante una revolución, comprobando que al finalizar una revolución vuelva al mismo punto inicial.

3.4 Transmisión de Potencia

3.4.1 Torque del motor

El torque del motor se vio reducido debido al micro paso seleccionado, como se lo indicó en la sección 3.1.3 la velocidad angular del motor fue reducida en un factor de 4:1, por lo tanto, el motor redujo su capacidad del torque nominal al 38.27% según la Tabla 2.13. De esta forma, se tendrá un torque nominal de $22.58 N*cm$.

$$T_{final} = T_{nominal} * \%_{a\ 1/4\ de\ paso}$$

$$T_{final} = 59 N * cm * 38.27\%$$

$$T_{final} = 22.58 N * cm$$

3.4.1.1 Torque requerido del sistema

Como se definió en la sección 3.1.2 se utilizó un tornillo sin fin con un paso de $1.25\ mm$, donde su paso permitió al sistema desplazarse con mayor precisión. En base a la ecuación 2.9, se calculó el torque necesario para desplazar el émbolo de la jeringa, el cual fue de $0.61 N*cm$.

$$T_{\acute{e}mbolo} = \frac{P * d_p * (\mu * \pi * d_p + L * \cos \alpha)}{2 * (\pi * d_p \cos \alpha - \mu L)} + \mu_c * P * \frac{d_c}{2} \quad (ec\ 2.9)$$

$$T_{\acute{e}mbolo} = \frac{(4.1560) * 0.008 * (0.15 * \pi * 0.008 + 0.00125 * \cos 14.5^\circ)}{2 * (\pi * 0.008 * \cos 14.5^\circ - 0.15 * 0.00125)} + 0.15 * 4.1560 * \frac{0.0085}{2}$$

$$T_{\text{émbolo}} = 0.0061 N * m$$

$$T_{\text{émbolo}} = \mathbf{0.61 N * cm}$$

Posteriormente se consideró el factor de seguridad en base al torque final obtenido del motor y el torque requerido:

$$N = \frac{T_{\text{final}}}{T_{\text{émbolo}}} \quad (\text{ec 2.10})$$

$$N = \frac{22.58 N * cm}{0.61 N * cm}$$

$$N = \mathbf{37.14 \approx 37}$$

De esta forma se obtuvo un factor de seguridad aproximado de 37%. Por lo tanto, el motor puede alcanzar caudales aún más pequeños en el caso que se necesite mayor precisión; también puede operar con caudales mayores, aumentando el diámetro de la jeringa hasta 60 mL.

3.5 Análisis del Sistema de Control

Como se definió en la sección 2.3 se empleará un sensor de presión para elaborar el Sistema de Control PID, para ello se procedió a calcular las presiones teóricas en el interior del sensor mediante la ecuación de Bernoulli:

3.5.1 Cálculo de Presión Teórica

Mediante la ecuación 2.10 se procedió a calcular la presión a la salida de la jeringa en base a la velocidad de salida del fluido, por ello, como primer paso se procedió a calcular la velocidad de salida del fluido en base al caudal solicitado y al área transversal de la jeringa de 0.6 mL/hr:

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V_{0.6 \text{ mL/hr}} = \frac{0.6 \frac{\text{mL}}{\text{hr}} * \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} * \frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}}}{\frac{\pi}{4} * (11.7 * 10^{-3} \text{ m})^2}$$

$$V_{0.6 \text{ mL/hr}} = 1.55 * 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

De igual manera, se procedió a calcular la velocidad de salida del fluido para un caudal de 5 mL/hr:

$$V_{5 \text{ mL/hr}} = \frac{5 \frac{\text{mL}}{\text{hr}} * \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} * \frac{1 \text{ hr}}{3600 \text{ s}}}{\frac{\pi}{4} * (11.7 * 10^{-3} \text{ m})^2}$$

$$V_{5 \text{ mL/hr}} = 1.29 * 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Finalmente se calculó la presión teórica, para ello fue necesario conocer la densidad del fluido, la cual fue del aceite 10W30, cuya densidad es de 859 Kg/m³.

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho V_1^2 \quad (\text{ec 2.11})$$

$$\text{Presión}_{0.6 \text{ mL/hr}} = \frac{1}{2} * \left(859 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) * \left(1.55 * 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2$$

$$\text{Presión}_{0.6 \text{ mL/hr}} = 1.03 * 10^{-9} \text{ Pa}$$

De igual manera se obtuvo la presión teórica para un caudal de 5 mL/hr:

$$Presión_{5\text{ mL/hr}} = \frac{1}{2} * \left(859 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) * \left(1.29 \times 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2$$

$$Presión_{5\text{ mL/hr}} = 7.17 \times 10^{-8} \text{ Pa}$$

Finalmente se obtuvo el intervalo de presiones en psig:

$$1.5 \times 10^{-12} - 1 \times 10^{-11} \text{ psig}$$

3.5.2 Amplificador Diferencial de Señal

Con el objetivo de amplificar la señal 500 veces, se procedió a utilizar un amplificador LM358p, el cual amplía la señal de entrada mediante diferenciación de resistencias, es decir, la relación de resistencias entre la salida y la entrada del dispositivo dará la relación de amplificación.

Las resistencias empleadas a la entrada del amplificador fueron de 220Ω , mientras que a la entrada del amplificador se utilizó resistencias de $110 \text{ K}\Omega$. Debido que no se encontró resistencias de $110 \text{ K}\Omega$ se procedió a colocar 2 resistencias de $100 \text{ K}\Omega$ conectadas en serie con 2 resistencias de $10 \text{ K}\Omega$.

3.5.3 Curva del Sistema

La Figura 3.2 muestra la relación entre el caudal suministrado por la bomba y la señal analógica del sensor de presión con una amplificación de 500, dicha gráfica indica la curva del sistema, la cual fue considerada la implementación del Sistema de Control.

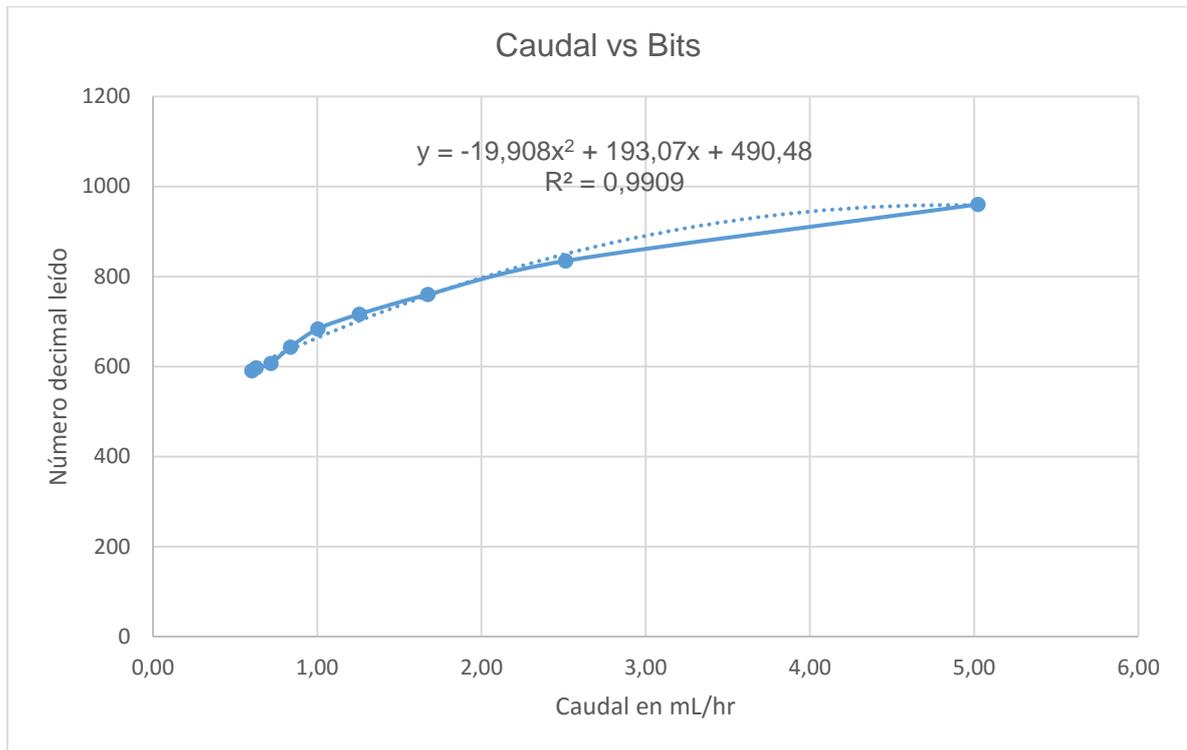


Figura 3.3 Gráfica Experimental Caudal vs Número decimal leído del ADC.

(Línea sólida muestra la curva del sistema. Línea punteada muestra la aproximación cuadrática)

Mediante la herramienta de Excel se construyó una tabla de datos, en la cual se colocó los valores en bits a la salida del sensor versus el caudal ingresado, obteniendo así la ecuación del sistema, dicha curva mantiene una relación cuadrática. Se obtuvo una relación de semejanza entre la curva del sistema y la curva de la ecuación de 0.9909, lo cual indica que el sistema puede ser modelado mediante la siguiente expresión:

$$y = -19.908x^2 + 193.07x + 490.48 \quad (\text{ec 3.1})$$

Donde:

y: es la señal analógica medida (bits)

x: es el caudal suministrado (mL/hr)

De esta manera, se obtiene el valor en bits esperado a la salida del sensor la cual dependerá del valor del caudal suministrado.

3.5.4 Respuesta del Sistema a una Entrada Escalón

Para definir la función transferencia del sistema y el sistema de Control, se procedió a la toma de datos del sistema, en la cual, se envió un pulso (cambio del valor de caudal), observando el comportamiento del sistema ante la señal, calculando el tiempo de estabilización, sobre nivel porcentual.

