

Trabajo Fin de Máster

Máster en Ingeniería Electrónica, Robótica y
Automática

Diseño y construcción de una microválvula de tesla
con impresión 3D

Autor: Molina Aguiar Nelson Andrés

Tutor: José Manuel Quero Reboul

Dpto. de Ingeniería de sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de Telecomunicación

Diseño y construcción de una microválvula de tesla con impresión 3D

Autor:

Nelson Andrés Molina Aguiar

Tutor:

José Manuel Quero Reboul

Dpto. de Ing. Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023

Proyecto Fin de Carrera: Diseño y construcción de una microválvula de tesla con impresión 3D

Autor: Nelson Andrés Molina Aguiar

Tutor: José Manuel Quero Reboul

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El secretario del Tribunal

*A mi familia y
A mis maestros*

Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi familia, en especial a mis padres, por su constante creencia en mí y su apoyo incondicional a lo largo de mi vida. También quiero reconocer a mi abuelito, don Segundo Aguiar, cuyo amor y sabiduría han dejado una marca imborrable en mí.

Además, deseo agradecer a mis amigos y compañeros de estudios, quienes hicieron que mi experiencia en el máster fuera más llevadera gracias a su apoyo, aliento y compañerismo. A Franklin Jara, quiero expresar mi gratitud por brindarme refugio en su hogar cuando más lo necesitaba. Su generosidad y amabilidad son verdaderamente inspiradoras, a Álvaro Poma, le agradezco enormemente por enseñarme que el aprendizaje y el crecimiento son continuos, a Ricardo Garcia, quiero agradecerle por su inestimable ayuda en la comprensión de los circuitos convertidores electrónicos, a mi amiga y colega, Almudena Gutiérrez, le agradezco por hacerme reír con sus anécdotas y por enseñarme lecciones valiosas sobre cómo ser un mejor profesional.

Finalmente quiero agradecer a mi tutor, José Manuel Quero, quien me brindó un apoyo invaluable durante la realización de mi trabajo de fin de máster, su constante presión y motivación fueron fundamentales para que pudiera culminar con éxito el siguiente proyecto y mi formación académica como máster

Nelson Andrés Molina Aguiar

Máster Universitario en Ingeniería Electrónica, Robótica y Automática

Sevilla, 2023

Resumen

En la siguiente investigación se va a desarrollar una microválvula de tesla de flujo unidireccional para aplicación de sistemas microfluídicas las cuales se suelen fabricar generalmente con técnicas de micromecanizado superficial las cuales las hacen útiles en la industria de la medicina, biomédica, así como en sistemas de control en donde se requiere controlar pequeños volúmenes de un fluido de una entrada.

Dado que la mayoría de las investigaciones con válvulas de tesla por lo general tienden a cerrar la geometría en donde se encuentran los lagrimales con un acrílico o con tapas haciendo uso de pernos y tornillos o realizando moldes para después aplicar PDMS material utilizado en la fabricación de microcircuitos, este proyecto se enfoca en la manufactura de la microválvula de tesla con resina líquida a través de la impresión 3D permitiendo crear hermeticidad en la estructura y simplificando los dos pasos anteriores lo que permite generar una nueva rama de circuitos microfluídicos.

En cuanto a las pruebas de validación se ha realizado simulaciones en Comsol Multiphysics para determinar las presiones y caudales que circulan por la microválvula de tesla, aunque también se realiza las mismas pruebas en el prototipo real para el análisis de curvas de diodicidad características de este tipo de dispositivo.

Abstract

In the following research we will develop a unidirectional flow tesla microvalve for microfluidic systems application which are usually manufactured with surface micromachining techniques which make them useful in the medical and biomedical industry, as well as in control systems where it is required to control small volumes of a fluid from one inlet.

Since most of the research with tesla valves usually tends to close the geometry where the tears are located with an acrylic or caps using bolts and screws or making molds and then applying PDMS material used in the manufacture of microcircuits, This project focuses on the manufacture of the tesla microvalve with liquid resin through 3D printing allowing to create hermeticity in the structure and simplifying the two previous steps which allows to generate a new branch of microfluidic circuits.

As for the validation tests, simulations have been performed in Comsol Multiphysics to determine the pressures and flow rates that circulate through the micro tesla valve, although the same tests are also performed on the real prototype for the analysis of diode curves characteristic of this type of device.

Índice

Agradecimientos	9
Resumen	11
Abstract	13
Índice	15
Índice de Tablas	19
Índice de Figuras	21
Índice de Ecuaciones	24
1 Introducción	1
1.1 <i>Introducción</i>	1
1.2 <i>Objetivos</i>	2
1.3 <i>Resumen de Resultados</i>	2
1.4 <i>Planificación cronológica</i>	3
2 Estado del Arte	7
2.1 <i>Introducción</i>	7
2.2 <i>Valvula fluídica</i>	7
2.3 <i>Diodicidad</i>	7
2.4 <i>Geometrias de válvulas de tesla.</i>	8
2.4.1 <i>Válvula de tesla original.</i>	8
2.4.2 <i>Válvula de tesla de Gamboa</i>	8
2.4.3 <i>Valvula de tesla Teardrop Design</i>	8
2.5 <i>Microválvula de tesla con impresión 3D</i>	8
2.6 <i>Dispositivos microfluídicos impresos en 3D</i>	9
3 Memoria	10
3.1 <i>FUSION 360</i>	10
3.2 <i>LYCHEE SLICER RESIN</i>	10
3.3 <i>COMSOL MULTHIPHYSICS</i>	11
3.4 <i>Dimensiones de la microválvula fluídica de tesla</i>	11
3.5 <i>Condiciones de los puertos de entrada</i>	12
3.6 <i>Diseño del sistema de microfluídica</i>	12
3.6.1 <i>Esquema general del sistema de microfluídica</i>	12
3.6.2 <i>Componentes fundamentales</i>	12
4 Diseño y Simulación	18
4.1 <i>INTRODUCCIÓN</i>	18
4.2 <i>Diseño del modelo en fusion 360</i>	18
4.3 <i>Simulación en Comsol Multhiphysics</i>	24
5 modelo del prototipo y experimentación	38

5.1	<i>Introducción</i>	38
5.2	<i>Software</i>	38
5.2.1	Configuración de los parámetros de impresión en lychee Slicer.	38
5.3	<i>Experimentación con la microválvula de tesla</i>	43
6	Presupuesto	49
6.1	<i>Introducción</i>	49
6.2	<i>Impresión por hora</i>	49
6.3	<i>Equipos y licencias.</i>	49
6.4	<i>Presupuesto total.</i>	50
7	Conclusiones	53
7.1	<i>Conclusiones</i>	53
7.2	<i>Trabajos futuros</i>	53
	Referencias	55
	PLANOS	¡Error! Marcador no definido.
	ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.
	<i>Anexo I. Manual de Dispositivos.</i>	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Descripción de la planificación cronológica para el proyecto de la valvula de tesla	4
Tabla 2 Tipos de geometrías de válvulas de tesla.	18
Tabla 3 dimensiones de la microválvula de tesla desarrollada	19
Tabla 4 Constantes del agua y datos de la seccion rectangular de la microválvula de tesla	25
Tabla 5 cálculos teóricos para las presiones de la microválvula de tesla	27
Tabla 6 Datos simulados de la presión y caudal en Comsol Multiphysics	32
Tabla 7 Datos simulados de la presión y caudal con un rango de -2000 [Pas] a 2000 [Pas]	34
Tabla 8 Diodicidad y caudal de comsol multiphysics	35
Tabla 9 Datos disimulación presión y caudal con de -100 [Pas] a 100 [Pas]	36
Tabla 10 Diodicidad a caudales bajos de 0.33 ml/min a 0.92 ml/min	37
Tabla 11 Parámetros de impresión del fabricante anycubic.	38
Tabla 12 Parámetros utilizados en la impresora anycubic photon	43
Tabla 13 Datos reales de la presión y caudal generados por la microválvula	45
Tabla 14 Diodicidad y numero de Reynolds del modelo físico de la microválvula	46
Tabla 15 curvas de diodicidad simulación vs real	48
Tabla 16 Presupuesto para materiales y equipos	50
Tabla 17 Presupuesto de licencias de los softwares empleados	50
Tabla 18 Coste total del proyecto	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Flujo en dirección resistiva y conductora respectivamente	1
Figura 2 Sistema fluídico vista superior con manómetro y bomba de jeringa automática	3
Figura 3 Logotipo de FUSION 360 para el diseño del modelo CAD, tomada de su propia web	10
Figura 4 Logotipo de LYCHEE SLICER para la impresión 3D en resina, tomada de su propia web.	11
Figura 5 Comsol Multiphysics para el análisis de microfluidica, tomada de su propia web.	11
Figura 6 Diagrama General del sistema microfluídico	12
Figura 7 Bomba de jeringa para inyección de caudales variables. (tehnologies, 2023)	13
Figura 8 Manguera de microfluídica de 4mm (auxilab, 2023)	13
Figura 9 Manguera de microfluídica de 1,60 +/-0,07x3,20 +/-0,12 grosor 0,80mm (auxilab, 2023)	13
Figura 10 Adaptador sensor Plug	14
Figura 11 Pegamento epóxi de 2 elementos	14
Figura 12 Contenedor plástico para el vaciado del líquido del sistema de la microválvula de tesla	15
Figura 13 Jeringuilla de 20 ml para aplicación de la microválvula de tesla	15
Figura 14 Digitron 2023P	16
Figura 15 Alcohol isopropílico para limpieza de resina	16
Figura 16 Impresora DLP Anycubic Photon DLP para resina líquida.	17
Figura 17 Microválvula de tesla fluídica. Creación del autor	17
Figura 18 Esquema básico de una válvula de tesla	19
Figura 19 Geometría base de una microválvula de tesla en fusion 360	19
Figura 20 Forma elíptica para la conexión del sensor CO2 plug y microválvula de tesla	20
Figura 21 Vista transversal de los puertos de entrada y salida	21
Figura 22 Vista transversal del canal de la microválvula de tesla	21
Figura 23 Modelo con válvulas en paralelo	22
Figura 24 Vista isométrica válvulas con diferentes alturas	22
Figura 25 Vista en rayos X de la válvula de tesla	23
Figura 26 Ventana de exportación en formato Step y Stl	23
Figura 27 Modelo fluídico de un conducto circular	24
Figura 28 Grafica teórica de presión y caudal del modelo fluídico estándar	27
Figura 29 Velocidad de fluido con respecto a la presión 1	28

Figura 30 Velocidad de fluido con respecto a la presión 3	28
Figura 31 Velocidad de fluido con respecto a la presión 4	29
Figura 32 Velocidad de fluido con respecto a la presión 5	29
Figura 33 Velocidad de fluido con respecto a la presión 6	30
Figura 34 Velocidad de fluido con respecto a la presión 7	30
Figura 35 Velocidad de fluido con respecto a la presión 8	31
Figura 36 Velocidad de fluido con respecto a la presión 10	31
Figura 37 Curvas de presión vs caudal en comsol multiphysics modo conductor	32
Figura 38 Curvas de presión vs caudal línea roja sentido forward línea azul sentido backward	34
Figura 39 Curva de diodicidad vs caudal en un rango de 2 ml/min hasta 15 ml/min	35
Figura 40 Curvas de presión vs caudal con presiones y caudal bajos	36
Figura 42 Selección de la marca de la impresora en lychee slicer	39
Figura 43 Capas base y capas normales en lychee slicer	40
Figura 44 Importación fichero STL	40
Figura 45 Posicionamiento de la pieza en la coordenada ($x = 0$, $y = 0$, $z = 0$)	41
Figura 46 Relleno de la pieza al 100%	42
Figura 47 Comunidad de lychee slicer tipos de perfiles de resina	42
Figura 48 Exportación del modelo la unidad USB para lectura de la impresora	43
Figura 49 Sistema fluídico total para el análisis de la microválvula de tesla	44
Figura 50 Curva Real de presión vs caudal en unidades de [mBar] y [ml/min]	45
Figura 51 Datos reales de la presión vs caudal de la microválvula	45
Figura 52 Diodicidad de la microválvula de tesla comparado con el número de Reynolds.	46
Figura 53 Curvas simuladas y reales de una microválvula de tesla fluídica	47
Figura 54 Diodicidad vs caudal comparación de datos de simulación vs Real	48

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Hagen-Poiseuille Régimen Laminar, microscópico	24
Ecuación 2 Diámetro hidráulico para seccion rectangular	24
Ecuación 3 Perímetro de una seccion rectangular	25
Ecuación 4 Resistencia fluídica de un conducto circular	25
Ecuación 5 Diodicidad para válvulas de tesla	34

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La válvula de Tesla se basa en los principios de la mecánica de fluidos y de la hidrodinámica, fue inventada por Nikola Tesla y aunque a veces se le llame válvula de Tesla este tipo de válvula se utiliza en el control y regulación de los fluidos. A diferencia de las válvulas convencionales que utilizan los mecanismos mecánicos y electromecánicos para el control de un fluido, la válvula de Tesla se caracteriza por no tener partes móviles lo que permite que tenga un ciclo de vida más prolongado que otro tipo de válvula.

Generalmente las Válvulas de Tesla se caracterizan por su geometría de lagrima de modo que la forma de restringir el flujo que fluye en el dispositivo es mediante el diseño de cavidades y canales de modo que se aprovechan de las características hidrodinámicas para el control restringido del fluido que se le ingresa a la válvula de Tesla.

La válvula de Tesla fluídica tiene diversas aplicaciones en la industria tales como la automotriz, química, biomédica y en la aeroespacial se la utiliza cuando se requiere limitar el paso de volumen fluídico del combustible que requieren ciertas zonas del vehículo aeroespacial, de modo que se la utiliza ampliamente en los sistemas de control y regulación que necesitan ser precisos a la hora de transportar el fluido de un punto de entrada hacia un punto de salida.

La válvula de tesla es un dispositivo que permite crear resistencia en dispositivos microfluídicos, gracias a su geometría de lagrima véase la siguiente figura 1, permite dos modos de operación que funcionan de modo que cuando se envía caudal en el modo conductor la resistencia es mínima cuando el flujo fluye a través de la válvula de Tesla, pero en el segundo modo de operación cuando se invierte el sentido del dispositivo, esta crea una resistencia que se opone al flujo cuando este atraviesa el dispositivo, logrando obtener así la propiedad de diodicidad dependiendo del sentido que se coloque en la válvula.



Figura 1 Flujo en dirección resistiva y conductora respectivamente

Las microválvulas de tesla son dispositivos que permiten controlar de manera eficiente pequeños volúmenes de un fluido de modo que son altamente utilizadas en aplicaciones tales como en sistemas de control de fluidos en la industria en donde se requiera dosificar o mezclar ciertas sustancias además las microválvulas de tesla sirven en la fabricación de dispositivos (MEMS) y están presentes en la impresión 3D. También las

microválvulas de tesla se utilizan en dispositivos de microfluidica con el objetivo de investigación, en donde se requiere realizar experimentos y observar cómo se comporta una muestra o reactivos ya sea de forma física o química.

1.2 Objetivos

EL siguiente trabajo de fin de master tiene como objetivo principal es el diseño y construcción de una microválvula de tesla mediante el uso de la resina y la impresión en 3D y la obtención de las curvas de diodicidad del dispositivo desarrollado.

La finalidad del proyecto es la de diseñar un microdispositivo que sea hermético es decir que se creen microestructuras cerradas en donde puede pasar el fluido de interés y que se pueda implementar con otros componentes utilizados en microsistemas para analizar las curvas de diodicidad.

Para el desarrollo de la microválvula de tesla se tienen las siguientes especificaciones

- Hermeticidad del Microdispositivo.
- Desarrollar la componente con material de resina.
- Integración de componentes de microsistemas.

Los objetivos del siguiente trabajo son los siguientes:

1. Estudio y diseño de una microválvula de tesla
 - 1.1 Elección de componentes para el sistema microfluídico.
2. Obtención de curvas de diodicidad tanto para el modelo en simulación como para real.
3. Determinar la eficiente de la microválvula de tesla con la geometría Teardrop Design.
4. Analizar la factibilidad de la impresión 3D de resina para microcircuitos.

1.3 Resumen de Resultados

Los resultados del proyecto desarrollado son los siguientes diseño y construcción de una microválvula de tesla que tenga la geometría teardrod desing, segundo que el dispositivo creado tenga cierta resistencia fluidica conforme se varíen los caudales y finalmente la obtención de curvas de diodicidad a nivel de simulación y con los datos reales.

1) Diseño del proyecto

Se ha diseñado una microválvula de tesla para aplicación de microfluidica, creada a partir de resina con impresión 3D, con dos puertos una de entrada a favor y otro de salida o entrada a no favor.

El sistema microfluídico que se plantea consta de una bomba de jeringa automática, para inyección de caudales constantes tanto en un sentido del puerto de entrada como en el puerto de salida. Un sistema de mangueras adaptadas a la boquilla del sensor plugCO2 para el transporte del fluido de interés, un manómetro Digitron 2023P para mediciones de las presiones generadas por la microválvula de tesla.

Se establece los componentes y equipos necesarios para el monitoreo de presión y caudal en la microválvula de tesla.

- 2 puertos entrada/salida
- Hermeticidad en toda la microválvula de tesla

- Caudales controlados
- Simulación en Comsol multiphysics

2) Diseño de la microválvula de tesla.

Se utiliza la geometría “teardrod desing” como esquema base de la microválvula de tesla, además la sección del canal en donde irán las islas o lagrimales que le dan la forma característica es de forma rectangular para facilidad de cálculos y simulación.

En el diseño de la microválvula de tesla se utiliza Autodesk fusion 360 para generar el modelo y para la exportación en diferentes formatos que pueda aceptar los laminadores 3D y los simuladores. Para la simulación de los caudales y presiones que ejercen en el Microdispositivo de la válvula de tesla se utiliza comsol multiphysics por su facilidad en la importación de modelos step y generación de resultados de forma gráfica. Finalmente, para la creación de la microválvula de tesla se utiliza lychee slicer para imprimir en 3D el modelo.

3) Implementación real del microsistema.

La implementación del sistema real se la obtiene integrando diferentes componentes del laboratorio de microsistemas en la figura 2 se puede ver como se adapta tuberías al manómetro en la entrada de la microválvula de tesla con el fin de realizar la medición de las caídas de presión resultantes de la inyección del caudal de la bomba automática y de la resistencia fluidica propia del dispositivo de flujo unidireccional.



Figura 2 Sistema fluidoico vista superior con manómetro y bomba de jeringa automática

1.4 Planificación cronológica

En el siguiente apartado se presenta la serie de actividades que se ha desarrollado para la elaboración de una microválvula de tesla, véase la tabla 1.

Actividad	Descripción	Horas
-----------	-------------	-------

A	Estudio del estado del arte	30
B	Estudio del diseño de un sistema microfluídico	20
C	Estudio y diseño de la geometría de la microválvula de tesla	40
D	Simulación en el software	40
E	Implementación real del microsistema	20
F	Realización de ensayos y ajustes	20
G	Análisis de resultados reales y simulados	40
H	Elaboración de la memoria	100
TOTAL		310

Tabla 1 Descripción de la planificación cronológica para el proyecto de la válvula de tesla

El total de horas invertidas para un trabajo de fin de master se estipula alrededor de 300 horas en el master en ingeniería Electrónica y Automática. La razón de porque se utiliza 10 horas extras es debido a la calibración de la impresora 3D debido a que las resinas utilizadas cambian de parámetros de configuración conforme se utiliza un color diferente o un proveedor de marca diferente. Además, se reajustado el modelo de la microválvula de tesla para que las dimensiones se puedan imprimir y que el modelo puede ser leído por la máquina de impresión 3D.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

En primer lugar las microválvulas de tesla han sido escogidas para sistemas microfluídicos en los últimos años debido al crecimiento de la tecnología miniaturizada esto se debe a que las válvulas de tesla son eficientes para el control de volúmenes pequeños, además que su diseño permite que se integren con otras tecnologías de tipo MEMS permitiendo que de esa manera se creen cada vez sistemas más eficientes y además es una opción muy escogida por su versatilidad es decir que se puede emplear para controlar un flujo, mezclador de líquidos, dosificador en donde se necesitan trabajar con bajas presiones, en resumen que todos estos motivos hacen que las microválvulas de tesla sean un tema de interés en la investigación física, química y microfluidica, finalmente el proceso de manufactura para el siguiente proyecto es a través de la impresión en 3D de resina lo que hará que hará posible cerrar el canal en donde están las geometrías de lágrimas de valvula de tesla a diferencia de los otros sistemas de valvula de tesla en donde es necesario añadir una tapa para que el líquido que la atraviere se fugue por la parte superior.

En segundo orden el desarrollo de microválvulas de teslas otorga diversos beneficios prácticos en el control de fluidos siendo una opción atractiva en los laboratorios en donde los líquidos manipulados son restringidos, logrando así minimizar el consumo y la optimización de los líquidos. Además, otra ventaja de integrar microválvulas en sistemas de automatización es la mejora de la precisión y repetibilidad en los procesos.

Finalmente, con la evolución de los microsistemas y la nanotecnología la microvalvula de tesla se ha convertido en una pieza fundamental para la integración de nuevos dispositivos microfluídicos en donde se requiere mezclar reactivos a escala micro o nano, además que todos estos sistemas necesitan ser miniaturizados lo que hace que cada vez este tipo de valvula sea estudiada en ámbitos como la medicina, biotecnología y en la industria.

La principal problemática a la hora de implementar una microválvula de tesla en un sistema en donde se requieren transportar un volumen de un fluido desde un punto inicial hasta un punto final dependen de varios factores y de la aplicación requerida, pero los principales son la hermeticidad debido al que a ser de un nivel tan reducido el prototipo microfluídico con sus puertos de entrada y salida deben cerrarse herméticamente para que no exista escape del fluido por lo cual a la hora de realizar el diseño se debe tomar este criterio en consideración, además que se deben considerar las pérdidas de carga que son consecuencia de la geometría de la valvula de tesla lo cual puede afectar considerablemente al rendimiento en el sistema microfluídico utilizado y finalmente esta la escalabilidad y fabricación debido que mantener las características de la microválvula de tesla a determinadas dimensiones microscópicas pueden ser dificultosas así como su manufacturación puede conllevar a un gasto económico.

2.2 Valvula fluídica

Acerca de las válvulas de tesla, es un dispositivo que permite que un fluido de naturaleza líquida o gaseosa fluya ventajosamente en una dirección determinada sin la necesidad de utilizar piezas móviles, a diferencias de las válvulas convencionales (válvulas electromecánicas), por otra parte las válvulas de tesla funcionan según los principios que estén relacionados al fluido determinado y su viscosidad con el propósito de permitir un flujo unidireccional del fluido y la eficiencia de las válvulas de tesla se miden según la diodicidad. (Frijns, 2017)

2.3 Diodicidad

La “diodicidad” es un término que se utiliza para explicar la asimetría en la resistencia fluidica a través de una válvula fluídica de tesla semejante en sus dos direcciones, de manera análoga este tipo de dispositivos se comporta como un diodo eléctrico de un circuito electrónico, de modo que la válvula facilita más el paso de un

fluido en una dirección en este caso modo conductor que en el otro modo resistivo debido a la geometría del diseño. Para cuantificar la diodicidad se lo realiza a través del coeficiente denominado D_i (diodicidad) de modo que compara las pérdidas de presión para flujo idénticos en ambas direcciones. Si la Diodicidad es mayor a 1 indica que la resistencia es mayor en la dirección opuesta y favorece el flujo unidireccional y si la diodicidad es menor a 1 indica una resistencia menor en esa dirección. (Cardona, 2022)

2.4 Geometrias de válvulas de tesla.

Con respecto a las geometrías de la válvula de tesla existen diferentes formas, pero las tres principales investigadas son las siguientes teardrop design, válvula de tesla original y la variante de gamboa.

2.4.1 Válvula de tesla original.

Acerca de la primera válvula de Nikolas Tesla, el inventor propuso un conducto valvular en donde el fluido fluyera sin obstáculos en una dirección de modo que la resistencia fuera baja en ese sentido y al cambiar el sentido del flujo por la geometría intrínseca la resistencia sería mayor, por lo cual el siguiente dispositivo realizaba la función de diodo, además la geometría única con carriles interconectados ha sido de interés investigativo, aunque los bosquejos realizados por el inventor indican que este primer diseño no sería tan eficiente debido a que se lo considero un producto inconcluso. (Nguyen, 2021)

2.4.2 Válvula de tesla de Gamboa

Por lo que se refiere a la geometría de la válvula de tesla desarrollada por Adrian Gamboa pretende optimizar la diodicidad de la válvula de tesla mejorando los ángulos alfa y beta del carril es decir que mejorando la forma de los obstáculos que conforman la trayectoria por donde fluye el fluido se puede mejorar hasta una diodicidad aproximada de dos, este tipo de geometría fue desarrollado para microbombas y es utilizada en microfluidica. (Gamboa, 2004)

2.4.3 Válvula de tesla Teardrop Design

Con respecto a la válvula de tesla con forma de lagrima semejante a la geometría de Gamboa debido que para optimizar la diodicidad se configura los ángulos alfa y beta del obstáculo que conforma la trayectoria de la válvula de tesla supone una geometría más sencilla de realizar y además se ha visto muy utilizado en el desarrollo de técnicas de transporte del fluido en sistemas de micro o minicanales. (Li, 2022)

2.5 Microválvula de tesla con impresión 3D

Las microválvulas construidas mediante impresión 3D son dispositivos para la regulación de flujo que se crean utilizando tecnología de impresión tridimensional, generalmente este tipo de tecnología permite la generación de moldes a la cual hay que aplicar técnicas de PDMS para crear un circuito microfluídico logrando obtener aplicaciones en donde se requiere flexión y que las geometrías del canal sean complejas.

Así pues, algunas características de este tipo de válvulas es que son utilizadas en microfluidica como micromezcladores debido a su alta eficacia en el proceso de mezclado de fluidos y por su flujo laminar pasivo. (Wang, 2022)

2.6 Dispositivos microfluídicos impresos en 3D

La impresión 3D es una tecnología que permite la elaboración de estructuras complejas al superponer capas de material y por el otro lado la microfluídica se enfoca en la manipulación de pequeñas cantidades volumétricas de fluidos a nivel microscópico, de modo que la integración de estas dos tecnologías permite la generación de dispositivos microfluídicos impresos en 3D lo cual ofrece beneficios tales como el costo reducido, manufactura rápida y características únicas, aunque también tiene ciertas desventajas en lo que respecta en la resolución y la compatibilidad debido a que estas cualidades están sujetas a las propiedades de la impresora.

Las aplicaciones para lo cual se desarrolla este tipo de dispositivos se encuentran en el campo de la medicina y química además la impresión 3D con la microfluídica optimizarán la industria de los dispositivos MEMS. (Mayo Capella, 2023)

3 MEMORIA

En el siguiente capítulo se desarrolla una válvula microfluidica de Tesla basada en el esquema del famoso inventor Nicola Tesla para aplicaciones microfluídicas para los cual se investiga en referencias bibliográficas las dimensiones del ancho que deben tener el diseño, así como la estructura geométrica que debe tener para que se comporte como un dispositivo de diodo. Actualmente los prototipos de microválvulas de tesla se los desarrollan en PDMS el cual es un polímero de silicona flexible debido a que sus propiedades son tales como las de replicar microestructuras detalladas y de fácil moldeo, pero en el siguiente proyecto se tiende a crear las microestructuras de la microválvula de tesla fluidica con resina en este caso es de la propia marca de la impresora resina anycubic photon de color gris.

En cuanto a los principales softwares para el desarrollo del siguiente proyecto son los tres siguientes: FUSION 360 utilizado en el CAD para el diseño de la micro válvula de tesla, COMSOL MULTIPHYSICS para la simulación de caudales y presiones y finalmente LYCHEE que es el laminador del modelo 3D utilizado para la impresión de resina.

3.1 FUSION 360

FUSION 360 es un entorno de diseño, fabricación y que permite una colaboración con su comunidad en la nube desarrollado por autodesk. Integra herramientas de tipo CAD (diseño asistido por computador) y de CAM (manufacturación asistida por computadora) en un solo software. Además, que permite la creación de modelos 3D, simulación y evaluación del modelo en diferentes entornos, así como la generación de archivos en formatos de tipo STL los cuales son compatibles para los softwares laminadores de impresión 3D. Finalmente cabe destacar que FUSION 360 véase la figura 4, se lo utiliza en diferentes industrias tal como es la de ingeniería mecánica y que su funcionamiento con la nube permite que el modelo diseñado se guarde de manera constante en su servidor de autodesk.



Figura 3 Logotipo de FUSION 360 para el diseño del modelo CAD, tomada de su propia web

En resumen debido a que FUSION 360 es mas ligero que otros softwares de tipo CAD y que las modificaciones que se realicen en el modelo se veran reflejadas en el historial de diseños desarrollados lo hace idoneo para la creacion de la válvula de tesla fluídica.

3.2 LYCHEE SLICER RESIN

En la impresión 3D de modelos CAD existen diversas plataformas dedicadas a la impresión en resina 3D también llamada estereolitografía (SLA), el proceso consiste en fabricación aditiva de modo que la resina que es fotosensible es solidificada capa por capa mediante un láser ultravioleta con el fin de crear un objeto tridimensional.



Figura 4 Logotipo de LYCHEE SLICER para la impresión 3D en resina, tomada de su propia web.

Por último, en vez de utilizar el laminador 3D Anycubic Photon Workshop de la propia máquina de impresión 3D anycubic photon o un software de paga como es el caso de chitubox se opta por lychee slicer véase la figura 5 debido a que es un software de laminado gratis que cuenta con una gran comunidad que comparte los parámetros de impresión para diferentes tipos de impresora 3D de resina.

3.3 COMSOL MULTIPHYSICS

Es un software de simulación y modelado para aplicaciones de ingeniería que resuelve problemas complejos de modo que puede combinar varios fenómenos físicos como termodinámica, electromagnetismo, flujo de fluidos este último se utiliza en el modelo analizar.



Figura 5 Comsol Multiphysics para el análisis de microfluidica, tomada de su propia web.

Debido a que COMSOL MULTIPHYSIC véase la figura 6 permite importar un modelo de un software CAD en el formato STEP y trabajar con el modelo en su entorno, se lo emplea en el siguiente proyecto de la válvula de tesla micro fluidica, aunque el software también permite diseñar en este caso solo se lo aplica para el análisis de datos de la mecánica fluidica.

3.4 Dimensiones de la microválvula fluidica de tesla

En la fuente de referencia generalmente las microválvulas de tesla tienen un ancho de 500 [um] para lo cual se trabaja con esa base y la altura se la obtendrá de manera experimental hasta que la resina se logre solidificar a una altura coherente con la anchura de 500 [um] de la microválvula de tesla y se logre formar el canal donde recorrerá el fluido del puerto de entrada al puerto de salida.

3.5 Condiciones de los puertos de entrada

La microválvula de tesla debe utilizar acopladores microfluídicos que eviten las pérdidas de caudal y facilitar la adaptación de la tubería que va a ir acoplada a la bomba la cual permite transmitir los caudales variables en el dispositivo de la microválvula de tesla de modo que al variar el puerto de entrada en donde se encuentre el modo conductor el fluido recorrerá el circuito de manera más álgera que en el modo no conductor para lo cual se utilizara acopladores especializados en aplicaciones de microfluídica de modo que el adaptador escogido garantice la hermeticidad en el puerto de entrada como el de salida.

3.6 Diseño del sistema de microfluídica

En el siguiente apartado se analiza los equipos y componentes principales, los cuales permiten ensamblar el dispositivo de microválvula de tesla con las otras componentes del sistema microfluídico.

3.6.1 Esquema general del sistema de microfluídica

En primer lugar, la componente estudiada la microválvula de tesla tiene una resistencia fluidica véase la figura 7 que varía según el modo de operación en la que esta funcionado existe el modo conductor y modo resistivo de forma que conjunto con un manómetro y una bomba que permite inyectar caudales de manera controlada se determina qué tipo de presiones son adecuadas para la componente.