En la figura 3.4 mostrada a continuación podemos observar el comportamiento del sistema, inicialmente el sistema se encontraba operando a un caudal de 0.84 mL/hr y se envió el pulso para que el sistema opere a 5 mL/hr , donde se observó la relación de voltaje vs tiempo a la salida del sensor de presión conectado al amplificador.

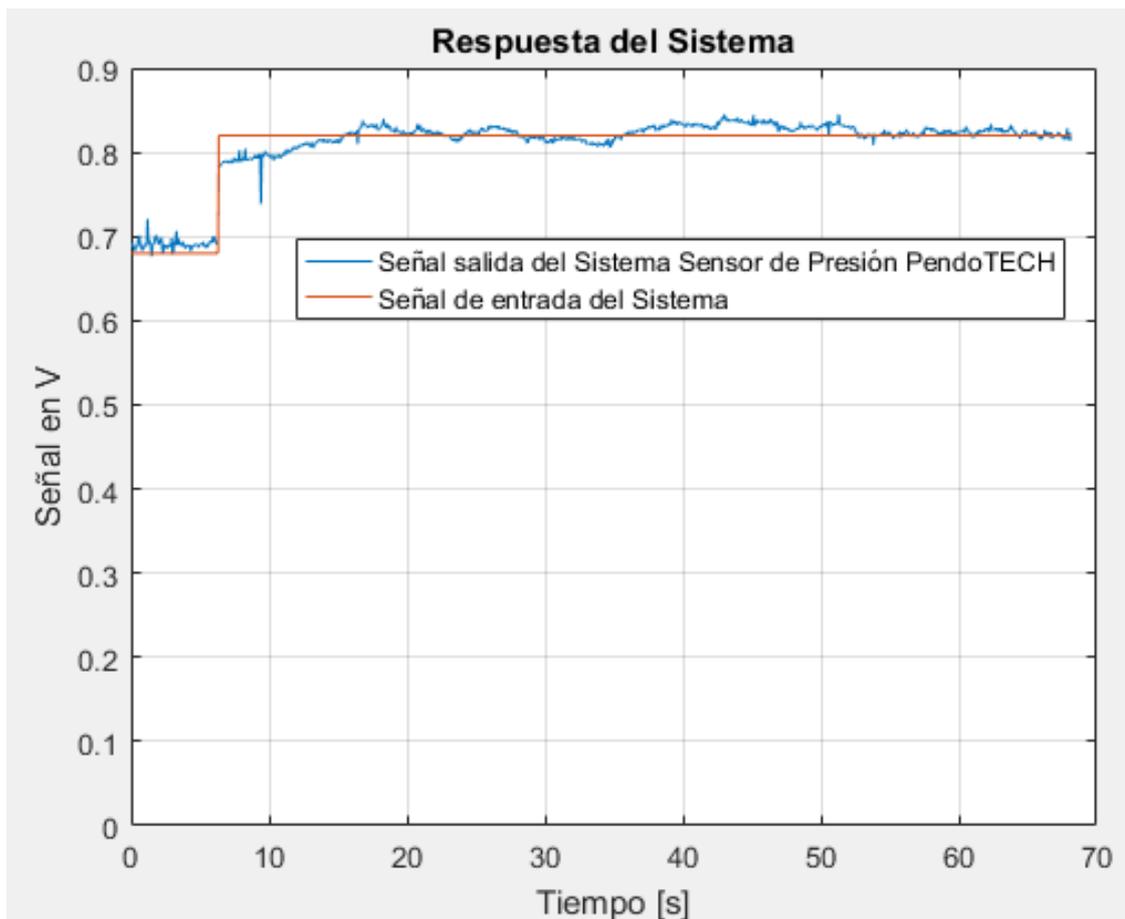


Figura 3.4 Respuesta del Sistema ante una Entrada Escalón

Mediante la gráfica Respuesta del Sistema ante una Entrada Escalón, se definió el punto de operación en 0.06 segundos, tiempo en el cual se envió el pulso a la bomba para aumentar el caudal, se obtuvo un tiempo de estabilización de 45.12 segundos y un sobrevuel porcentual del 3%.

Dichos valores característicos de la gráfica permitieron la definición de la función transferencia del sistema, la Figura 3.5 muestra la similitud entre la gráfica a la salida del sensor y la función transferencia definida.

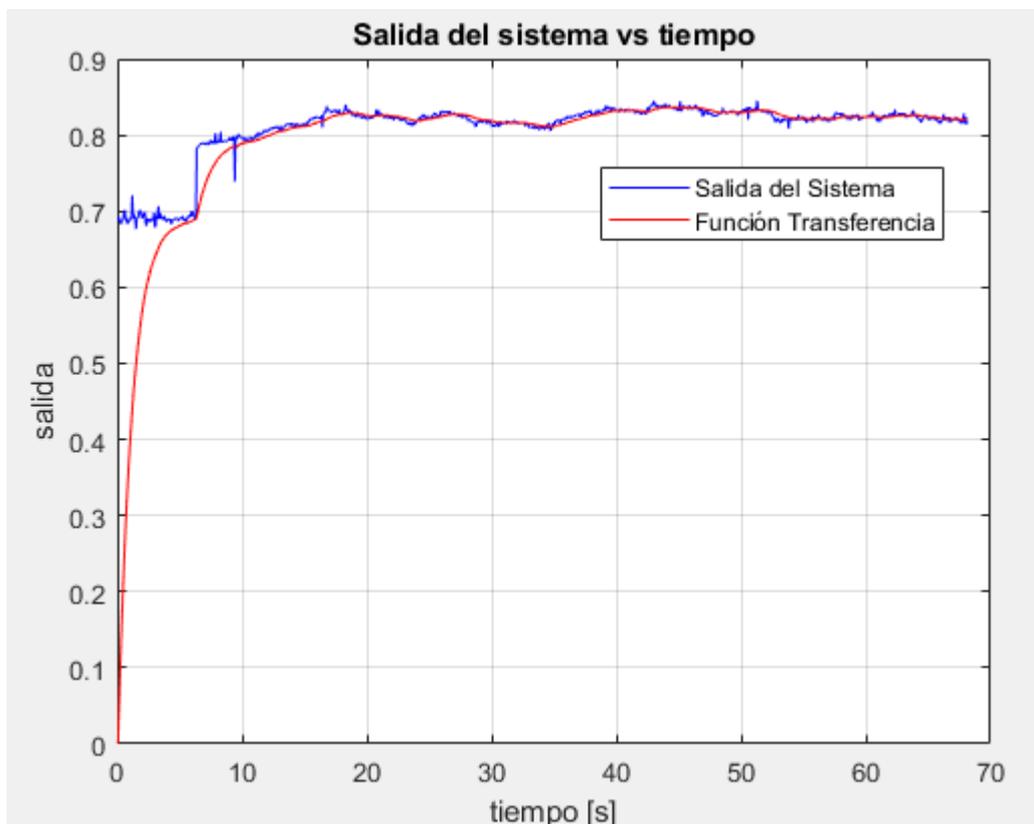


Figura 3.5 Respuesta del Sistema y Función Transferencia del Sistema.

La gráfica en color naranja muestra la Función Transferencia del Sistema, mientras que la gráfica en color celeste muestra la respuesta del sensor de Presión. La función transferencia queda definida con la siguiente expresión:

$$Función Transferencia = \frac{0.8865}{s + 0.8865}$$

3.5.5 Diseño Controlador PI

Una vez obtenida la función transferencia del Sistema, se procedió a usar la herramienta de Sisotool del programa Matlab, en la cual se diseñó el controlador. Para ello se ingresó los requerimientos del sistema como son: tiempo de estabilización de 45.12 segundos y sobre nivel porcentual del 3%, tomando las consideraciones anteriores se procedió a colocar un polo e integrador en el lugar geométrico de las raíces hasta obtener en la función escalón una curva con los requerimientos planteados inicialmente. Al inicio del proyecto se consideró que el controlador sea PID, pero al diseñar el controlador en la herramienta Sisotool se obtuvo que los requerimientos del sistema se logran mediante un controlador PI. A continuación, se muestra las gráficas del lugar geométrico de las raíces y respuesta escalón obtenidas para el Controlador PI.