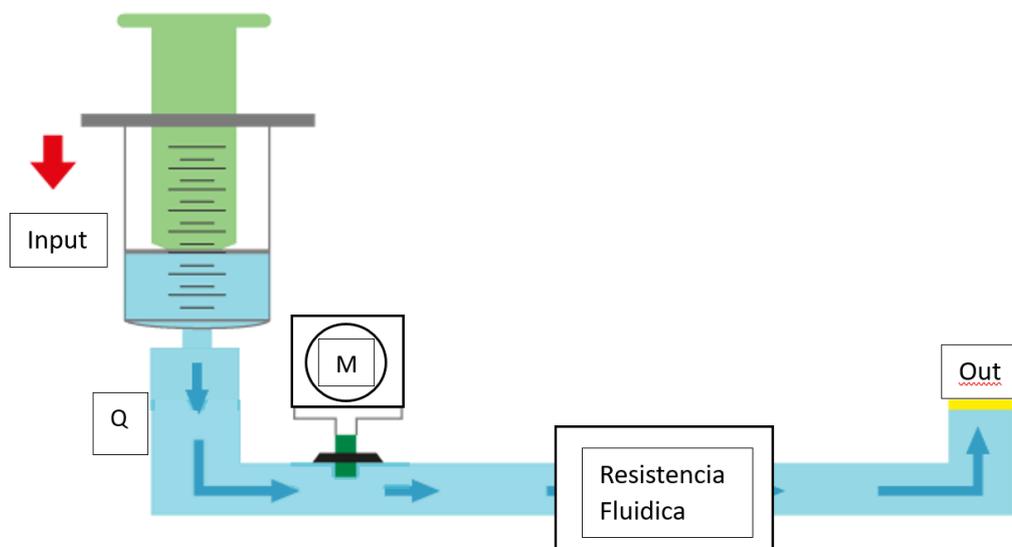


Figura 6 Diagrama General del sistema microfluídico

3.6.2 Componentes fundamentales

Después, teniendo en cuenta que el dispositivo para microfluídica desarrollado necesita pasar ciertos criterios para ser considerada como una microválvula de tesla se procede a utilizar el equipo necesario para crear un sistema en donde la microválvula de tesla actúa como una resistencia fluidica.

➤ NE-1000 Bomba de jeringa autónoma microfluídica

Bomba programable de infusión y extracción de líquido véase la figura 8, utilizada en jeringas de volumen de 1 a 60 [mL] con velocidades de infusión de 0.01 a 30 [mL/min]. El siguiente instrumento de laboratorio es utilizado en campos biotecnología y permite trabajar con caudales de [uL/s] así mismo permite variar los caudales de modo que se puede adaptar a la aplicación microfluídica requeridas en la

microválvula de tesla.



Figura 7 Bomba de jeringa para inyección de caudales variables. (tehnologies, 2023)

➤ Mangueras para microfluídica

En los sistemas microfluídicos las mangueras representan a los microcanales generalmente este tipo de tubería véase la figura 9 son de dimensiones pequeñas es decir que utilizan unidades de micrómetros, lo cual es esencial en el transporte preciso de fluidos en donde se necesita volúmenes a escala microscópica.

El sistema necesita de una adaptación debido a que se utiliza jeringas con un gran volumen de 60 [mL] y deben ser adaptas a un puerto pequeño en donde estará el adaptador para el sensor CO₂ para lo cual al principio se utiliza la siguiente tubería véase la figura 6 de sección transversal correspondiente a la jeringa de 60 [mL]



Figura 8 Manguera de microfluídica de 4mm (auxilab, 2023)

Finalmente se emplea una manguera que se muestra en la figura 10 que se acopla perfectamente al sensor CO₂ plug este tipo de manguera es más característico de las aplicaciones de circuitos microfluídicos debido a que permite manejar caudales a microescala, en resumen, las mangueras en microfluídica son esenciales para la manipulación de volúmenes pequeños logrando así que se incorpore en aplicaciones de biología, química e investigación científica en general.



Figura 9 Manguera de microfluídica de $1,60 \pm 0,07 \times 3,20 \pm 0,12$ grosor 0,80mm (auxilab, 2023)

➤ **SensorPlug**

Es un dispositivo que se inserta en un chip microfluídico para medir los niveles de CO₂ véase la figura 11 en tiempo real, pero en este caso se lo va a utilizar como un adaptador que permite la conexión entre la microválvula de tesla y la bomba de jeringas autónoma.



Figura 10 Adaptador sensor Plug

➤ **Pegamento epoxi de 2 elementos**

Debido a que el adaptador tiene cierta tolerancia en su diámetro, se requiere del pegamento epoxi que se muestra en la figura 12 el cual se lo emplea en conjunto con el modelo de resina de la microválvula de tesla para unir el adaptador CO₂ sensor plug y así evitar fugas del líquido mientras se traspa el fluido de un puerto de entrada a otro puerto de salida con eso se garantiza que el modelo tengas perdidas y sea hermético.



Figura 11 Pegamento epóxi de 2 elementos

➤ **Contenedor de isopropanol para postprocesado.**

El contenedor de plástico que se muestra en la figura 13 permite limpiar el modelo de la resina usando alcohol isopropílico de modo que todos los residuos de resina que todavía no se han solidificado deben ser limpiados por presión utilizando jeringuillas que se adecuan a los puertos y de ser necesario se deja reposar en el contenedor unos 5 minutos para que la resina se evacue.



Figura 12 Contenedor plástico para el vaciado del líquido del sistema de la microválvula de tesla

Ademas se utiliza otro contenedor semejante para almacenar el fluido estudiado en este caso el agua por sus propiedades conocidas y su uso chabitual para este tipo de investigaciones.

➤ **Jeringuillas de caudales.**

Las jeringuillas utilizadas en el siguiente experimento véase la figura 14 permiten ingresar volúmenes del fluido estudiado a pequeña escala de modo que se controla el caudal que ingresa al dispositivo microfluídico logrando realizar las pruebas con un volumen ya determinado por parte de las jeringuillas.



Figura 13 Jeringuilla de 20 ml para aplicación de la microválvula de tesla

En este caso se utiliza jeringuillas de la fabrica duoNEX para las pruebas microfluidicas de modo que se dosifica el liquido con precision

➤ **Digitron 2023P**

El Digitron 2023P es un manómetro digital desarrollado por la empresa Digitron reconocida por la fabricación de instrumentos de medición. El siguiente manómetro que se muestra en la figura 15 se emplea con el propósito de medir la presión presente en el siguiente proyecto de microválvula de tesla.



Figura 14 Digitron 2023P

Debido a su carácter digital garantiza mediciones precisas y es adecuado para aplicaciones microfluídicas debido a que la medición de presión es de vital importancia en la resistencia fluidica que genera la microválvula de tesla.

➤ **IPA (alcohol isopropílico)**

El término "IPA" en la impresión de resina se refiere al alcohol isopropílico. El alcohol isopropílico es un disolvente comúnmente utilizado en la impresión 3D de resina para limpiar y preparar las piezas impresas véase la figura 16.

Después de que se ha completado una impresión en una impresora de resina, las piezas impresas suelen tener residuos de resina no curada en su superficie. Para eliminar estos residuos, las piezas se sumergen en un baño de IPA durante unos minutos. El alcohol isopropílico es capaz de disolver la resina no curada, lo que permite que las piezas se limpien fácilmente.



Figura 15 Alcohol isopropílico para limpieza de resina

Además de la limpieza de las piezas impresas, el IPA también se utiliza para limpiar las superficies de la impresora de resina y sus componentes, como la plataforma de construcción y la cubeta de resina, para mantenerlos limpios y en buen estado de funcionamiento.

➤ **Impresora Anycubic Photon**

La impresora de resina Anycubic Photon que se muestra en la figura 17 no tiene una cama de impresión como las impresoras de filamento tradicionales. En su lugar, utiliza una plataforma de construcción que se sumerge en la resina líquida y se levanta en incrementos muy pequeños durante el proceso de impresión.

La unidad de medida utilizada en la plataforma de construcción de la Anycubic Photon es en milímetros (mm), ya que esta es la unidad de medida estándar en la mayoría de los sistemas de impresión 3D. La plataforma de construcción tiene un tamaño máximo de impresión de 115 mm x 65 mm x 155 mm (largo x ancho x alto).

En cuanto a la resolución de impresión, la Anycubic Photon es capaz de imprimir capas con un grosor mínimo de 25 micrones (0,025 mm), lo que significa que puede imprimir detalles muy finos y precisos en los modelos.



Figura 16 Impresora DLP Anycubic Photon DLP para resina líquida.

➤ **Microválvula de tesla de resina**

Microdispositivo utilizado en el sistema fluídico para crear resistencia fluidica con puertos de entrada y salida el siguiente dispositivo tiene 9 geometrías características de la válvula de tesla el cual al aumentar sus lagrimales mejora en eficiencia la resistencia fluidica, véase la figura 18.

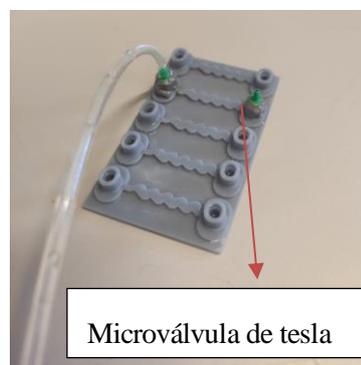


Figura 17 Microválvula de tesla fluídica. Creación del autor

4 DISEÑO Y SIMULACIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo del siguiente capítulo es diseñar en fusión 360 y después simular el modelo en Comsol Multiphysics de manera que quede validado el modelo y así determinar cuáles son las presiones y caudales que se deben ingresar a la bomba de jeringa autónoma que va interconectado al prototipo microválvula de Tesla.

4.2 Diseño del modelo en fusion 360

Se procede a diseñar una microválvula de tesla en fusion 360 para lo cual se utiliza bibliografía de referencia en la cual se indica que el de una micro válvula de Tesla equivalente a 1000 [um] es ideal para aplicaciones médicas 500 [um] y de 100 [um] , se escoge un valor medio en este caso de 500 [um], de modo que se procede a dibujar y desarrollar el modelo, de las 3 geometrías de válvula de Tesla investigadas la que más se adecua a la aplicación es la del Teardrop Design véase la siguiente tabla 2. (Purwidyantri, 2023)

Válvulas de Tesla	Modelo	Modo de operación
Teardrop Design		Conductor de fluido
		Resistivo
Gamboa Design		Conductor de fluido
		Resistivo
Original Design		Conductor de fluido
		Resistivo

Tabla 2 Tipos de geometrías de válvulas de tesla.

La microválvula de Tesla debe tener dos puertos que actuarán como entrada y salida de manera que se puede adaptar el sensor plug CO2, cuando el fluido fluye en el sentido conductor la resistencia fluídica será mucho menor que en el modo de operación resistivo.

- **Esquema geométrico de la microválvula de tesla**

Con respecto al esquema general de la válvula microfluídica se emplea la del teardrop design como se muestra en la figura 18, con 9 geometrías de lagrimal correspondiente a una entrada y una salida con sus puertos correspondientes en modo conductor y bloqueo véase la figura 19, las siguientes características dimensionales véase la tabla 3 corresponden a la microválvula de tesla.

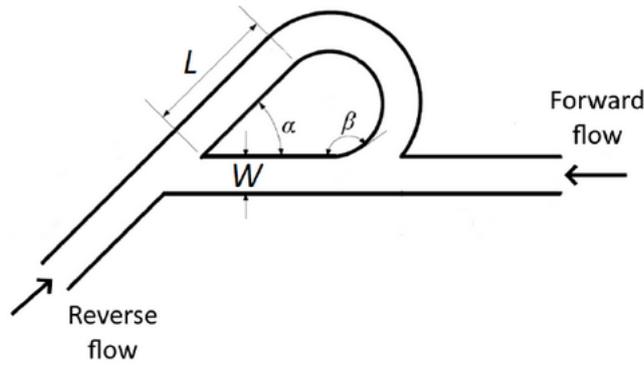


Figura 18 Esquema básico de una válvula de tesla

γ	D	W	L	α	β
0.29	1700 μm	500 μm	987.2689603 μm	60°	118.0329785347 °

Tabla 3 dimensiones de la microválvula de tesla desarrollada

Donde γ es la relación entre el ancho de canal/ relacion de aspecto de profundidad, D profundidad de la válvula.

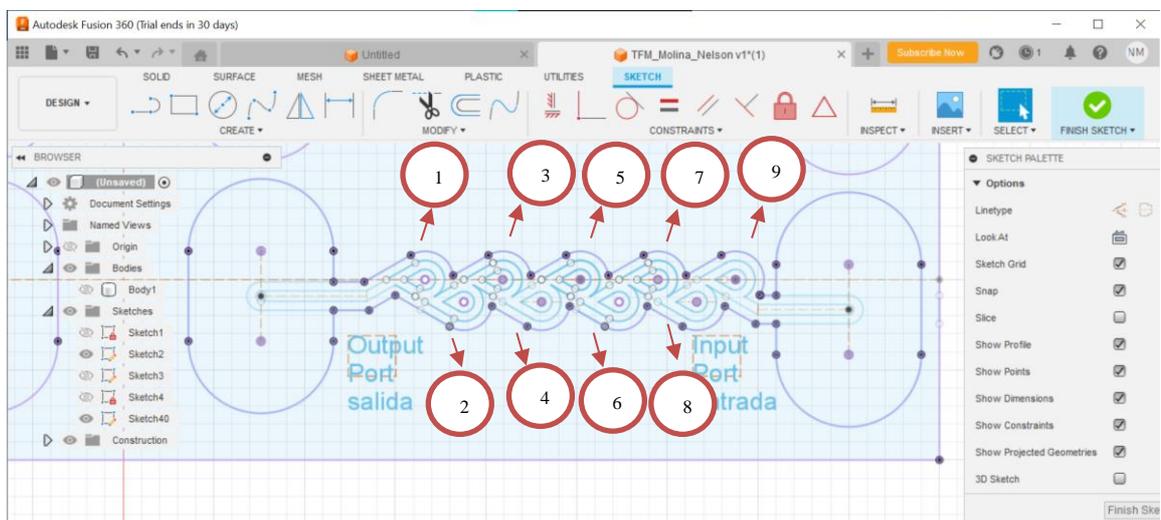


Figura 19 Geometría base de una microválvula de tesla en fusion 360

Con respecto a los puertos en donde se conecta el conector de CO2 sensor plug se lo realiza a través de una microestructura cuadrangular el cual permite enviar fluido del puerto de entrada hacia el puerto de salida y la forma elíptica se dibuja de tal manera que concuerda con la geometría del sensor CO2 plug y se pueda acoplar de forma adecuada como se muestra en la figura 20.

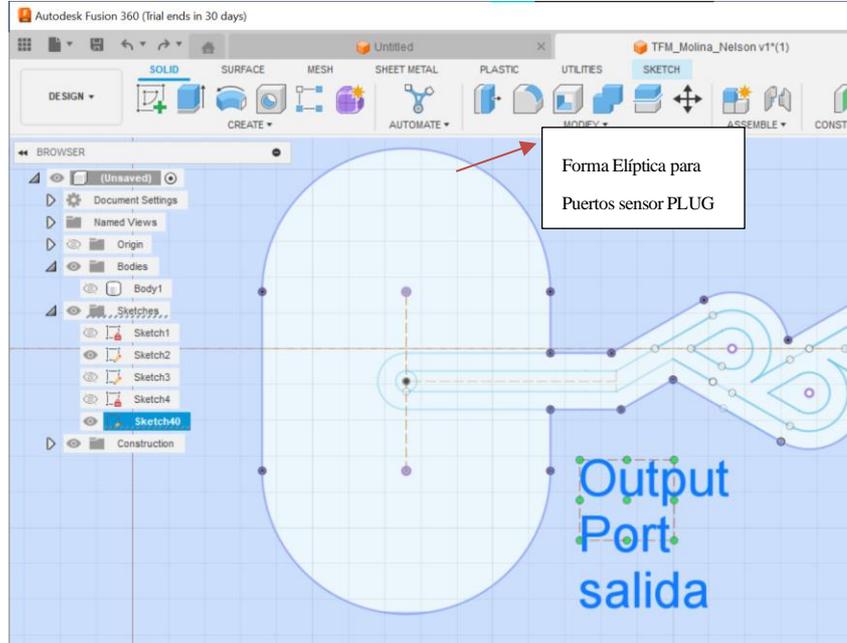


Figura 20 Forma elíptica para la conexión del sensor CO2 plug y microválvula de tesla

- **Vista Lateral geometría de la microválvula de tesla**

La microválvula de tesla al ser creada en resina debe tener una tapa que impida que el fluido escape por la parte superior del canal para lo cual se ha creado una tapa con un espesor de 100 [um] véase la figura 21 y los puertos tienen una forma circular para poder limpiar el exceso de resina después de que se haya realizado la impresión.

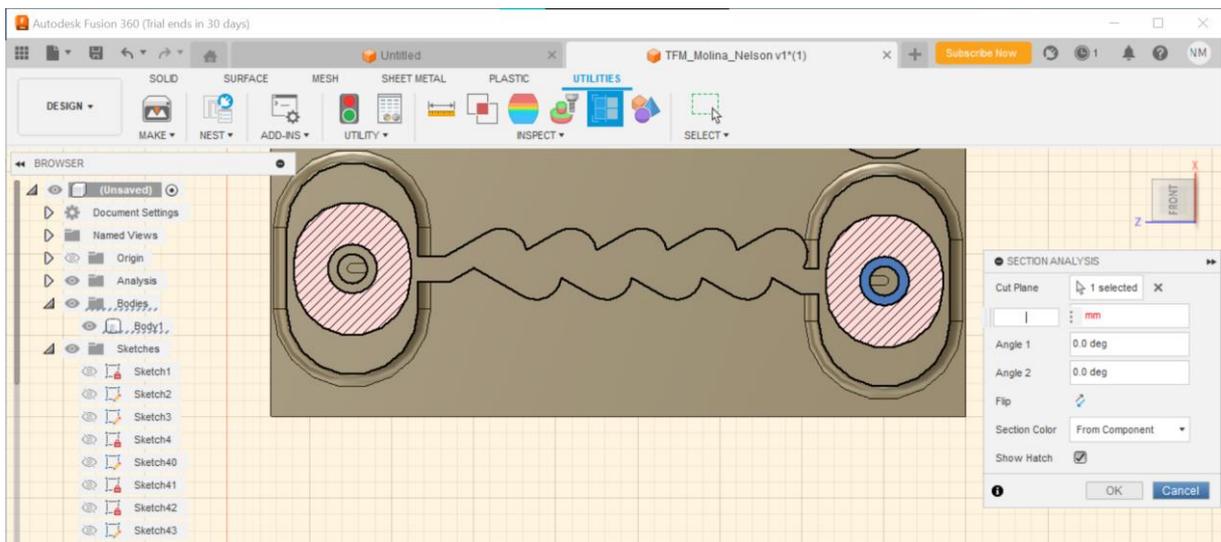




Figura 21 Vista transversal de los puertos de entrada y salida

En esta vista de corte transversal correspondiente a la figura 22 se puede observar de color gris como va a ser la trayectoria en donde va a recorrer el fluido, este dato será de vital importancia debido a que la distancia de puerto a puerto influirá en los cálculos de microfluídica que se verán posteriormente.

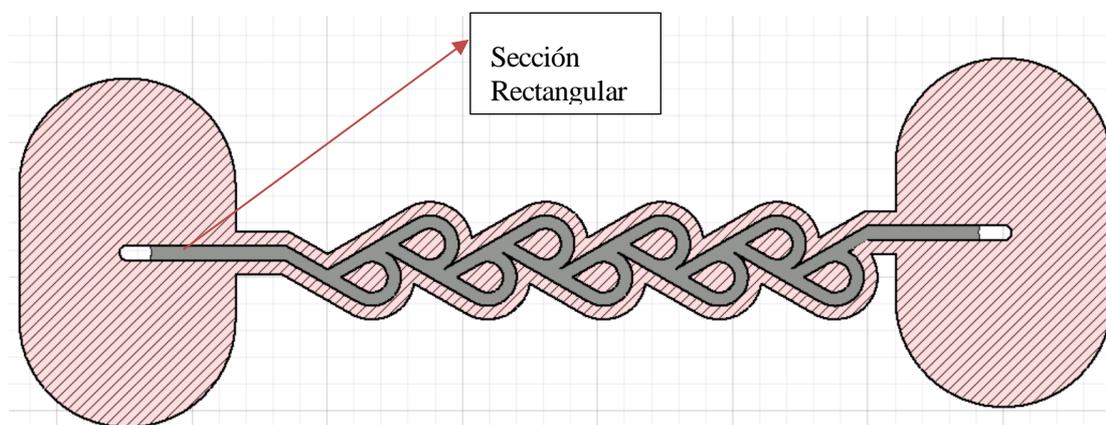


Figura 22 Vista transversal del canal de la microválvula de tesla

- Generación del modelo

En cuanto a la generación del modelo se ha creado un patrón lineal de la misma figura de microválvula de tesla con diferentes alturas de 1.6 mm hasta 2 mm como se muestra en la figura 23 dado que la resina suele tener una tolerancia en las dimensiones cuando se solidifica, quedando así el modelo de la microválvula de tesla y su vista isométrica se muestra en la figura 24.

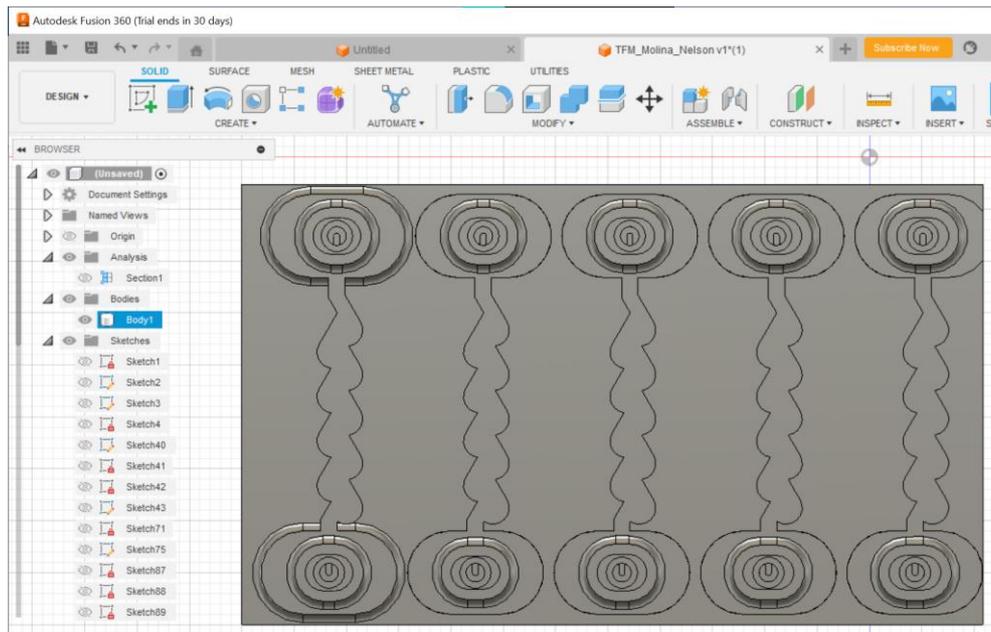


Figura 23 Modelo con válvulas en paralelo

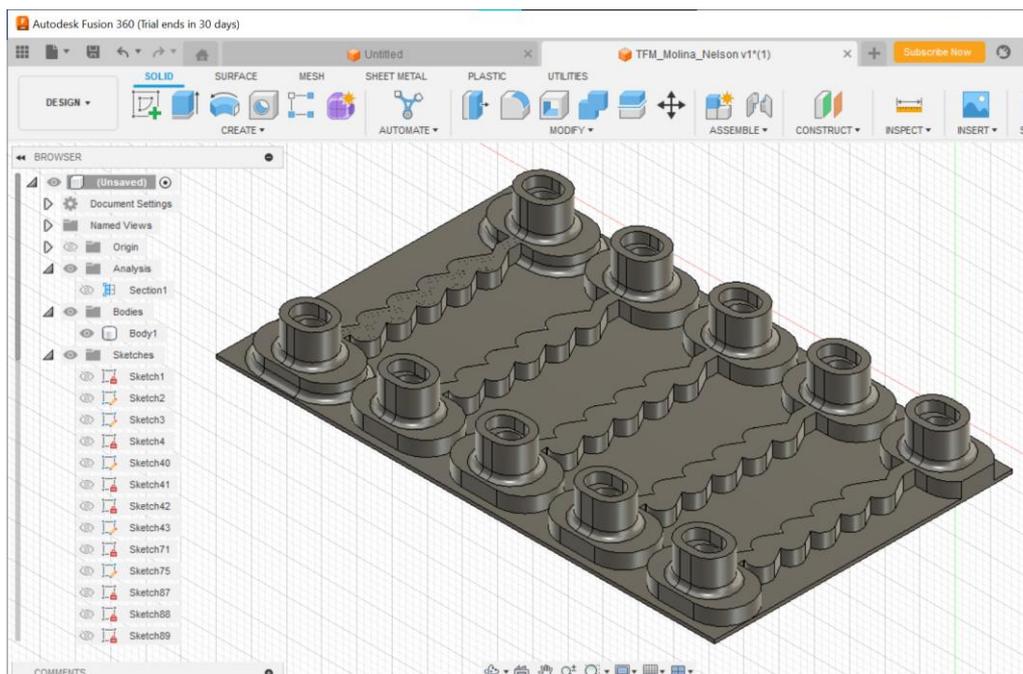


Figura 24 Vista isométrica válvulas con diferentes alturas

Finalmente se mide la distancia que se considera del puerto de entrada y el puerto de salida como se observa en la figura 25 obteniendo como valor de 24.403 mm de modo que esta distancia será considerada para los cálculos.

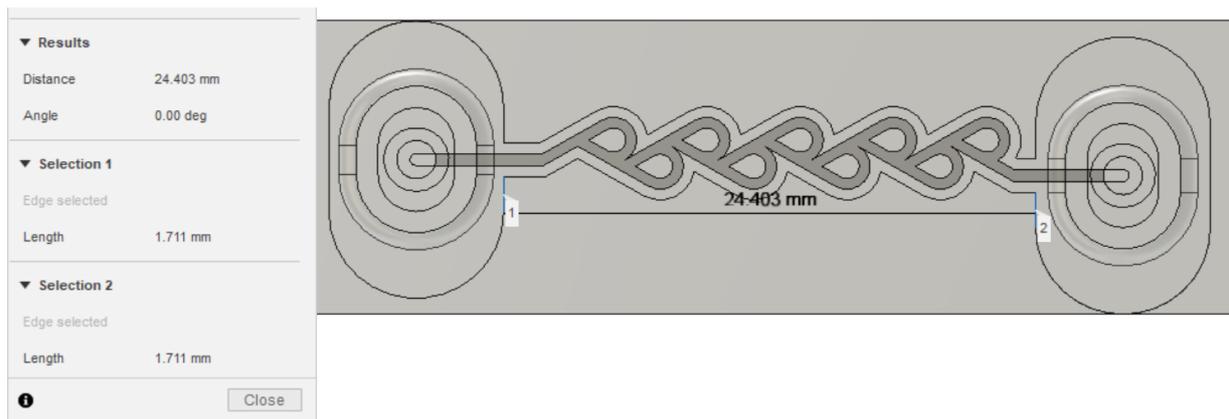


Figura 25 Vista en rayos X de la válvula de tesla

- Exportación del modelo para Comsol Multiphysics

Sobre el archivo que se va a exportar para poder trabajar en comsol multiphysics será de formato STEP como se muestra en la figura 26 para que el software no tenga ninguna dificultad a la hora de generar las geometrías y no de ningún error a la hora de la simulación, cabe tener en cuenta que se usa fusión 360 para la creación de circuitos microfluídicos debido a que estos también tienen librería de electrónica incorporada que puede permitir aumentar la complejidad del modelo, pero adicionando elementos electrónicos.

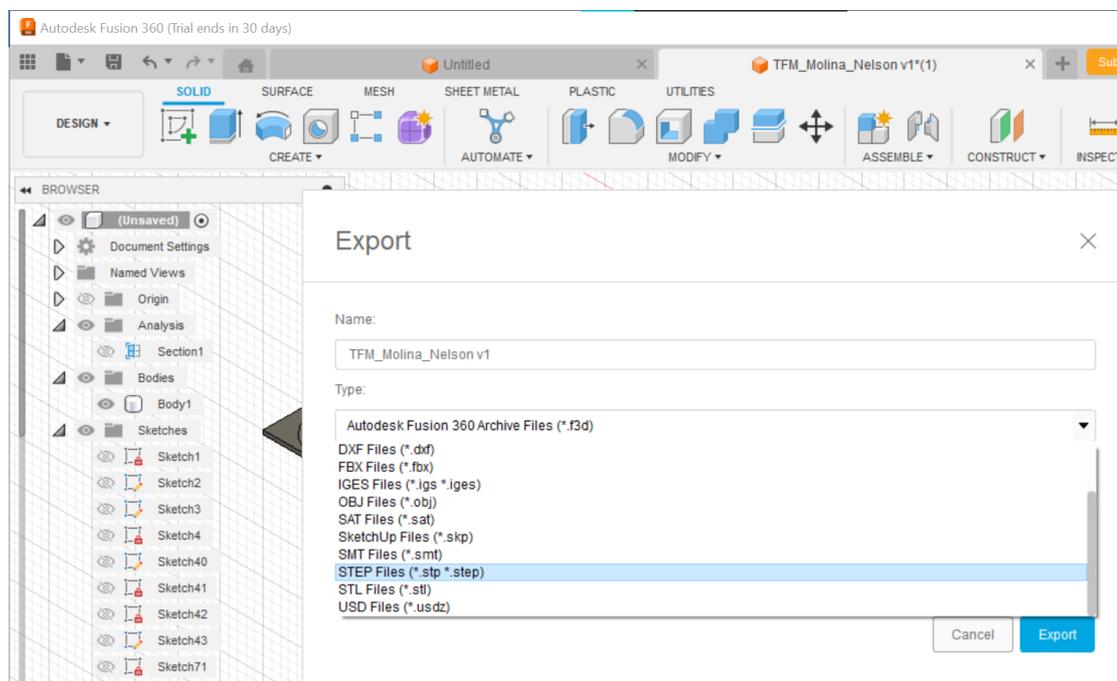


Figura 26 Ventana de exportación en formato Step y Stl

4.3 Simulación en Comsol Multiphysics

En el siguiente apartado se procede a importar el modelo desarrollado en fusión 360 este modelo o archivo debe ser en formato Step de modo que se pueda importar la geometría de valvula de tesla como se sabe el software de comsol multiphysics se utiliza para el análisis de las físicas implicadas para lo cual dentro del modelo desarrollado se colocara las fuerzas microhidráulicas que influyen.

- Modelo fluídico

De la siguiente expresión de Hagen-Poiseuille véase la ecuación 1 (Régimen Laminar, microscópico) donde:

Δp es la diferencia de presión a través del conducto circular

L es la longitud del tubo

R es el radio del tubo

A es el área de la sección transversal del tubo

Q tasa de flujo volumétrico (volumen del fluido que se transmite por unidad de tiempo)

$$\Delta p = \frac{8\mu L Q}{\pi R^4} = \frac{8\pi\mu L Q}{A^2} \quad (1)$$

se derivan el siguiente modelo eléctrico equivalente véase la figura 27, la formula mencionada es para un conducto de perfil circular y no es para determinar la resistencia fluídica de la microválvula de tesla, pero al realizar los cálculos teóricos se determina las presiones que se sugiere para ingresar en el simulador Comsol Multiphysics.