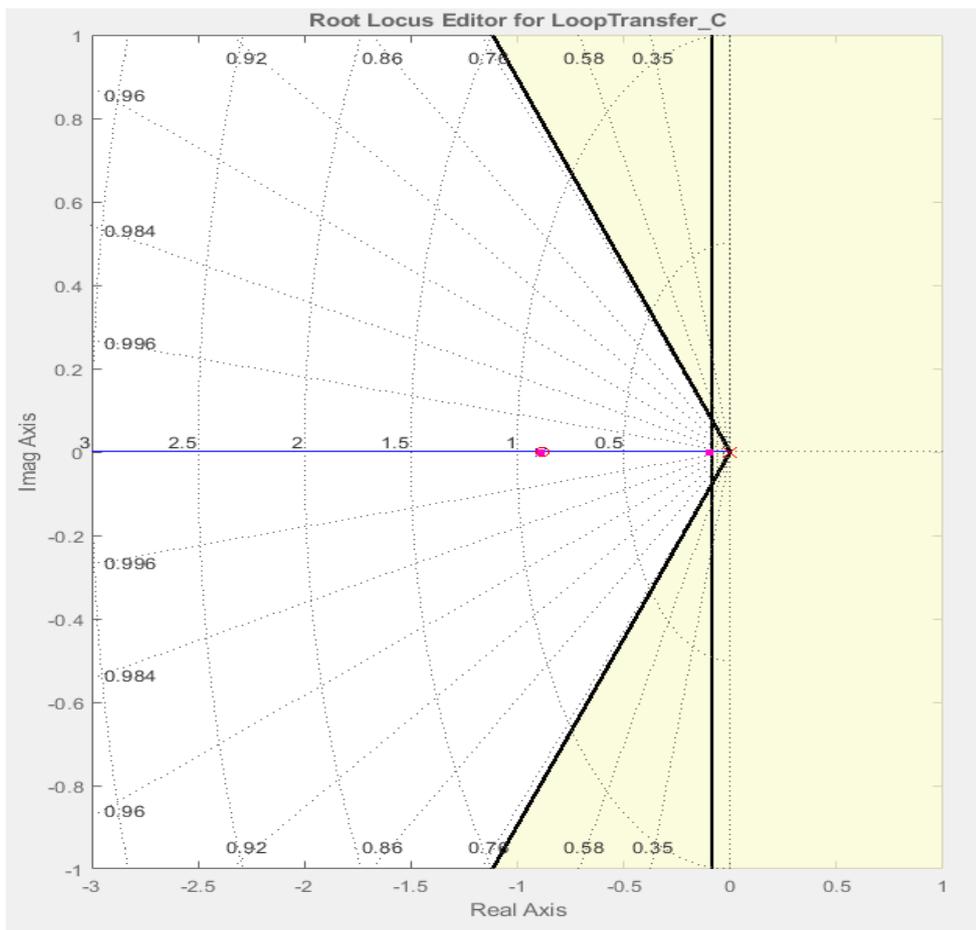


Figura 3.6 Lugar Geométrico de las Raíces Controlador PI

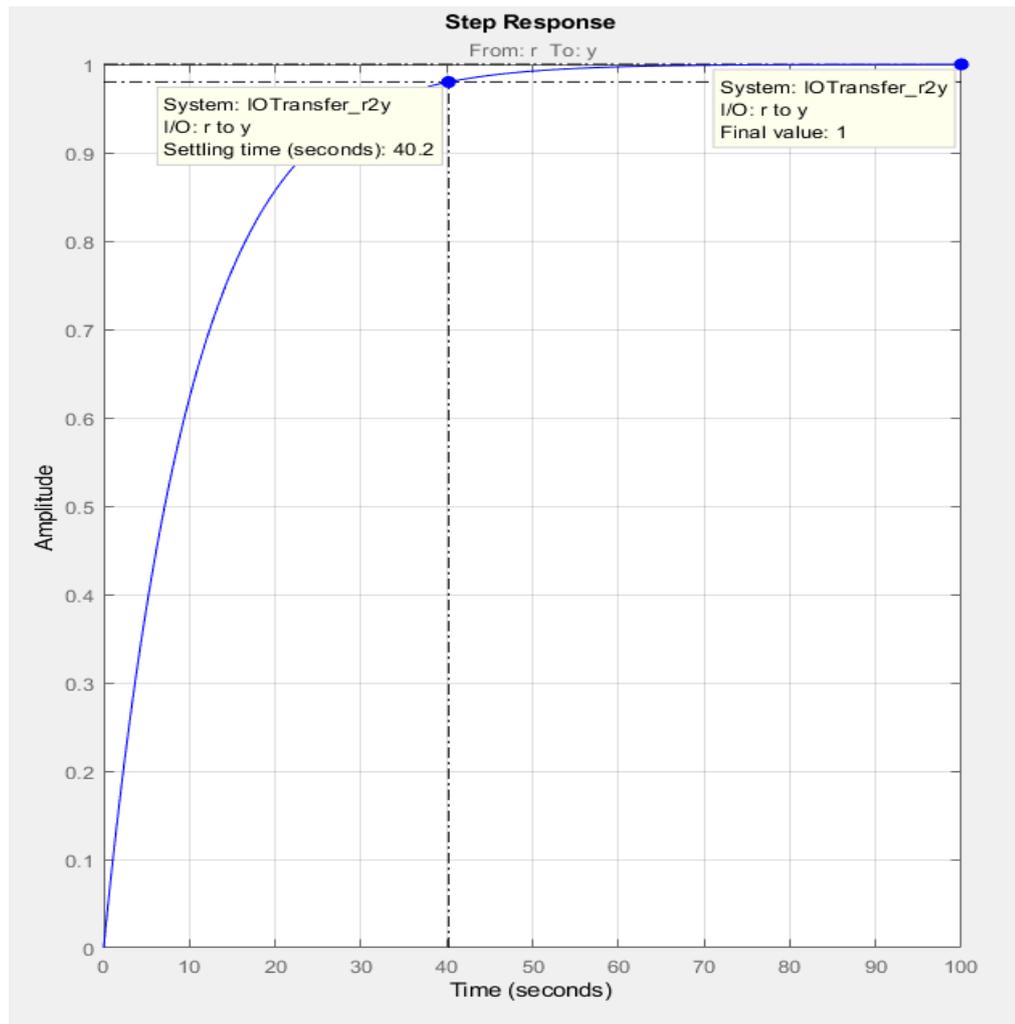


Figura 3.7 Respuesta Escalón Controlador PI

Función del controlador PI:

$$PI = \frac{0.11033(s + 0.882)}{s}$$

Se obtuvo un tiempo de estabilización de 40.2 segundos para el diseño del controlador PI, obteniendo 5 segundos menos que el tiempo de estabilización del sistema, el cual fue de 45.2 segundos; se obtuvo además 0% de sobrenivel porcentual, siendo estos, resultados que se aproximan a los requerimientos del sistema.

Por lo tanto, la función transferencia global del sistema queda definida por la siguiente expresión:

$$\text{Función Transferencia Global} = \frac{0.0978(s + 0.882)}{s(s + 0.8865)}$$

Al momento de implementar el controlador PI al sistema de control, se obtuvo caudales irregulares en comparación con el sistema operando en lazo abierto, por lo cual no se implementó el controlador en el sistema, optando por un sistema de control en lazo abierto, en la cual el caudal dependerá únicamente de la velocidad de salida del motor.

3.6 Análisis de Costo

3.6.1 Análisis de Costo del Prototipo

Los costos que intervinieron en la construcción del prototipo se muestran a continuación en la Tabla 2.27.

Tabla 3.1 Costos detallados del proyecto

Descripción	Cantidad	Valor Unitario (\$)	Valor Total (\$)
Motor de Paso Nema 17 Bipolar	1	13.99	13.99
Soporte de Montaje Motor de Paso (Incluye 4 Tornillos M3x4mm)	1	2.50	2.50
Acople flexible de aluminio de 5 a 8 mm	1	3.15	3.15
Varilla Roscada A304 M8x1.25 mm	1	1.50	1.50
Tuerca Hexagonal A2-70 M8x 1.25 mm	1	0.10	0.10
Riel de Aluminio	1	3.22	3.22
Pernos Allen 14 mm	2	0.30	0.60
Fuente de Alimentación 12V	1	15.00	15.00

Placa Electrónica Arduino UNO	1	20.00	20.00
Pantalla LCD con Teclado 1602	1	10.99	10.99
Driver A4988ET	1	2.00	2.00
Jumpers largos	34	0.15	5.10
Capacitor 100uF 25V	1	0.30	0.30
Amplificador LM358P	1	0.45	0.45
Resistencia de 0.22Ω	2	0.15	0.30
Resistencia de 10kΩ	2	0.15	0.30
Resistencia de 100 kΩ	2	0.15	0.30
Sensor de Presión PendoTech PRESS-S-000	1	45.61	45.61
Placa de Circuito Impreso	1	5.70	5.70
Ventilador 12V DC	1	2.25	2.25
Piezas Impresas en 3D	6	5.00	30.00
Costo de Producción			154.61

Tabla 3.2 Costo Total del Prototipo

(+) Costo de Producción	\$ 174.61
(+) Costo Mano de Obra	\$ 192.00
(=) Costo Total del Producto	\$ 366.61

3.6.2 Costo Bomba Tipo Jeringa Comercial

El precio de la bomba tipo jeringa para la aplicación del sistema electrospinning tiene un precio comprendido entre \$950 y \$1400 en el mercado internacional sin considerar el costo de importación.

Para la importación de la bomba tipo jeringa para la aplicación de electrospinning, se debe calcular los valores correspondientes a los tributos. En primera estancia, la bomba de jeringa se clasifica en la subpartida arancelaria “9018.90.90.00” según la Nomenclatura de designación y Codificación de mercancías del Ecuador (PUDELECO, 2017) que hace referencia a los instrumentos y aparatos electromédicos.

La partida seleccionada aplica los siguientes dos tributos: FONDINFA (Fondo de Desarrollo para la Infancia) y el IVA (Impuesto sobre el valor agregado) que corresponde al 0.5% y 12% respectivamente. El cálculo del total de tributos y la nacionalización de la mercancía, se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 3.3 Costos para la Importación

(+) Precio del producto	\$ 950,00
(+) Flete marítimo	\$ 40,00
(+) Seguro $1\% \times (\text{Precio} + \text{flete})$	\$ 9,90
(=) CIF (Costo, seguro y flete)	\$ 999,90

Tabla 3.4 Cálculo de Tributos para Importación

(+) FONDINFA ($\text{CIF} \times 0.5\%$)	\$ 5,00
(+) IVA ($\text{FONDINFA} + \text{CIF} \times 12\%$)	\$ 120,59
(=) Total tributos	\$ 125,59

Tabla 3.5 Costo Total de Nacionalización de la bomba jeringa

(+) CIF	\$ 999,90
(+) Tributos	\$ 125,59
(+) Costo Agente de Aduana ($60\% \times \text{salario básico} \times 12\%$)	\$ 264,77
(=) Costo Total del Producto	\$ 1 390,26

Tabla 3.6 Costo Total de Importación del Equipo

(+) Costo Total del Producto	\$ 1 390,26
(-) Precio del Producto	\$ 950,00
(=) Costo Total de Importación	\$ 440,26

Asumiendo un precio de \$950,00 para la bomba tipo jeringa se obtiene un costo de importación total de \$440,26, obteniendo un precio total del equipo de \$1390,26 sin incluir el precio de transporte del puerto a la dirección de destino. Cabe mencionar que el tiempo de importación es de 10 a 12 semanas aproximadamente.