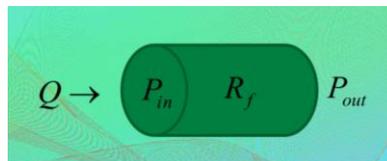


Figura 27 Modelo fluídico de un conducto circular

Por otro lado, el diámetro hidráulico para conductos genéricos es la siguiente véase la fórmula 2 donde.

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2)$$

D_h Diámetro hidráulico para conductos genéricos

A área del conducto genérico

P Perímetro de la sección transversal del conducto

densidad[kg/m ³]	viscosidad dinámica [N.s/m ²]	L_Longitud[m]	u_viscosidad_fluido [Pas.s]
998.2	0.001	0.024403	0.001
a[m]	b[m]	ab[m ²]	Diametro_Hidraulico[m]
0.0005	0.0017	0.00000085	0.000772727

Tabla 4 Constantes del agua y datos de la seccion rectangular de la microválvula de tesla

Para determinar el diámetro hidráulico primero se determina el perímetro de la microválvula microfluídica en la sección transversal de ancho 500 [um] y altura de 1700 [um] véase la fórmula 3.

$$P = 2a + 2b \quad (3)$$

$$P = 2 * 500 + 2 * 1700$$

$$P = 4.4 \times 10^{-3} [m]$$

Para el cálculo del diámetro hidráulico se lo hace con la sección transversal de la microválvula fluídica de tesla véase la fórmula 4.

$$D_h = \frac{4A}{P}$$

$$D_h = \frac{4(1700 \text{ um})(500 \text{ um})}{4.4 \times 10^{-3} \text{ um}}$$

$$D_h = 7.727 \times 10^{-4} [m]$$

La resistencia fluídica se obtiene véase la fórmula 5 en donde:

u es la viscosidad fluídica [Pas.s] =0.001

L_y la longitud equivalente es la distancia del puerto de entrada y salida de la microválvula de tesla 0.024403 m.

R_f Es la resistencia fluídica del conducto

D es el diámetro hidráulico anterior

Ecuación 4 Resistencia fluídica de un conducto

$$R_f = \frac{128\mu L}{\pi D^4} \quad (4)$$

$$R_f = \frac{128(0.001)(0.024403)}{\pi(7.727 \times 10^{-4})^4}$$

$$R_f = 2.788 \times 10^9 \text{ [Pas} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}^3}]$$

Una vez obtenidas la resistencia fluídica del modelo teórico, se procede a calcular las presiones con la fórmula 1 para diferentes caudales, cabe recalcar que la resistencia fluídica determinada no es la verdadera del prototipo impreso, pero nos sirve de partida para evaluar las presiones y caudales que se espera obtener experimentalmente, la tabla 4 resume las constantes del agua y de la sección rectangular de la microválvula de tesla, utilizada para cálculos.

Q[ml/min]	Q[m ³ /s]	velocidad [m/s]	u [Pas.s]	Rf [Pas.s/m ³]	Presion [Pas] Hagen-Poiseuille
-16	-2.6667E-07	-0.31372549	0.001	2.79E+09	-743.6474
-15	-	-0.29411765	0.001	2.79E+09	-697.1695
	0.00000025				
-14	-2.3333E-07	-0.27450980	0.001	2.79E+09	-650.6915
-13	-2.1667E-07	-0.25490196	0.001	2.79E+09	-604.2135
-12	-0.0000002	-0.23529412	0.001	2.79E+09	-557.7356
-11	-1.8333E-07	-0.21568627	0.001	2.79E+09	-511.2576
-10	-1.6667E-07	-0.19607843	0.001	2.79E+09	-464.7796
-9	-	-0.17647059	0.001	2.79E+09	-418.3017
	0.00000015				
-8	-1.3333E-07	-0.15686275	0.001	2.79E+09	-371.8237
-7	-1.1667E-07	-0.13725490	0.001	2.79E+09	-325.3458
-6	-0.0000001	-0.11764706	0.001	2.79E+09	-278.8678
-5	-8.3333E-08	-0.09803922	0.001	2.79E+09	-232.3898
-4	-6.6667E-08	-0.07843137	0.001	2.79E+09	-185.9119
-3	-	-0.05882353	0.001	2.79E+09	-139.4339
	0.00000005				
-2	-3.3333E-08	-0.03921569	0.001	2.79E+09	-92.9559
-1	-1.6667E-08	-0.01960784	0.001	2.79E+09	-46.4780
0	0	0.00000000	0.001	2.79E+09	0.0000
1	1.66667E-08	0.01960784	0.001	2.79E+09	46.4780
2	3.33333E-08	0.03921569	0.001	2.79E+09	92.9559
3	0.00000005	0.05882353	0.001	2.79E+09	139.4339
4	6.66667E-08	0.07843137	0.001	2.79E+09	185.9119
5	8.33333E-08	0.09803922	0.001	2.79E+09	232.3898
6	0.0000001	0.11764706	0.001	2.79E+09	278.8678

7	1.16667E-07	0.13725490	0.001	2.79E+09	325.3458
8	1.33333E-07	0.15686275	0.001	2.79E+09	371.8237
9	0.00000015	0.17647059	0.001	2.79E+09	418.3017
10	1.66667E-07	0.19607843	0.001	2.79E+09	464.7796
11	1.83333E-07	0.21568627	0.001	2.79E+09	511.2576
12	0.0000002	0.23529412	0.001	2.79E+09	557.7356
13	2.16667E-07	0.25490196	0.001	2.79E+09	604.2135
14	2.33333E-07	0.27450980	0.001	2.79E+09	650.6915
15	0.00000025	0.29411765	0.001	2.79E+09	697.1695
16	2.66667E-07	0.31372549	0.001	2.79E+09	743.6474

Tabla 5 cálculos teóricos para las presiones de la microválvula de tesla

Con los siguientes datos calculados se obtiene la tabla 5 de datos experimentales de modo que se genera la siguiente gráfica que tiene una forma lineal a causa de que el modelo fluido era para perfiles de tubo rectangular, pero en la microválvula de tesla al contener los lagrimales que hacen de obstáculos logrando así un flujo turbulento se obtendrá graficas del tipo diodo. La diodicidad en este caso sería de 1 lo que significa que tanto en el modo conductor como en el modo resistivo no habría perdidas en la carga es por eso por lo que para este tipo de proyectos es mejor utilizar simuladores como Comsol Multiphysics el cual permite relacionar las fuerzas microfluídicas que estan interaccionando.

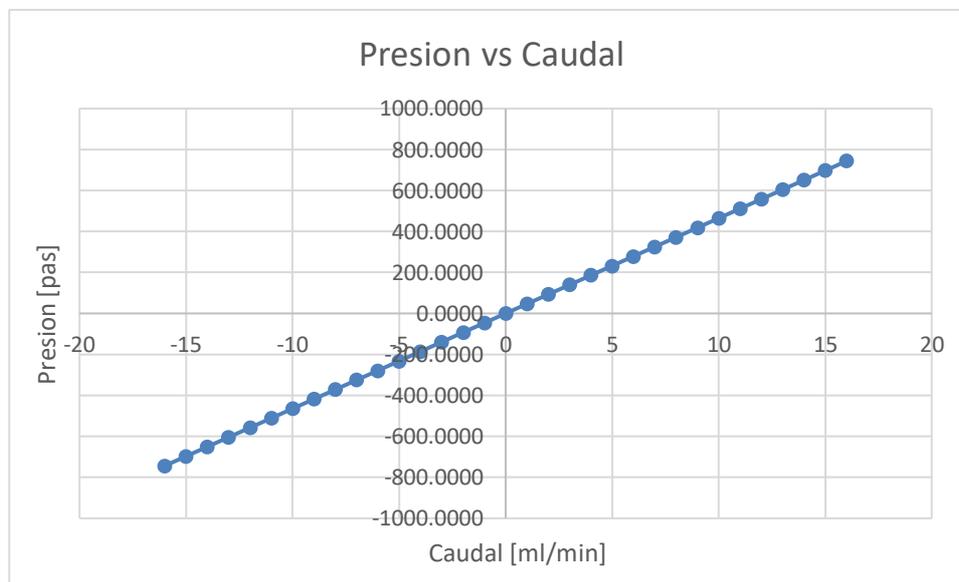


Figura 28 Grafica teórica de presión y caudal del modelo fluido estándar

Con estos cálculos ya se tiene una idea de las presiones que pueden ir surgiendo en la simulación como la presión máxima es de 743.65 Pas en la simulación de Comsol Multiphysics primero se opera en modo conductor y se pondrá en los límites un rango de 33600 a -33600 [pas] para observar cómo influye el caudal a la presión en el dispositivo de la microválvula de tesla

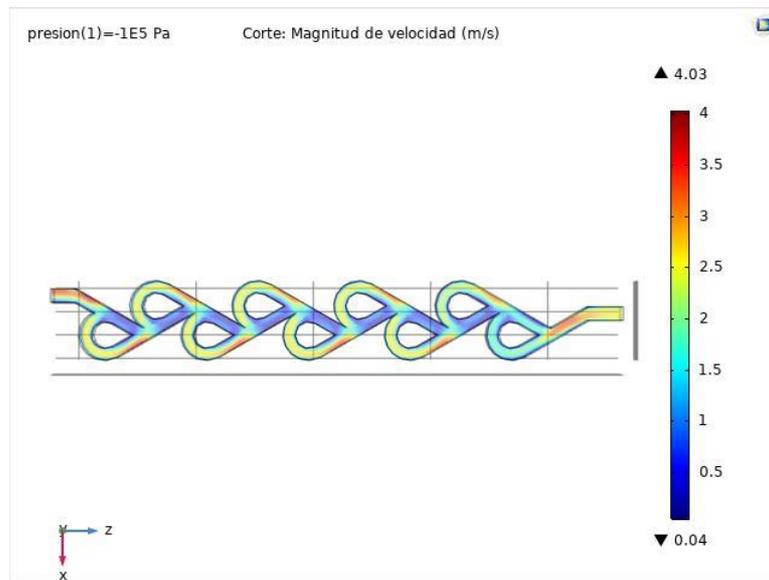


Figura 29 Velocidad de fluido con respecto a la presión 1

En el primer orden se puede apreciar en la figura 29 con una presión negativa de $-1E5$ [Pa] en el modo resistivo con caudal del fluido media de $2.31E-06$ [m³/s]

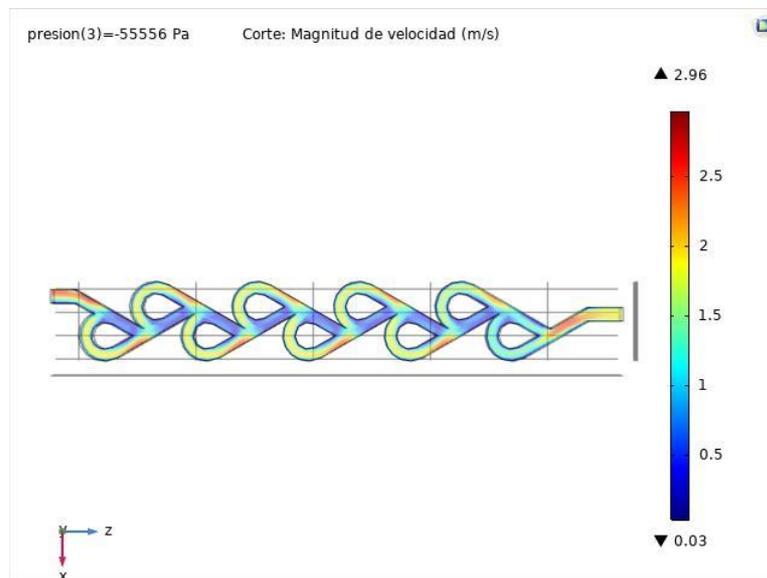


Figura 30 Velocidad de fluido con respecto a la presión 3

En la figura 30 se puede apreciar una presión negativa de -55556 [Pa] en el modo resistivo con caudal del fluido media de $1.71E-06$ [m³/s]

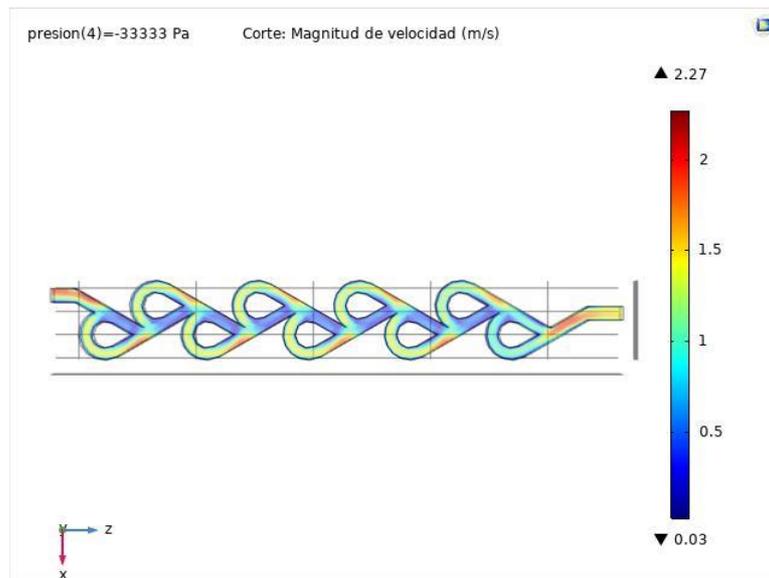


Figura 31 Velocidad de fluido con respecto a la presión 4

En la figura 31 se puede apreciar una presión negativa de -33333 [Pas] en el modo resistivo con caudal del fluido media de $1.32E-06$ [m³/s]

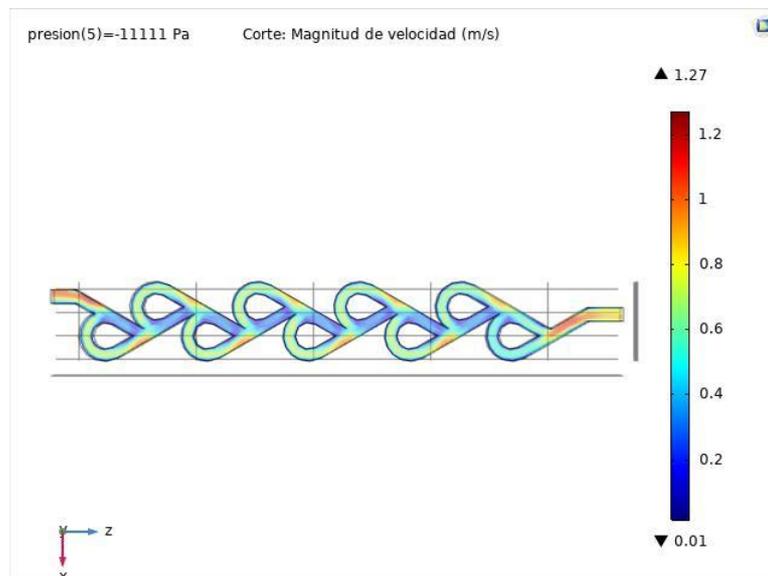


Figura 32 Velocidad de fluido con respecto a la presión 5

En la figura 32 se puede apreciar una presión negativa de -11111 [Pas] en el modo resistivo con caudal del fluido media de $7.42E-07$ [m³/s]

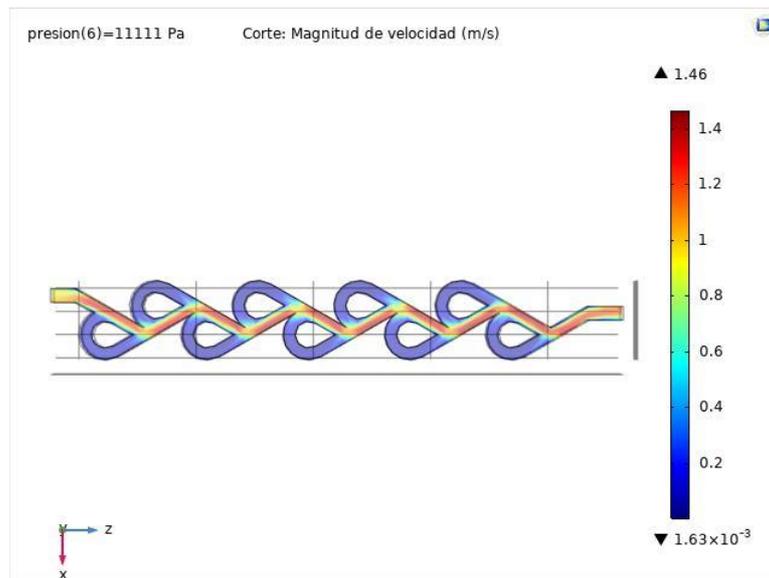


Figura 33 Velocidad de fluido con respecto a la presión 6

En la figura 33 se puede apreciar una presión positiva de 11111 [Pas] en el modo conductor con caudal del fluido media de 8.86E-07 [m³/s]

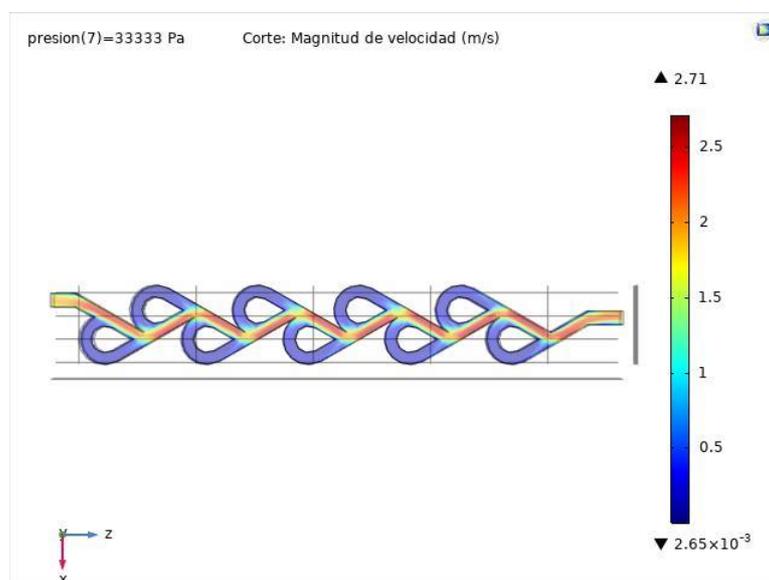


Figura 34 Velocidad de fluido con respecto a la presión 7

En la figura 34 se puede apreciar una presión positiva de 33333 [Pas] en el modo conductor con caudal del fluido media de 1.60E-06 [m³/s]

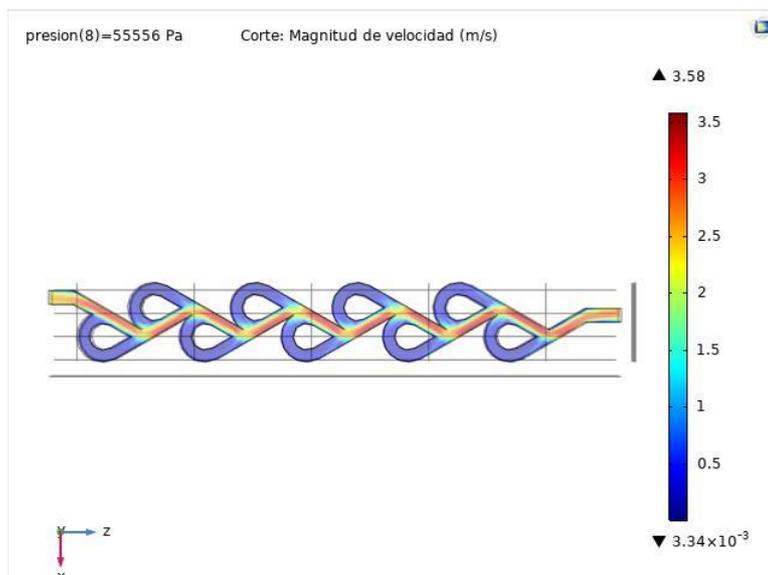


Figura 35 Velocidad de fluido con respecto a la presión 8

En la figura 35 se puede apreciar una presión positiva de 55556 [Pas] en el modo conductor con caudal del fluido media de $2.10E-06$ [m³/s]

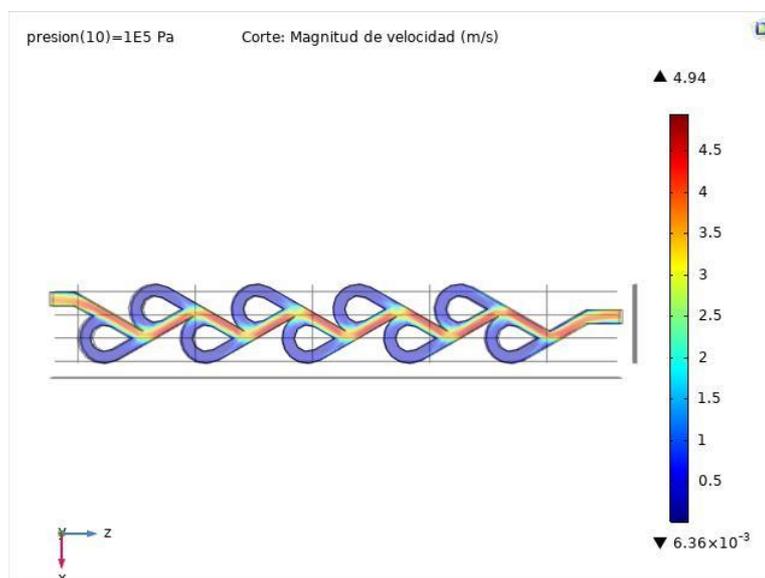


Figura 36 Velocidad de fluido con respecto a la presión 10

En la figura 36 se puede apreciar una presión positiva de 1E5 [Pas] en el modo conductor con caudal del fluido media de $2.87E-06$ [m³/s]

A continuación, se recopilan los puntos en la tabla 6 que son los correspondientes a la presión y caudal en modo conductor de la microválvula de tesla simulada como se muestra en la figura 37 en modo conductor, cabe aclarar que en la experimentación física también se utiliza el modo conductor para determinar los puntos y esta grafica

de simulación realizada en comsol multiphysics es la referencia que nos indica que grafica se puede obtener.

	presión [Pas]	Q [m ³ /s]	caudal [ml/min]
backward	1.00E+05	2.31E-06	138.41
	77778	2.03E-06	121.87
	55556	1.71E-06	102.74
	33333	1.32E-06	79.11
	11111	7.42E-07	44.51
	0	0.00E+00	0.00
	0	0.00E+00	0.00
Forward	11111	8.86E-07	53.19
	33333	1.60E-06	96.03
	55556	2.10E-06	126.09
	77778	2.51E-06	150.78
	1.00E+05	2.87E-06	172.30

Tabla 6 Datos simulados de la presión y caudal en Comsol Multiphysics

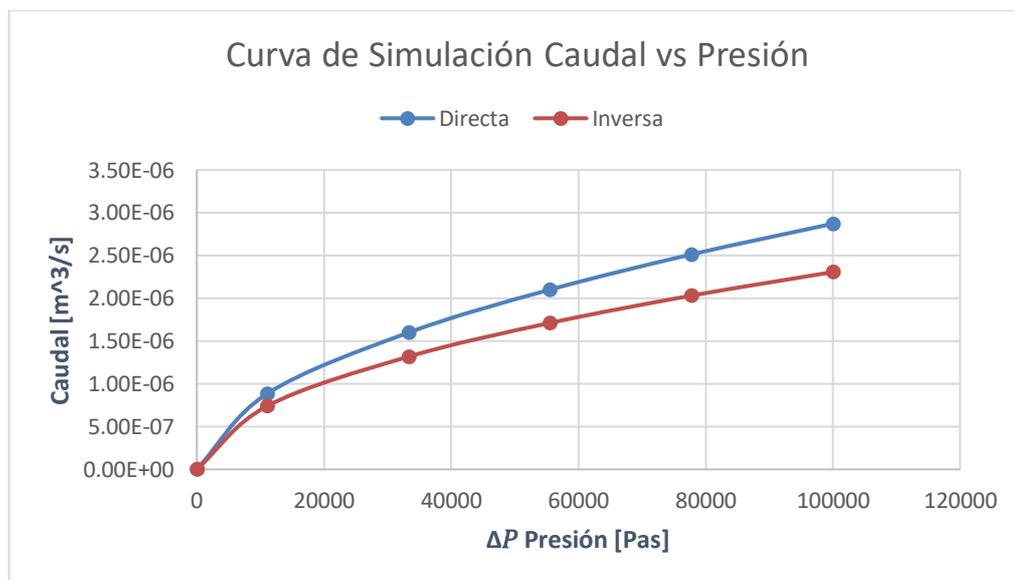


Figura 37 Curvas de presión vs caudal en comsol multiphysics modo conductor

Como se puede ver en la imagen 37 la presión aumenta y la velocidad de caudal también pero cuando se utiliza presiones negativas la velocidad del fluido disminuye de modo que, si está cumpliendo el modo de inversa o bloqueo, es decir la curva azul que representa el modo conductor tiene mayor caudal que la curva roja que representa el modo resistivo

En resumen, después de realizar las respectivas simulaciones en Comsol Multiphysics las velocidades de caudal en la máquina autónoma de jeringas deben ir en unidades de ml/min de modo que cuando se mida la presión con el manómetro se logre apreciar la gráfica de presión vs caudal.

Por otro lado, en vista que la diodicidad de figura 37 de la simulación no se puede cuantificar porque los puntos

de caudal no se parecen y para que la diodicidad se pueda apreciar se deben tener los mismos caudales, se procede a realizar otra simulación, pero con un nuevo rango de presiones más bajas y un conjunto de puntos mucho más grande como se muestra en la tabla 7.

	Presion[pas]	caudal[m ³ /s]	Presion[pas]	caudal[m ³ /s]
backward	-2000	-2.6658E-07	2000	2.67E-07
	-1900	-2.5779E-07	1900	2.58E-07
	-1800	-2.4875E-07	1800	2.49E-07
	-1700	-2.3924E-07	1700	2.39E-07
	-1600	-2.2968E-07	1600	2.30E-07
	-1500	-2.1992E-07	1500	2.20E-07
	-1400	-2.0972E-07	1400	2.10E-07
	-1300	-1.9924E-07	1300	1.99E-07
	-1200	-1.8833E-07	1200	1.88E-07
	-1100	-1.7704E-07	1100	1.77E-07
	-1000	-1.6528E-07	1000	1.65E-07
	-1000	-1.6528E-07	1000	1.65E-07
	-900	-1.53E-07	900	1.53E-07
	-800	-1.401E-07	800	1.40E-07
	-700	-1.2652E-07	700	1.27E-07
	-600	-1.1217E-07	600	1.12E-07
	-500	-9.6903E-08	500	9.69E-08
	-400	-8.0552E-08	400	8.06E-08
	-300	-6.3013E-08	300	6.30E-08
	-200	-4.401E-08	200	4.40E-08
-100	-2.3242E-08	100	2.32E-08	
	0	0	0	0.00E+00
forward	100	4.39379E-08	100	4.39E-08
	200	7.58846E-08	200	7.59E-08
	300	1.02039E-07	300	1.02E-07
	400	1.24694E-07	400	1.25E-07
	500	1.44903E-07	500	1.45E-07
	600	1.63301E-07	600	1.63E-07
	700	1.80306E-07	700	1.80E-07
	800	1.96216E-07	800	1.96E-07
	900	2.11232E-07	900	2.11E-07
	1000	2.25471E-07	1000	2.25E-07
	1100	2.39047E-07	1100	2.39E-07
	1200	2.52042E-07	1200	2.52E-07
	1300	2.64522E-07	1300	2.65E-07
	1400	2.76536E-07	1400	2.77E-07
	1500	2.88135E-07	1500	2.88E-07
	1600	2.99358E-07	1600	2.99E-07
	1700	3.10249E-07	1700	3.10E-07
	1800	3.20828E-07	1800	3.21E-07
	1900	3.31122E-07	1900	3.31E-07
2000	3.4115E-07	2000	3.41E-07	

Tabla 7 Datos simulados de la presión y caudal con un rango de -2000 [Pas] a 2000 [Pas]

Asimismo, se obtienen las curvas de presión y caudal para ver si la diodicidad es mayor o menor y como se muestra en la figura 38 la diodicidad aumento significativamente.

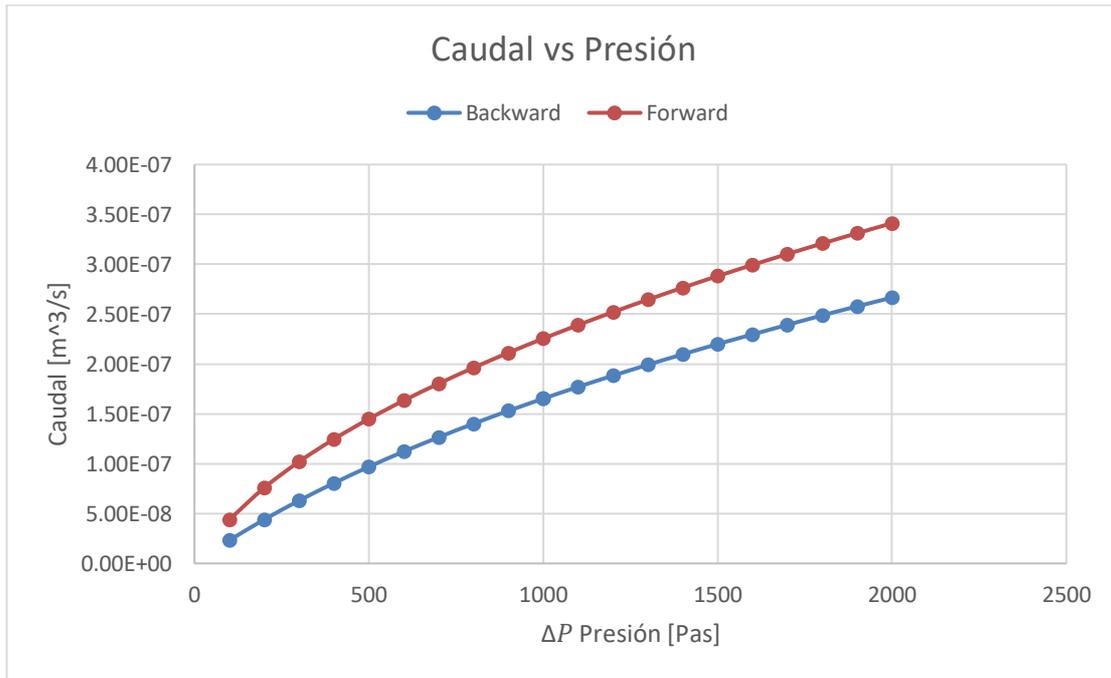


Figura 38 Curvas de presión vs caudal línea roja sentido forward línea azul sentido backward

Así pues, con un conjunto de datos más extensos se procede a calcular la diodicidad con la siguiente fórmula 5 para un rango de caudal entre 2 [ml/min] hasta a 15 [ml/min] aproximadamente.

$$Di = \left(\frac{\Delta pr}{\Delta pf}\right)Q \tag{ 5 }$$

Di es la diodicidad

Δpr es la caída de presión del flujo inverso

Δpf es la caída de presión de flujo directo

Q es el caudal

Caudal [ml/min]	diodicidad [-]
2.64	2
4.55	2

6.12	1.666666667
7.48	1.75
8.69	1.6
9.80	1.666666667
10.82	1.714285714
11.77	1.625
12.67	1.555555556
13.53	1.5
14.34	1.545454545
15.12	1.5
15.87	1.538461538

Tabla 8 Diodicidad y caudal de consol multiphysics

Como se puede observar en la figura 39 mientras más bajo sea el caudal la diodicidad aumenta hasta un valor de 2 es decir que las corrientes que circulan a velocidades inferiores a 4.55 ml/min si están bloqueando el fluido por la geometría de la válvula de tesla.