En la siguiente tabla se muestra el valor de los dos equipos bomba tipo jeringa.

Tabla 3.7 Costo Total

Costo Total de Bomba Tipo Jeringa Importada	\$ 1 390,26
Costo Total del Prototipo Bomba Tipo Jeringa	\$ 366,61
(=) Costo Total de Importación	\$ 1023,65

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

- El diseño final del prototipo de bomba tipo jeringa tuvo varias modificaciones con respecto al diseño conceptual, entre las cuales está la implementación de reducción de velocidad mediante la opción de micro pasos del driver. Para el caudal mínimo requerido de 0.6 mL/hr, utilizando el motor a paso completo, se obtuvo un paso cada 4 segundos, mientras que al implementar la opción de $\frac{1}{4}$ de paso, se obtuvo un paso cada segundo. De esta manera se logra un flujo continuo a la salida de la jeringa, lo cual asegura que el chorro de agua se cargue de manera ininterrumpida por la fuente de alimentación de alto voltaje
- El torque requerido para mover el sistema émbolo – jeringa fue de 0.61 N*cm, mientras que el torque disponible del sistema de transmisión fue de 22.6 N*cm, obteniendo así un factor de seguridad implementado en el sistema de 37. Por lo tanto, el prototipo de la bomba tipo jeringa permite utilizar fluidos con viscosidades 30 veces superiores a la celulosa, es decir, el prototipo admitirá fluidos de viscosidades menores o iguales a $5 Pa^{-1}$.
- El costo total del prototipo construido registró el valor de \$366.61, mientras que el precio de venta del equipo procedente de China fue de \$1390.26, incluyendo su costo de importación. Por lo tanto, el prototipo representa alrededor del 27% del costo de una bomba tipo jeringa importada.

- Se diseñó el sistema de control PI, cuya función transferencia quedó definida por un polo en el origen y un cero real, la cual se implementó en el código del sistema, obteniendo como resultados de experimentación caudales no constantes. Por lo tanto, se procedió a rediseñar el sistema de control para la operación en lazo abierto, obteniendo caudales constantes y precisos mediante la implementación del micropaso en el sistema de transmisión.

Recomendaciones:

- Se recomienda eliminar las burbujas que puedan generarse al cargar el fluido al interior de la jeringa, conservando así un caudal constante durante la operación de la bomba. Se recomienda también purgar la jeringa con un caudal de 30 mL/hr hasta observar la salida de la primera gota en la punta de la aguja, posteriormente pausar la bomba jeringa e ingresar el caudal deseado y finalmente accionar la bomba.
- Se sugiere lubricar el tornillo sinfín con aceite Multiuso 3 en 1 cada tres accionamientos del equipo. Adicionalmente observar al inicio de cada uso, con ayuda del acople, el torque requerido para desplazar el soporte del émbolo, si se dificulta el giro de este elemento, proceder a lubricar el tornillo sinfín.
- Se recomienda observar el estado del driver del motor de paso cuando se tenga un tiempo de operación mayor a 10 minutos, debido a que se puede recalentar, desconfigurar y posteriormente quemar internamente. De esta manera, en caso de tiempos de operación altos, proceder a colocar un ventilador adicional que origine una mayor disipación de calor.

BIBLIOGRAFÍA

- Allegro MicroSystems. (2016). DMOS Microstepping Driver with Translator and Overcurrent Protection. Worcester, Massachusetts, USA.
- Andreas Grenier, J. H. (2007). Electrospinning: A Fascinating Method for the Preparation of Ultrathin Fibers. *Angewandte Chemie*, 34.
- Calzón Gutiérrez, A. (2016). DESARROLLO DE UN EQUIPO DE ELECTROSPINNING PARA OBTENCIÓN DE NANOFIBRAS ALINEADAS DE RECOMBINÁMEROS TIPO ELASTINA. *UNIVERSIDAD DE VALLADOLID*, 77.
- Designfax. (2014, August 19). Retrieved from <http://www.designfax.net/cms/dfx/opens/article-view-dfx.php?nid=4&bid=373&et=featurearticle&pn=01>
- Frank Incropera, D. D. (2007). *Fundamentals of Heat and a Mass Transfer* (6th edition ed.). Danvers, Massachusetts, United States: John Wiley & Sons.
- Horst A. von Recum, T. J. (2008). Electrospinning: Applications in drug delivery and tissue engineering. *Biomaterials*, 18.
- John R. Lake, K. C. (2017). Low cost feedback controlled syringe pressure pumps for microfluidics applications. *PLOS ONE*, 12.
- Nam-Trung Nguyen, S. T. (2006). *Fundamentals and Applications of Microfluidics* (Second ed.). Boston: ARTECH HOUSE. INC.
- Norton, R. L. (2011). *Diseño de Máquinas (Un enfoque integrado)*. México: Pearson.
- Paul Scherz, S. M. (2016). *Practical Electronics for Inventors* (4th ed.). United States.
- PCB Linear . (2012). *Stepper Motor NEMA 17 Data Sheet*. Rockford.
- Pendo Tech. (2016). PendoTECH Single Use Pressure Sensors.
- Rayleigh, L. (. (1878). On the inestability of jets. In *Proceedings of the London mathematical society* (Vol. 10, pp. 4-13).
- Rivas, D. F. (2011, Agosto 1). Microfluidos: Nuevas Fronteras. *Revista Cubana de Física*, 8(1), 60.
- Ruiz, V. M. (2003). MÉTODOS DE SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID QUE OPERAN COMO SERVOMEKANISMOS. *Ingeniería* , 18.
- Sepruma, S. d. (2006). *Manipulación Manual de Cargas*. Universidad de Málaga, Vicerrectorado de Servicios a la Comunidad Universitaria.

- Subhas C. Kundu, N. B. (2010). Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. *Biotechnology Advances*, 23.
- Youn - Mook Lim, H. -J.-C. (2010). Preparation of Cellulose - based Nanofibers Using Electrospinning. *Advance Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute*.
- Yunus A. Cengel, J. M. (2006). *Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones*. México: McGraw - Hill Interamericana.
- Zheng-Ming Huang, Y.-Z. Z. (2003). A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 31.
- Zida Li, S. Y. (2013). Syringe-pump induced fluctuation in all-aqueous microfluidic system implications for flow rate accuracy. *Royal Society of Chemistry*.
- Bhattacharai, N., Edmondson, D., Veiseh, O., Matsen, F. A., & Zhang, M. (2005). Electrospun chitosan-based nanofibers and their cellular compatibility. *Biomaterials*, 26(31), 6176-6184. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.03.027>
- Cengel, Y. A. (s. f.). *Mecanica de Fluidos*, 997.
- Fontelos, M. A. (s. f.). Departamento de Matemáticas, Universidad Autónoma de Madrid, 24.
- Gemmell, S., & Vogt, M. (s. f.). (76) Inventors: Robert Campbell, Waltham, MA (US);, 104.
- Katta, P., Alessandro, M., Ramsier, R. D., & Chase, G. G. (2004). Continuous Electrospinning of Aligned Polymer Nanofibers onto a Wire Drum Collector. *Nano Letters*, 4(11), 2215-2218. <https://doi.org/10.1021/nl0486158>
- Sanderson, G. G., & Bertsch, P. E.-R. A. (1993). (54) SYRINGE PUMP AND THE LIKE FOR DELIVERING MEDICATION, 13.

APÉNDICE

APÉNDICE A

CÓDIGO PROPUESTO EN ARDUINO IDE

```
#include <LiquidCrystal.h>
#include <LCDKeypad.h>
int PinSTEP = 2;
int PinDIR = 3;

//Configuración del Keypad
int adc_key_val[5] = {30, 150, 360, 535, 760 };
enum{ B_DERECHA, B_ARRIBA, B_ABAJO, B_IZQUIERDA, B_SELECCION,
B_NINGUNA};
int NUM_B = 5;
int adc_key_in;
int key = B_NINGUNA;
enum{AVANZA,RETROCED};
enum{MENU1, MENU2};
const int DeltaLength = 9;
float DeltaOpciones[9] = {0.001, 0.005, 0.010, 0.050, 0.100, 0.500, 1.000, 5.000, 10.000};

//Parámetros de Inicio
float Qreq = 0.100; //Se debe declarar un valor inicial
float Qact = 0.0;
int DeltaOpcionIdx = 3; //Se debe declarar un valor inicial
float DeltaOpcion = DeltaOpciones[DeltaOpcionIdx];
char charBuf[16];

//Parámetros de Configuración LCD Keypad Shield
long lastKeyRepeatAt = 0;
long keyRepeatDelay = 400;
long keyDebounce = 125;
int prevKey = B_NINGUNA;
```

```
//Configuración del menu
int uiState = MENU1;

//Configuración del serial
String serialStr = "";
boolean serialStrReady = false;

//Inicio de Librería
LiquidCrystal lcd(8, 13, 9, 4, 5, 6, 7);

void setup() {
  //Configuración LCD inicio
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0); lcd.print(" Bomba ");
  lcd.setCursor(0,1); lcd.print(" Tipo Jeringa ");
  delay(4000);
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0); lcd.print(" Integrantes ");
  delay(2000);
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0); lcd.print(" Jaime Chica ");
  lcd.setCursor(0,1); lcd.print(" David Suarez ");
  delay(2000);
  lcd.clear();

  pinMode(PinDIR, OUTPUT);
  pinMode(PinSTEP, OUTPUT);

  //Configuración del Serial
  Serial.begin(57600);
}

void loop() {
```

```

//En este loop se procesa el código repetitivamente
readKey();
readSerial();
if(serialStrReady){
    processSerial();
}
}

void readSerial(){
    while (Serial.available()) {
        char inChar = (char)Serial.read();
        if (inChar == '\n') {
            serialStrReady = true;
        }
        else{
            serialStr += inChar;
        }
    }
}

void processSerial(){
    if(serialStr.equals("+")){
        bolus(AVANZA);
        updateScreen();
    }
    else if(serialStr.equals("-")){
        bolus(RETROCED);
        updateScreen();
    }
    else if(serialStr.toInt() != 0){
        int uLbolus = serialStr.toInt();
        Qreq = (float)uLbolus / 1000.0;
        updateScreen();
    }
}