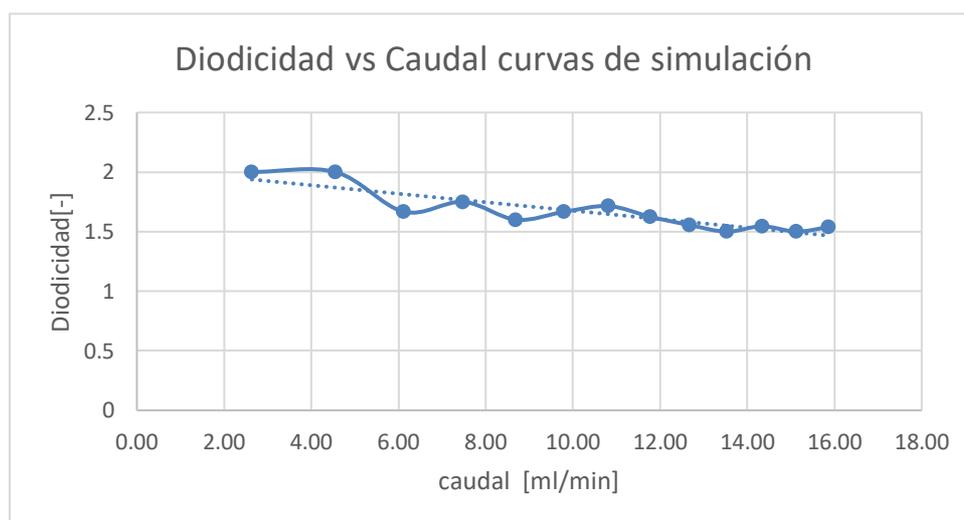


Figura 39 Curva de diodicidad vs caudal en un rango de 2 ml/min hasta 15 ml/min

Por último, para verificar que efectivamente la microválvula de tesla efectivamente funciona con caudales más bajos se procede a realizar una nueva simulación, pero ahora con caudales y presiones mucho más bajos de lo cual se obtienes la siguiente tabla 9.

Presion[pas]	caudal[m^3/s]	Presion[pas]	caudal[m^3/s]
-100	-2.3252E-08	100	2.32516E-08
-90	-2.1076E-08	90	2.10757E-08
-80	-1.8877E-08	80	1.88768E-08
-70	-1.6649E-08	70	1.66486E-08
-60	-1.4591E-08	60	1.45908E-08

-50	-1.2965E-08	50	1.29655E-08
-40	-1.1207E-08	40	1.12073E-08
-30	-9.2413E-09	30	9.24131E-09
-20	-6.968E-09	20	6.96803E-09
-10	-4.1662E-09	10	4.16618E-09
0	0	0	0
10	5.52445E-09	10	5.52445E-09
20	1.05932E-08	20	1.05932E-08
30	1.53754E-08	30	1.53754E-08
40	1.99299E-08	40	1.99299E-08
50	2.42971E-08	50	2.42971E-08
60	2.85008E-08	60	2.85008E-08
70	3.25585E-08	70	3.25585E-08
80	3.64801E-08	80	3.64801E-08
90	4.02767E-08	90	4.02767E-08
100	4.39379E-08	100	4.39379E-08

Tabla 9 Datos disimulación presión y caudal con de -100 [Pas] a 100 [Pas]

Como se puede diferenciar en el modo conductor efectivamente que, aunque tengan las mismas presiones el caudal es mucho mayor como se aprecia en la figura 40 y la diodicidad es alta con un valor como se puede observar en la tabla 10.

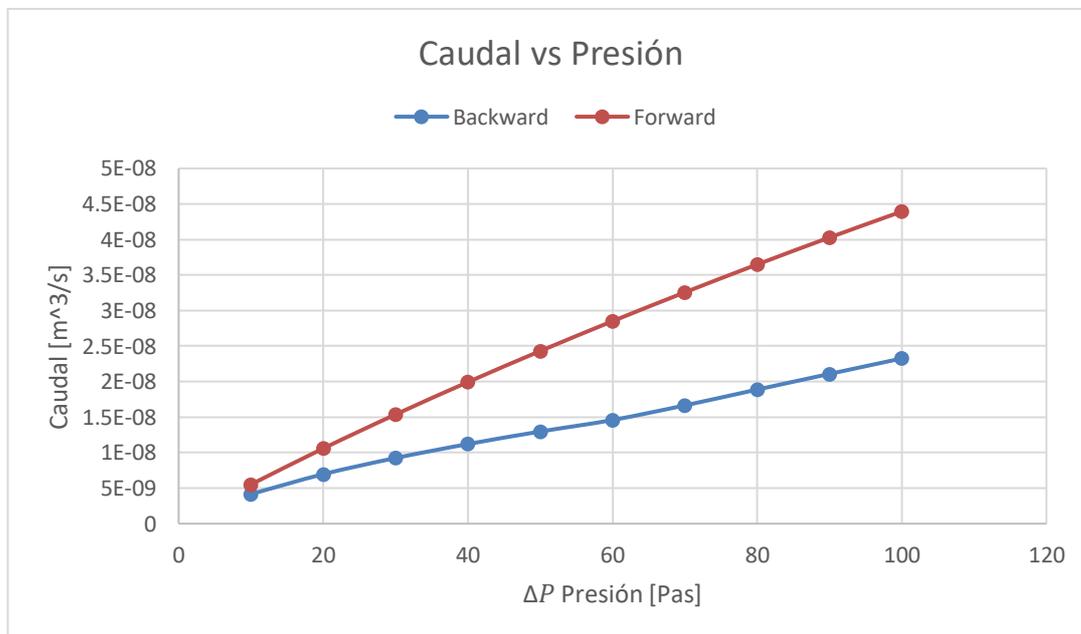


Figura 40 Curvas de presión vs caudal con presiones y caudal bajos

Diodicidad [-]	caudal[ml/min]
2	0.331467176

2	0.635589089
2	0.922526149

Tabla 10 Diodicidad a caudales bajos de 0.33 ml/min a 0.92 ml/min

En resumen, las simulaciones indican que en un rango menor de 0.33ml/min hasta 4.55 ml/min de caudal y presión la diodicidad es muy alta lo que quiere decir que el fluido es unidireccional en el sentido requerido y bloqueo en el otro.

5 MODELO DEL PROTOTIPO Y EXPERIMENTACIÓN

5.1 Introducción

En el siguiente capítulo se procede a imprimir los modelos óptimos en el software laminador “lychee slicer resin” de versión gratuita en la impresora 3D anycubic photon y se procede a evaluar los caudales y presiones entregadas por la bomba de jeringa autónoma microfluídica y el manómetro Digitron 2023P respectivamente claramente con valores similares obtenidos de la simulación realizada en Comsol Multiphysics.

Cabe recalcar que los propios fabricantes de resina ya tienen sus tiempos estimados para la impresión por lo cual se emplea el catálogo del fabricante para imprimir los primeros prototipos y se adapta los tiempos de exposición indicados, estos valores se pueden observar en la tabla 11, pero también está la opción de ver los valores de configuración de la impresora otorgadas por la comunidad de lychee slicer con esta consideración se procede a configurar todas las velocidades de la impresora y los tiempos de exposición que permitan crear el diseño más óptimo de microválvula de tesla.

Impresora 3D	Photon mono
Espesor de capa/mm	0.05[mm]
Tiempo de exposicion normal/s	2.5[s]
Tiempo de apagado/s	0.5[s]
Tiempo de exposición de la capa inferior/s	40[s]
Numero de capas en la parte inferior	6
Suavizado	1
Altura de elevación del eje Z/mm	6[mm]
Velocidad de elevación del eje Z mm/s	6[mm/s]
Velocidad de retracción del eje Z mm/s	4[mm/s]

Tabla 11 Parámetros de impresión del fabricante anycubic.

5.2 Software

5.2.1 Configuración de los parámetros de impresión en lychee Slicer.

- Selección del tipo de impresora

Para realizar el laminado en lychee slicer es necesario primeramente crear una cuenta en la página de Lychee slicer y después se procede a escoger el tipo de impresora que se va a utilizar en este caso el laboratorio cuenta con la impresora anycubic photon por lo cual se escoge esa opción, véase la figura 42.



Figura 41 Selección de la marca de la impresora en lychee slicer

- **Configuración del número de capas y velocidades de la impresora 3D**

Después de escoger el tipo de impresora se procede a colocar los parámetros recomendados por el fabricante en la operación de edit en la opción de edit se puede cambiar los parámetros de la impresora en 3D, así como los tiempos de exposición y las velocidades en el eje z como se muestra en la figura 43, además se puede anexar más impresoras con sus respectivos parámetros esto hace que el siguiente laminador sea flexible a la hora de trabajar.

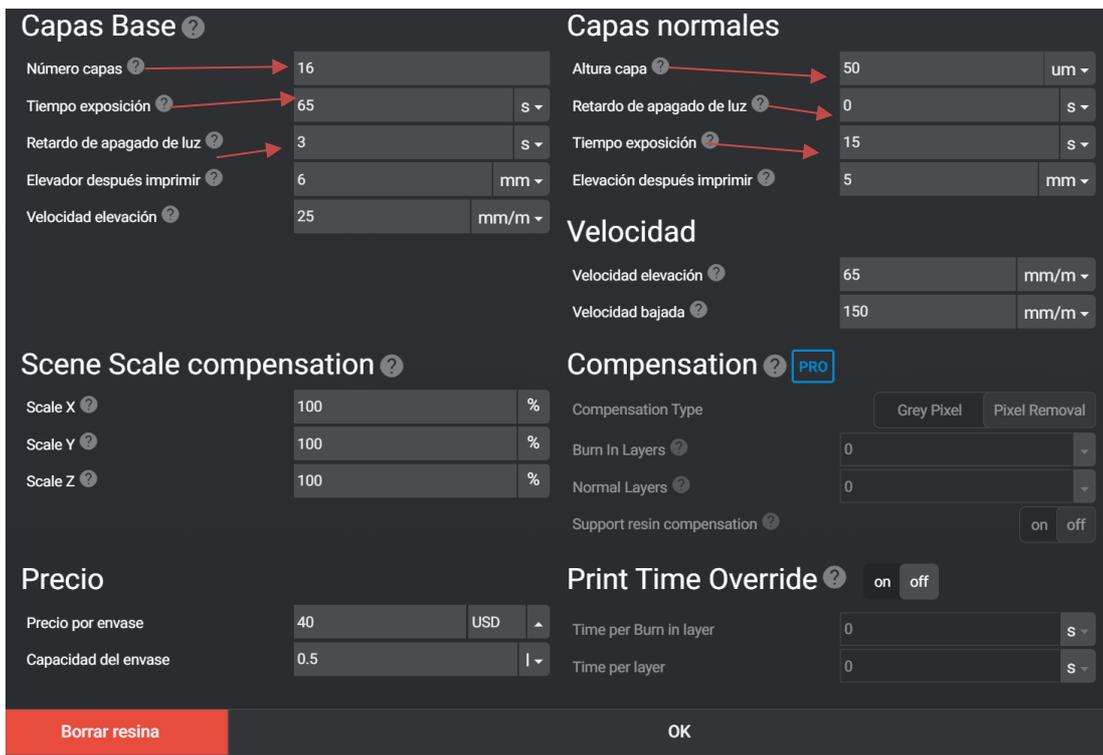


Figura 42 Capas base y capas normales en lychee slicer

- Importación de un archivo STL

Para poder trabajar con lychee 3D se debe primero importar un archivo en formato tipo STL véase la figura 44 el cual se generó del software CAD en este caso el archivo STL en el que se va a realizar las configuraciones tiene el nombre de TFM_Molina_Nelson v1.stl se debe siempre trabajar con archivos STL a la hora de imprimir ya sea en una impresora de filamento o de resina.

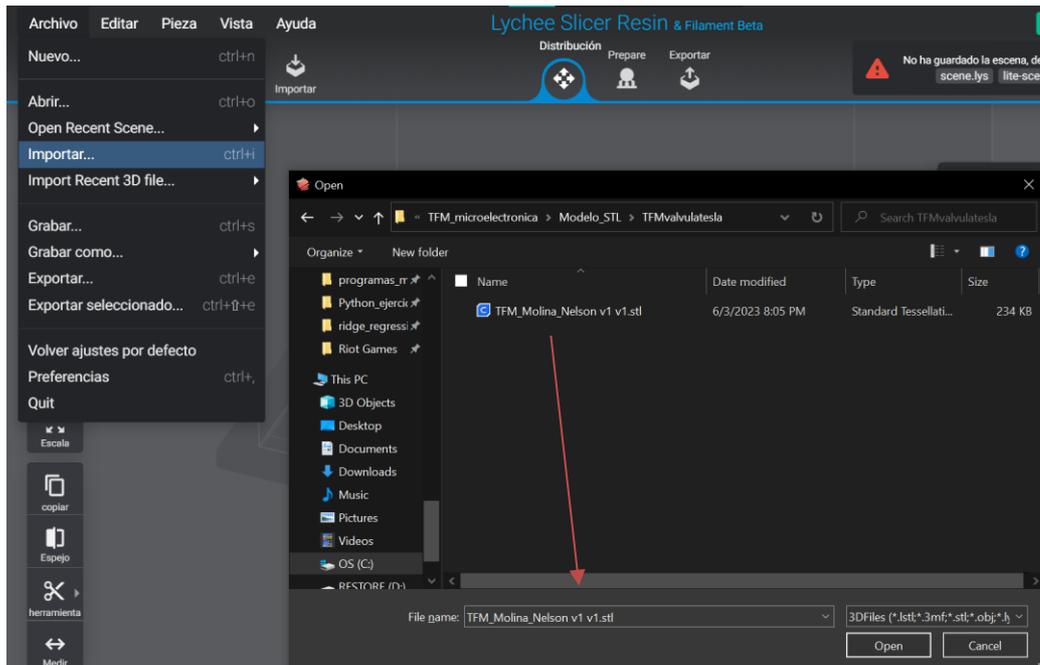


Figura 43 Importación fichero STL

- Entorno de trabajo

Lychee cuenta con las opciones standard de un laminador de 3D de impresión de PLA pero a diferencia de otros laminadores 3D, es versátil a la hora de trabajar con resina, después de importar el STL se cuentan con la opción de mover el objeto 3D a cualquier punto del área de trabajo, cuenta con escalamiento para poder aumentar o disminuir el tamaño de la pieza, cuenta con la opción de rotación para que la pieza pueda girar dependiendo de cómo se desee imprimir la pieza, otra función es la de copiar el modelo y la más interesante de lychee es la opción llamada magia la cual trata de optimizar la orientación y posición más óptimos para la impresión 3D.

De las opciones más importantes que tiene lychee es la detección de islas y reparar modelo como se muestra en la figura 45, pero debido a que el modelo tiene unidades milimétricas porque la aplicación es microfluídica la creación de soportes para islas no sería adecuado ya que estas podrían obstaculizar la canaleta a la hora de limpiar el modelo aparte que en este proyecto no se utilizó soportes ya que al ser de una altura de canaleta demasiado pequeña, aunque el software detecta islas en la canaleta a la hora de imprimir se deja pasar el warning de modo que se imprime la pared superior del techo de la microválvula de tesla.