```

```

    }
    else{
        Serial.write("Invalid command: [");
        char buf[40];
        serialStr.toCharArray(buf, 40);
        Serial.write(buf);
        Serial.write("\n");
    }
    serialStrReady = false;
    serialStr = "";
}

void bolus(int direction){
    //En este void se configura para que el motor de paso avance
    if(direction == AVANZA){
        digitalWrite(PinDIR, LOW);
        Qact = Qreq;
        updateScreen();
    }
    else{
        Qact=0;
    }
    float usDelay= (301.5/Qact);
    for(long i=0;i<800;i++){
        digitalWrite(PinSTEP, HIGH);
        delay(usDelay);
        digitalWrite(PinSTEP, LOW);
        delay(usDelay);
    }
}

void readKey(){
    //Configuración de los botones del Keypad Shield

```

```

adc_key_in = analogRead(0);
key = get_key(adc_key_in); // convert into key press
long currentTime = millis();
    long timeSinceLastPress = (currentTime-lastKeyRepeatAt);
    boolean processThisKey = false;
if (prevKey == key && timeSinceLastPress > keyRepeatDelay){
    processThisKey = true;
}
if(prevKey == B_NINGUNA && timeSinceLastPress > keyDebounce){
    processThisKey = true;
}
if(key == B_NINGUNA){
    processThisKey = false;
}
prevKey = key;
if(processThisKey){
    doKeyAction(key);
    lastKeyRepeatAt = currentTime;
}
}

```

```

void doKeyAction(unsigned int key){
    if(key == B_NINGUNA){
        return;
    }
if(key == B_SELECCION){
    if(uiState == MENU1){
        uiState = MENU2;
    }
    else if(MENU2){
        uiState = MENU1;
    }
}
}

```

```

if(uiState == MENU1){
if(key == B_IZQUIERDA){
    bolus(RETROCED);
}
if(key == B_DERECHA){
    bolus(AVANZA);
}
if(key == B_ARRIBA){
    Qreq += DeltaOpcion;
}
if(key == B_ABAJO){
    if((Qreq - DeltaOpcion) > 0){
        Qreq -= DeltaOpcion;
    }
    else{
        Qreq = 0;
    }
}
}
else if(uiState == MENU2){
if(key == B_IZQUIERDA){
    //nothin'
}
if(key == B_DERECHA){
    //nothin'
}
if(key == B_ARRIBA){
    if(DeltaOpcionIdx < DeltaLength-1){
        DeltaOpcionIdx++;
        DeltaOpcion = DeltaOpciones[DeltaOpcionIdx];
    }
}
if(key == B_ABAJO){

```

```

    if(DeltaOpcionIdx > 0){
        DeltaOpcionIdx -= 1;
        DeltaOpcion = DeltaOpciones[DeltaOpcionIdx];
    }
}
}
updateScreen();
}

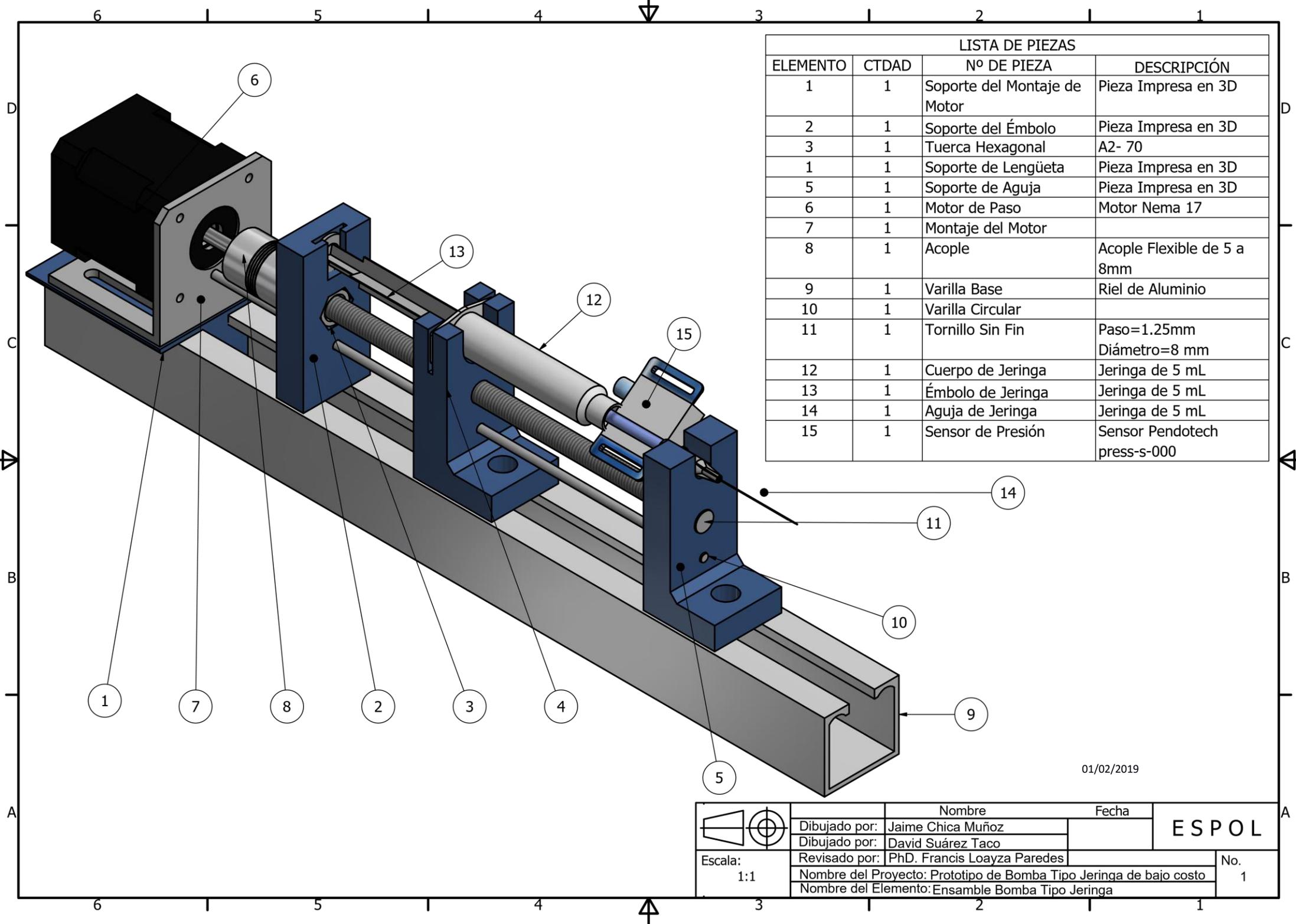
void updateScreen(){
    String s1; //upper line
    String s2; //lower line
    if(uiState == MENU1){
        s1 = String("Qact=")+ decToString(Qact)+ String("mL/h") ;
        s2 = (String("Qreq=")+ decToString(Qreq)+ String("mL/h") );
    }
    else if(uiState == MENU2){
        s1 = String("Menu>Diferencia");
        s2 = decToString(DeltaOpcion);
    }
    lcd.clear();
    s2.toCharArray(charBuf, 16);
    lcd.setCursor(0, 1); //line=2, x=0
    lcd.print(charBuf);
    s1.toCharArray(charBuf, 16);
    lcd.setCursor(0, 0); //line=1, x=0
    lcd.print(charBuf);
}

int get_key(unsigned int input){
    int k;
    for (k = 0; k < NUM_B; k++){
        if (input < adc_key_val[k]){
            return k;
        }
    }
}

```

```
    }  
  }  
  if (k >= NUM_B){  
    k = B_NINGUNA; // No valid key pressed  
  }  
  return k;  
}  
String decToString(float decNumber){  
  //Se utiliza esta opción para convertir los decimales  
  int wholePart = decNumber; //truncate  
  int decPart = round(abs(decNumber*1000)-abs(wholePart*1000));  
  String strZeros = String("");  
  if(decPart < 10){  
    strZeros = String("00");  
  }  
  else if(decPart < 100){  
    strZeros = String("0");  
  }  
  return String(wholePart) + String('.') + strZeros + String(decPart);  
}
```

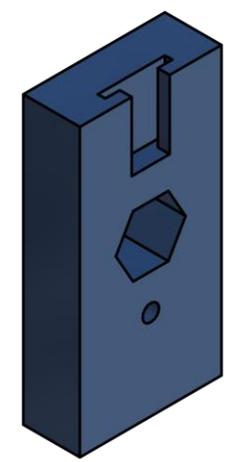
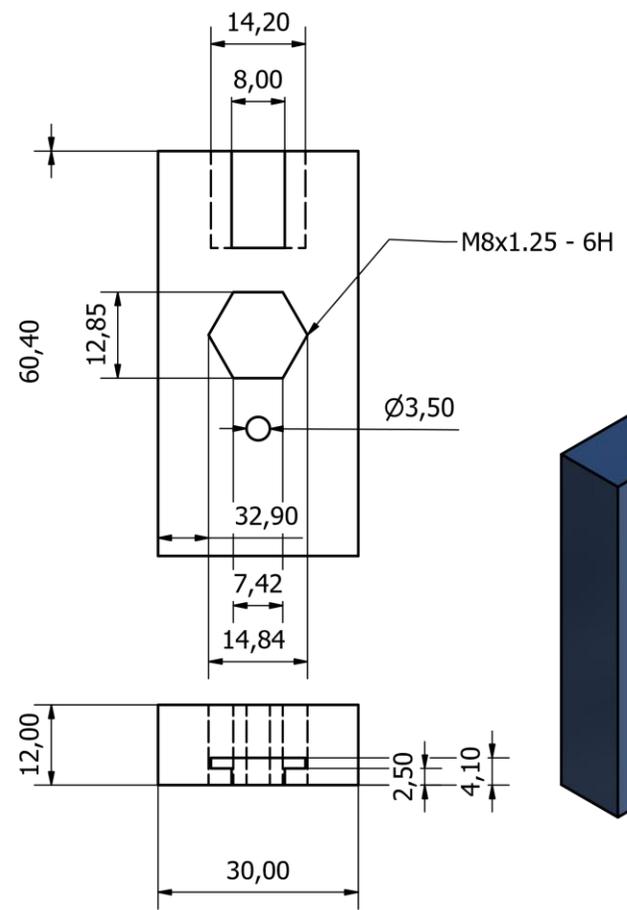
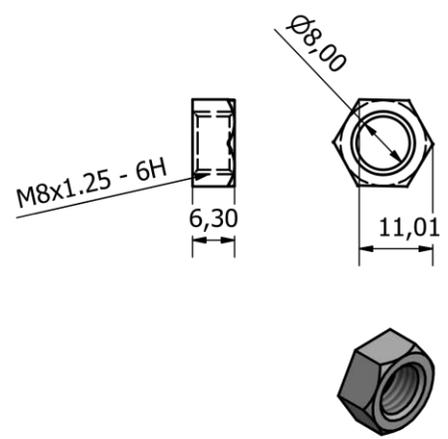
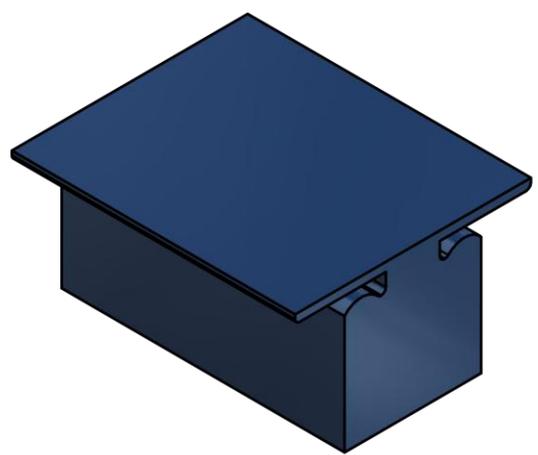
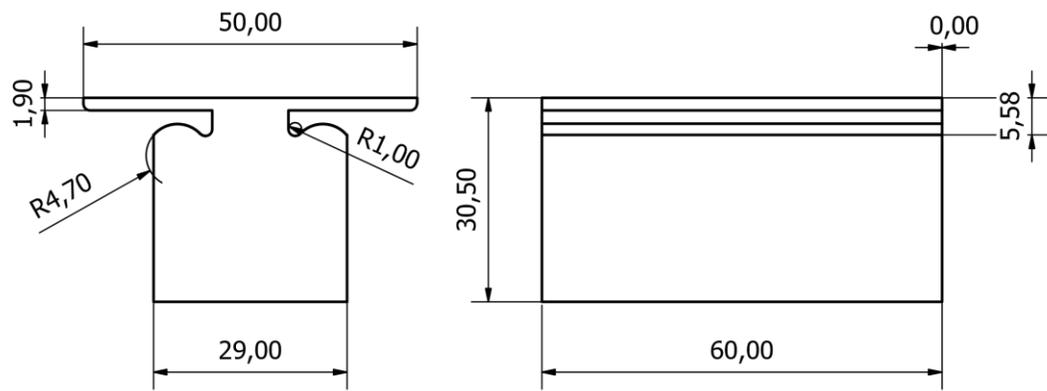
APÉNDICE B
PLANOS



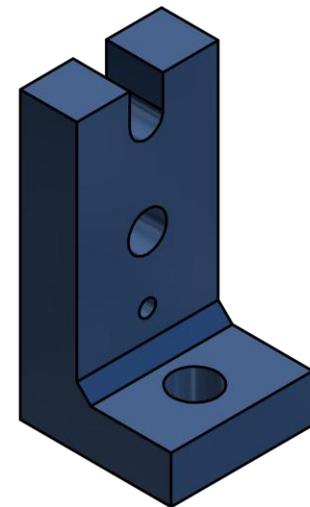
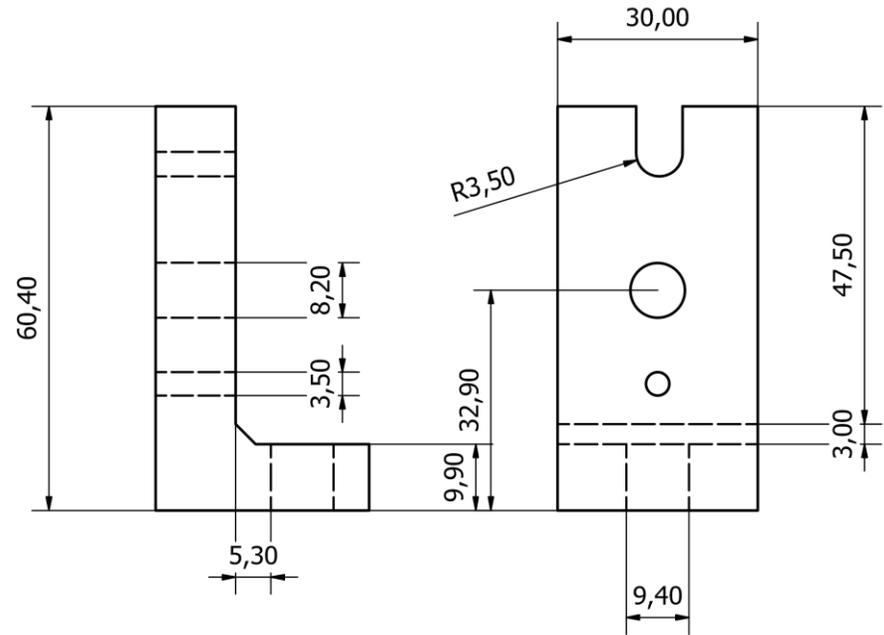
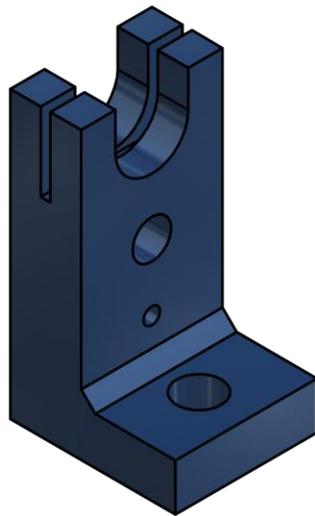
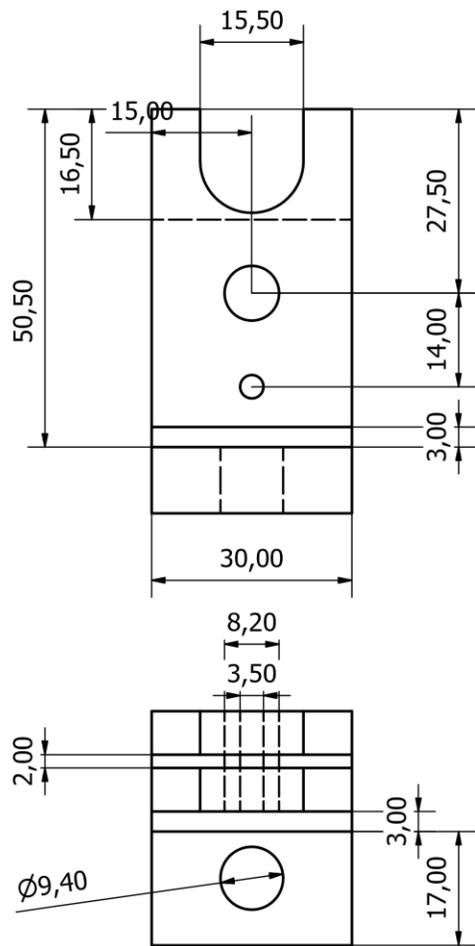
LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Soporte del Montaje de Motor	Pieza Impresa en 3D
2	1	Soporte del Émbolo	Pieza Impresa en 3D
3	1	Tuerca Hexagonal	A2- 70
1	1	Soporte de Lengüeta	Pieza Impresa en 3D
5	1	Soporte de Aguja	Pieza Impresa en 3D
6	1	Motor de Paso	Motor Nema 17
7	1	Montaje del Motor	
8	1	Acople	Acople Flexible de 5 a 8mm
9	1	Varilla Base	Riel de Aluminio
10	1	Varilla Circular	
11	1	Tornillo Sin Fin	Paso=1.25mm Diámetro=8 mm
12	1	Cuerpo de Jeringa	Jeringa de 5 mL
13	1	Émbolo de Jeringa	Jeringa de 5 mL
14	1	Aguja de Jeringa	Jeringa de 5 mL
15	1	Sensor de Presión	Sensor Pendotech press-s-000

01/02/2019

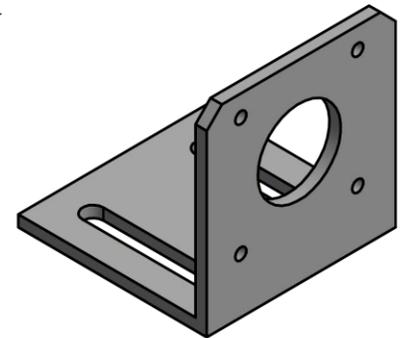
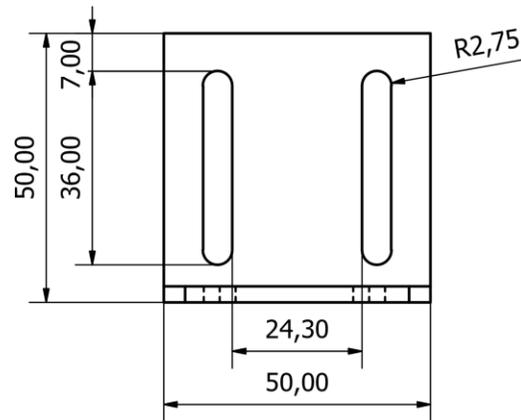
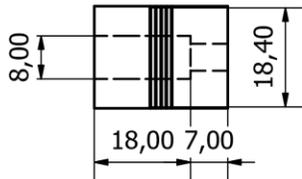
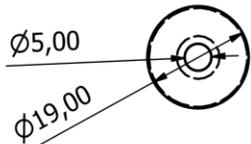
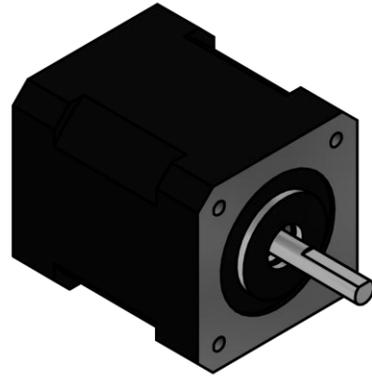
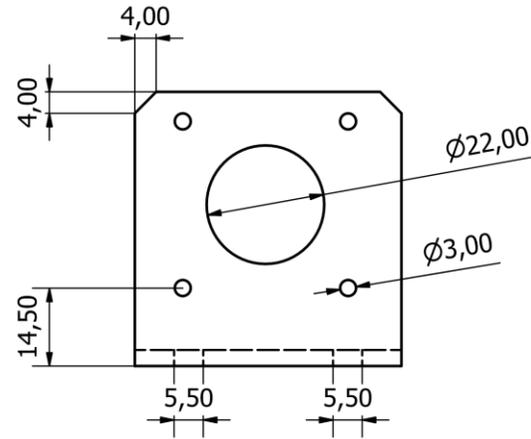
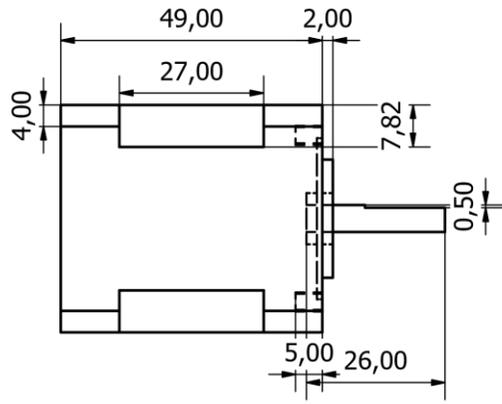
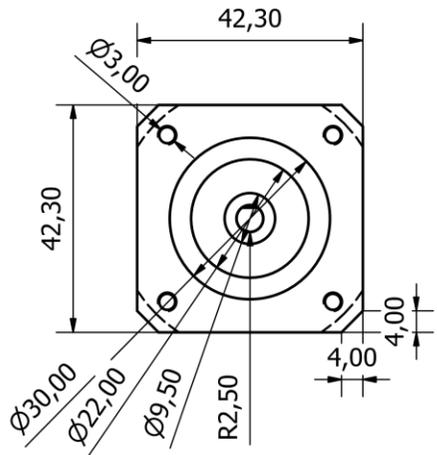
	Nombre		Fecha	ESPOL
	Dibujado por:	Jaime Chica Muñoz		
Escala: 1:1	Dibujado por:	David Suárez Taco		No. 1
	Revisado por:	PhD. Francis Loayza Paredes		
	Nombre del Proyecto: Prototipo de Bomba Tipo Jeringa de bajo costo Nombre del Elemento: Ensamble Bomba Tipo Jeringa			



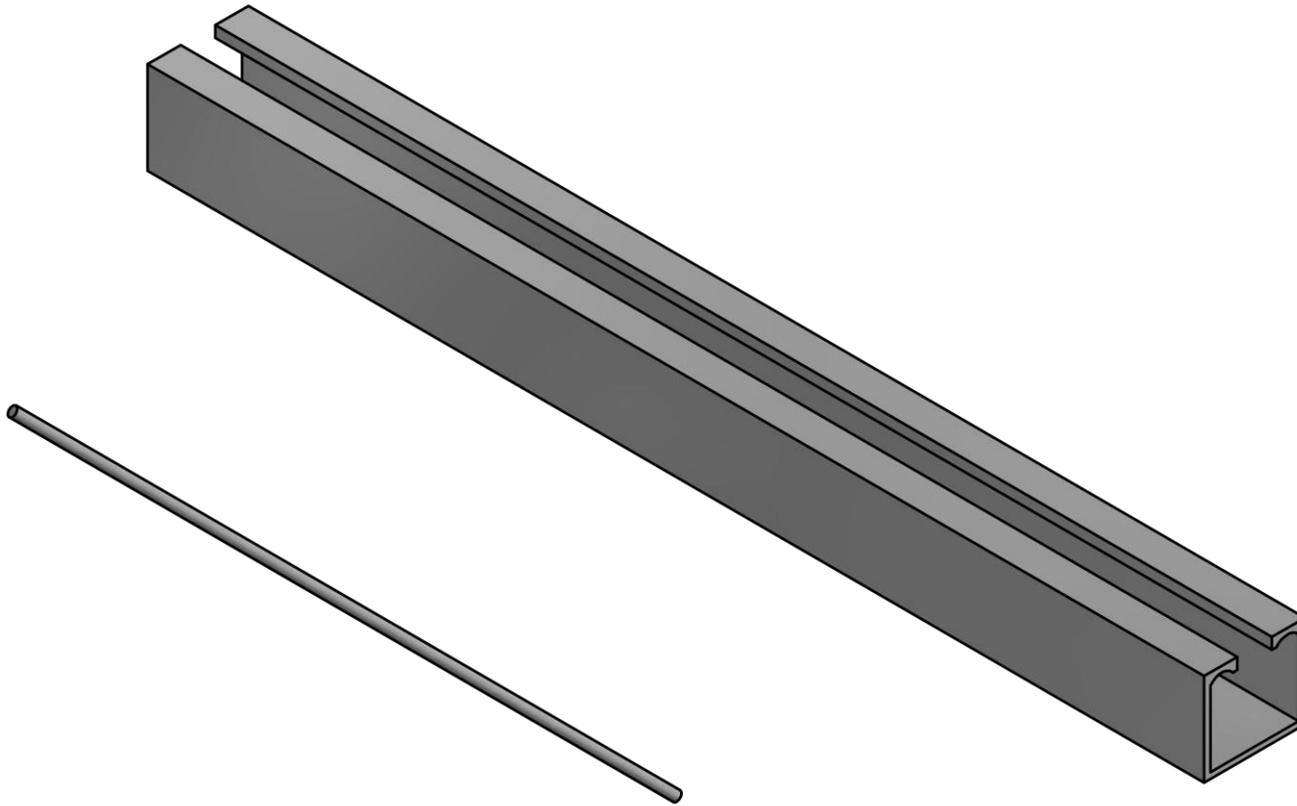
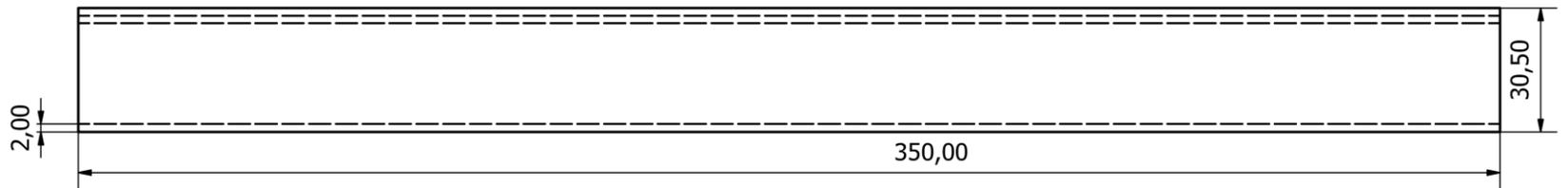
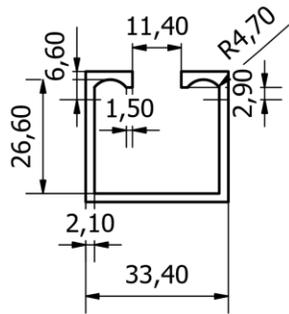
	Nombre		Fecha	ESPOL
	Dibujado por:	Jaime Chica Muñoz		
Escala: 5:4	Dibujado por:	David Suárez Taco		No. 2
	Revisado por:	PhD. Francis Loayza Paredes		
	Nombre del Proyecto: Prototipo de Bomba Tipo Jeringa de bajo costo Nombre del Elemento: Soporte del Montaje de Motor y Soporte del Émbolo			



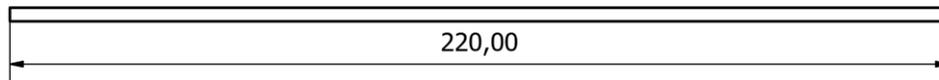
	Nombre		Fecha		ESPOL
	Dibujado por:	Jaime Chica Muñoz			
	Dibujado por:	David Suárez Taco			
Escala: 5:4	Revisado por: PhD. Francis Loayza Paredes				No. 3
Nombre del Proyecto: Prototipo de Bomba Tipo Jeringa de bajo costo Nombre del Elemento: Soporte de Lengüeta y Soporte de la Aguja					



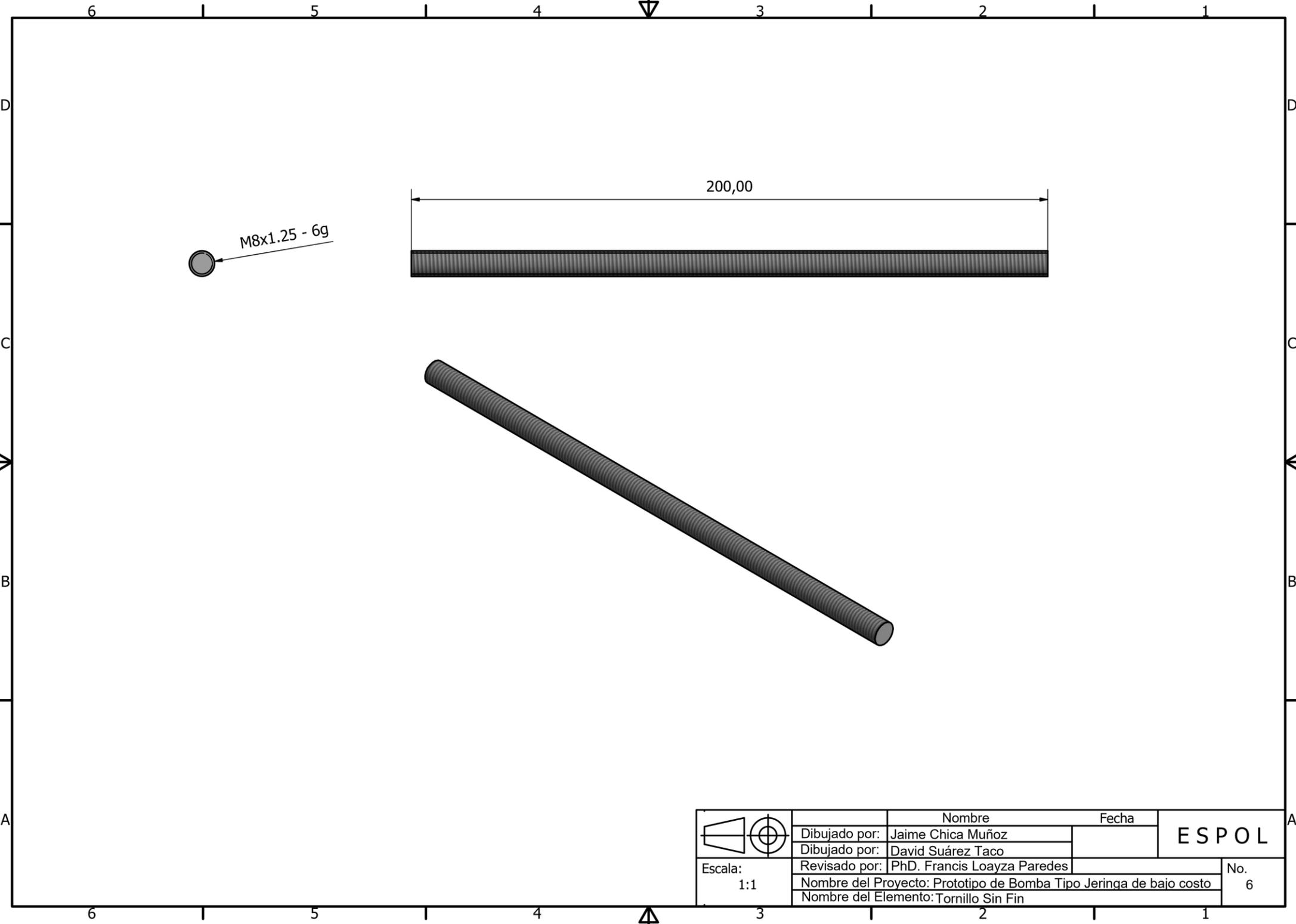
	Nombre		Fecha	
	Dibujado por: Jaime Chica Muñoz			
Escala: 1:1	Dibujado por: David Suárez Taco		ESPOL	
	Revisado por: Ph.D. Francis Loayza Paredes			
	Nombre del Proyecto: Prototipo de Bomba Tipo Jeringa de bajo costo			No. 4
	Nombre del Elemento: Motor, Soporte del Motor y Acople			



$\phi 3,20$

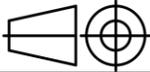


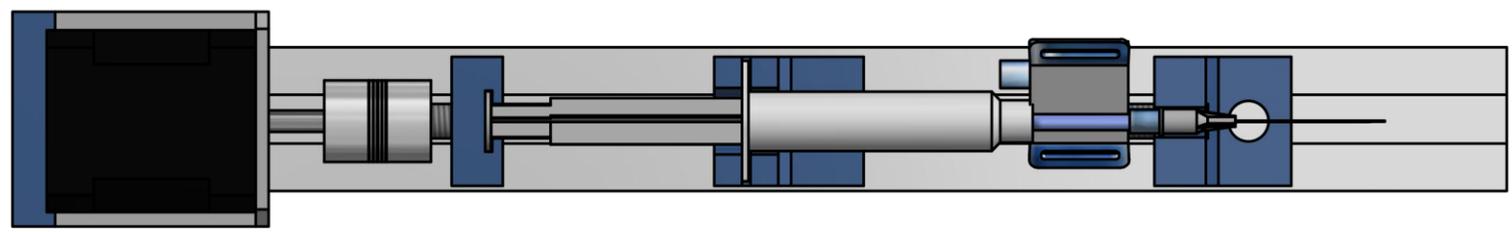
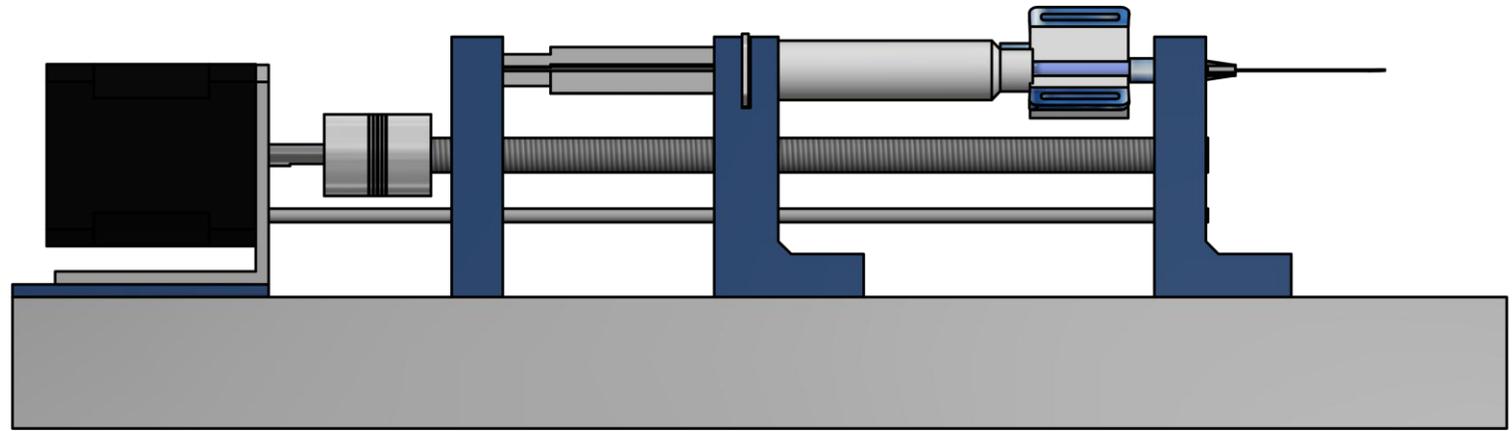
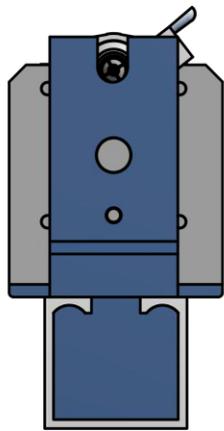
	Nombre		Fecha		ESPOL
	Dibujado por: Jaime Chica Muñoz				
Escala: 4:5	Dibujado por: David Suárez Taco				No. 5
	Revisado por: PhD. Francis Loayza Paredes				
	Nombre del Proyecto: Prototipo de Bomba Tipo Jeringa de bajo costo				
Nombre del Elemento: Varilla Riel de aluminio, Varilla Circular					



M8x1.25 - 6g

200,00

	Nombre		Fecha		ESPOL
	Dibujado por:	Jaime Chica Muñoz			
	Dibujado por:	David Suárez Taco			No. 6
Escala:	Revisado por:	PhD. Francis Loayza Paredes			
1:1	Nombre del Proyecto: Prototipo de Bomba Tipo Jeringa de bajo costo				
	Nombre del Elemento: Tornillo Sin Fin				



		Nombre		Fecha	ESPOL
		Dibujado por:	Jaime Chica Muñoz		
Escala:		Dibujado por:	David Suárez Taco		No. 7
1:1		Revisado por:	PhD. Francis Loayza Paredes		
		Nombre del Proyecto: Prototipo de Bomba Tipo Jeringa de bajo costo			
		Nombre del Elemento: Vista Lateral, Vista Frontal y Vista Superior			