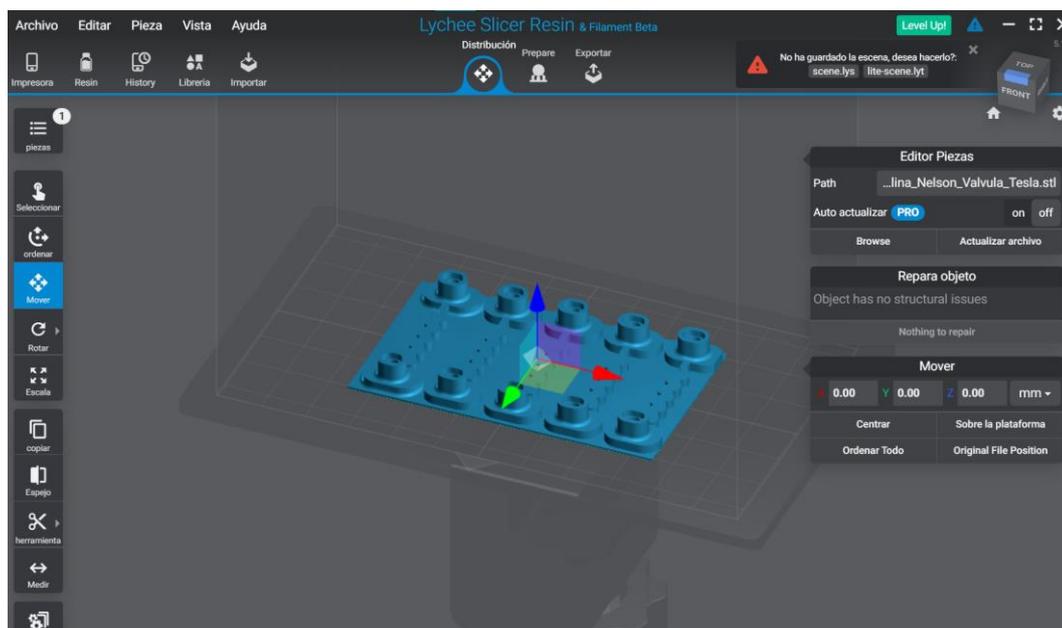


Figura 44 Posicionamiento de la pieza en la coordenada ($x = 0, y = 0, z = 0$)

- Configuración de la fase Prepare

En este caso como la microválvula de tesla tiene dos puertos de entrada y salida relativamente y no va a ser necesario el uso de soportes debido a que se manejan unidades micrométricas, no se realiza ninguna modificación en esta fase, por lo cual no se realizara la operación de vaciado que sirve para ahuecar el modelo porque en si la pieza si tiene por donde se pueda escapar la resina para el curado véase la figura 46.

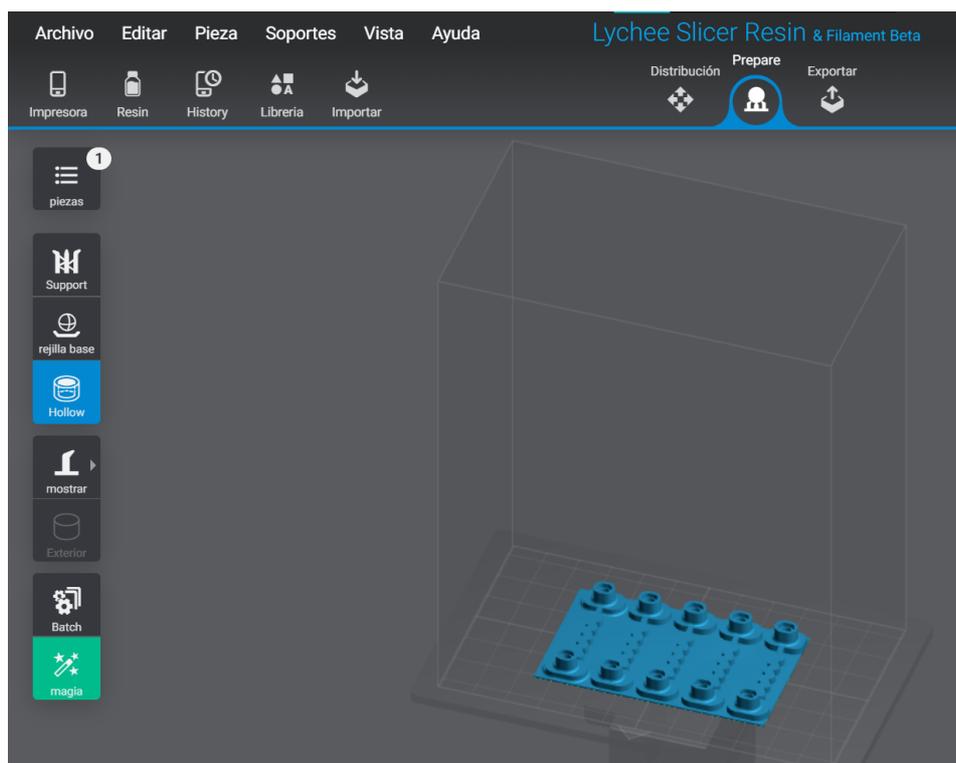


Figura 45 Relleno de la pieza al 100%

- Configuración por comunidad de lychee

En esta sección cabe recalcar que, aunque se utilizaron los parámetros indicados por el fabricante de anycubic photon se optó por utilizar la configuración de impresión con mejor recomendación de la comunidad de perfiles de resina de lychee para el tipo de resina anycubic de color gris como se puede ver en la siguiente figura 47.

Resolution	Time	Speed	Lift	Used by	Prints	Validated by	
50 um	8 s	65 mm/m	5 mm	100+ users	68% 10+ prints	2+ users	Details
50 um	8 s	65 mm/m	5 mm	1+ users	0% 0+ prints	1+ users	Details
35 um	15 s	65 mm/m	5 mm	1+ users	0% 0+ prints	Not approved by a user yet	Details
50 um	8 s	65 mm/m	5 mm	5+ users	42% 10+ prints	Not approved by a user yet	Details
45 um	10 s	65 mm/m	5 mm	1+ users	0% 0+ prints	Not approved by a user yet	Details

Figura 46 Comunidad de lychee slicer tipos de perfiles de resina

En este caso para un perfil de resina con resolución de capa de 50 [um] se utiliza la que tiene un porcentaje de aprobación del 68%

- Perfil de resina

El perfil de resina es el que se detalla a continuación véase la tabla 12, como es una resina de nivel estándar en las 4 primeras capas base de adherencia que son las que necesitan más tiempo para adherirse al platón de aluminio de la impresora conforme la pieza aumente de volumen el tiempo de exposición es de 70 seg es decir que en la formación de las primeras capas se tendrá un tiempo de $70 \text{ seg} * 4 = 280 \text{ seg}$ para formar la base inicial. El tiempo standard de retardo de apagado de luz es generalmente de 1 para la marca anycubic y cada vez que el plato de aluminio se sumerja en la resina se elevara una altura de 5mm en el eje Z para poder escurrir el exceso de resina del modelo también es una altura standard. La velocidad de elevación en las primeras capas es de 65 mm/min en concreto esta velocidad es la recorrida en la trayectoria de 5mm.

Después para las capas normales para mejorar el detalle se usa una resolucion de 30 um, el retardo de luz tiene un valor de 1seg el tiempo de exposicion de los rayos ultravioletas disminuye a un valor de 16 seg y la elevacion de la cama de aluminio igue siendo de 5 mm y como ya se sujeta bien las capas bases la velocidad de elevación es de 65 mm/min y la de bajada es de 150 mm/min con estos parametros configurados en la impresora anycubic se optimiza el tiempo de impresión ademas que se ahorra el material de la resina.

Capas base		Capas Normales	
Número capas	4	Altura de capa	0.03[mm]
Tiempo de exposicion	70 [s]	Retardo de apagado de luz	1[s]
Retardo de apagado de luz	1 [s]	Tiempo de exposición	16[s]
Elevador después de imprimir	5[mm]	Elevación después de imprimir	5[mm]
Velocidad de elevación	65[mm/min]	6	
Velocidad			
		Velocidad de elevación	65[mm/min]
		Velocidad de bajada	150[mm/min]

Tabla 12 Parámetros utilizados en la impresora anycubic photon

- Exportación del archivo photon

Finalmente, después de haber configurado correctamente todos los parámetros en lychee se procede a generar un archivo con la extensión “. photon” como se muestra en la figura 48, para el siguiente proyecto se utiliza el nombre de TFM_Molina_Nelson_Valvula_Tesla.photon de modo que se puede guardar en una unidad USB para proceder a conectarla a la impresora 3D de resina e imprimir el modelo.

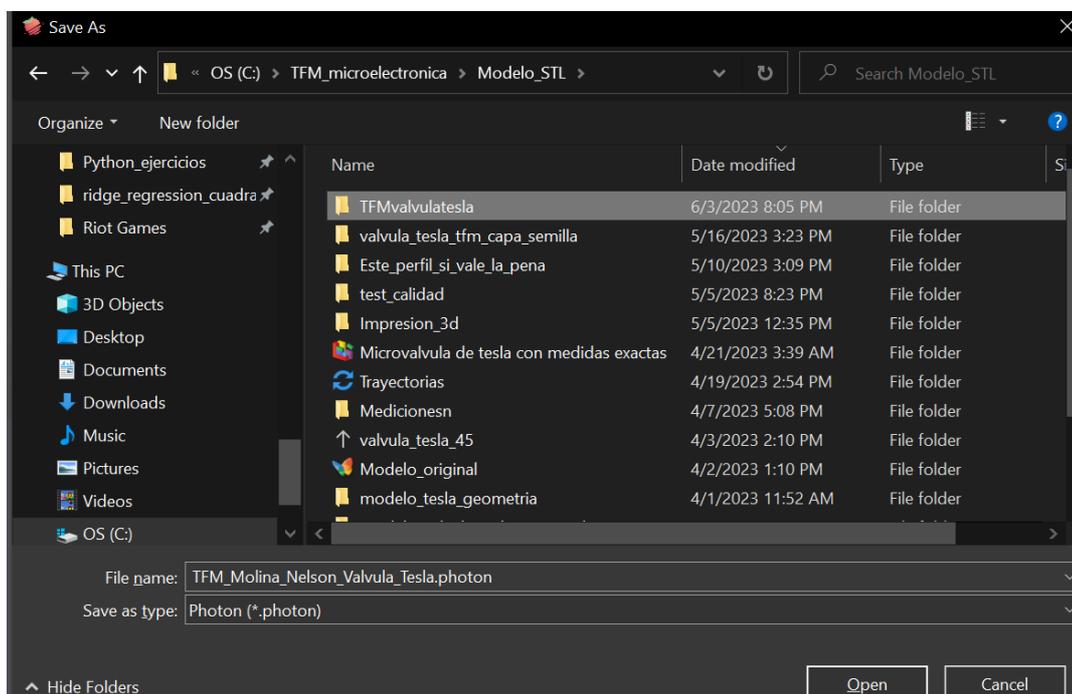


Figura 47 Exportación del modelo la unidad USB para lectura de la impresora

5.3 Experimentación con la microválvula de tesla

Una vez que ya se imprimió un modelo adecuado de válvula de tesla y el fluido no tiene ninguna fuga se procede a integrar las demás componentes del sistema microfluido dando como resultado un

sistema microfluídico con válvula de tesla véase la figura 49.



Figura 48 Sistema fluido total para el análisis de la microválvula de tesla

Se procede a escribir y analizar los datos generados en la tabla 13 por el sistema microfluídico en donde se coloca un caudal de 1 ml/min hasta 10 ml/min de modo que el caudal aumente paulatinamente y se lee las medidas del manómetro Digitron 2023p para analizar la presión y el caudal

	Caudal[ml/min]	Presion [mBar]	Presion [pas]	caudal [m ³ /s]
backward	10	271	27100	1.67E-07
	9	228	22800	1.50E-07
	8	187	18700	1.33E-07
	7	149	14900	1.17E-07
	6	123	12300	1.00E-07
	5	91	9100	8.33E-08
	4	64	6400	6.67E-08
	3	42	4200	5.00E-08
	2	23	2300	3.33E-08
	1	9	900	1.67E-08
	0	0	0	0.00E+00
forward	1	12	1200	1.67E-08
	2	30	3000	3.33E-08
	3	51	5100	5.00E-08
	4	72	7200	6.67E-08
	5	110	11000	8.33E-08
	6	143	14300	1.00E-07
	7	172	17200	1.17E-07
	8	201	20100	1.33E-07
	9	235	23500	1.50E-07
	10	300	30000	1.67E-07

Tabla 13 Datos reales de la presión y caudal generados por la microválvula

Los datos obtenidos de manera real nos permiten corroborar los datos simulados y se puede ver que se asemejan lo suficiente para validar la prueba.

Cuando se analiza la presión y el caudal se puede ver que conforme se aumenta el caudal la presión aumenta de manera exponencial como se muestra en la figura 50 lo que implica que en ciertos puntos hay perdidas de cargas más que en otras zonas

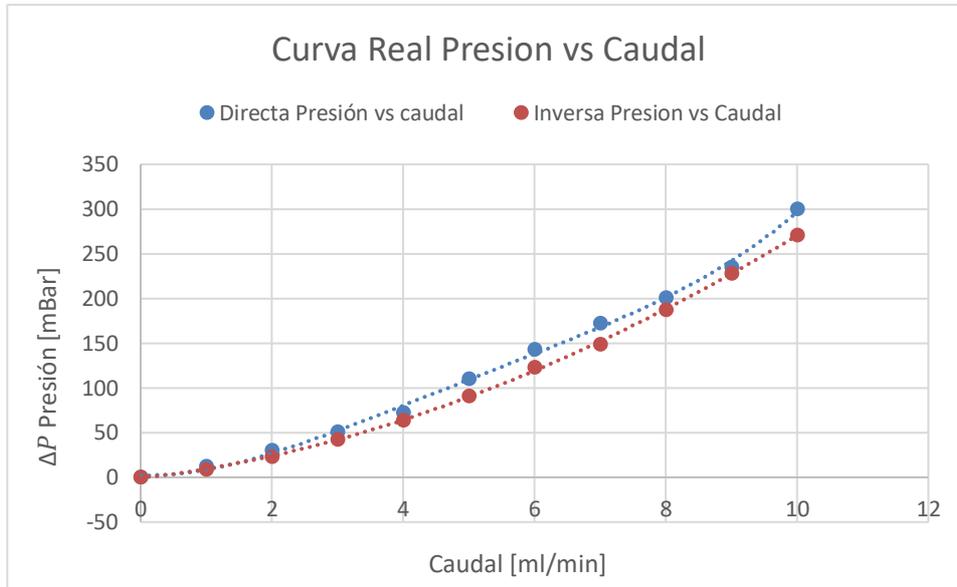


Figura 49 Curva Real de presión vs caudal en unidades de [mBar] y [ml/min]

Se procede a cambiar las unidades como se muestra en la figura 51 para trabajar con el sistema internacional

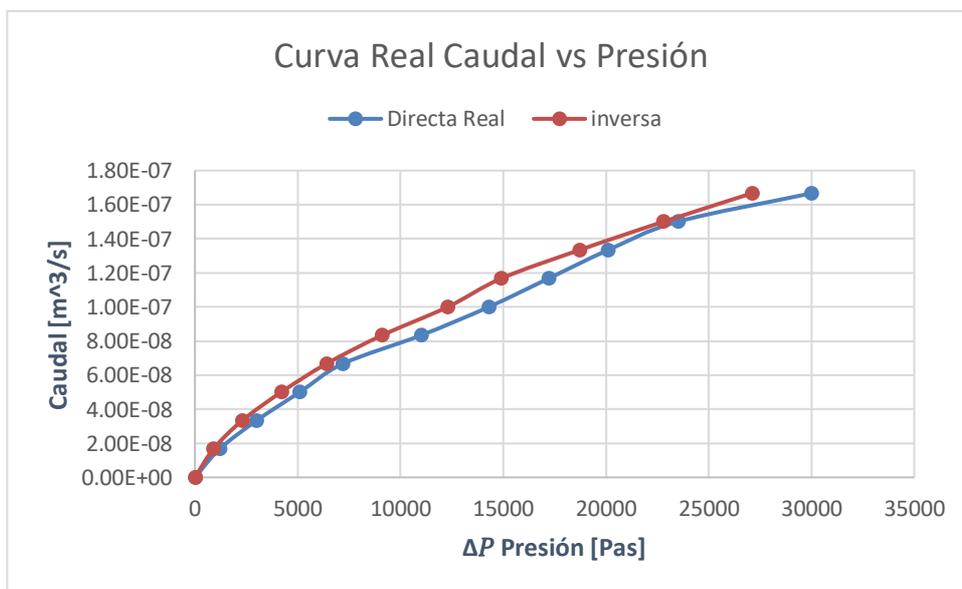


Figura 50 Datos reales de la presión vs caudal de la microválvula

A continuación, en la figura 52 la diodicidad vs Reynolds se puede entender que la diodicidad no puede tener valores mayores a 2 y que cuando su valor de diodicidad aumenta de manera lineal hasta aproximarse a 1 es una microválvula no tan eficiente ya que debería pasar el valor de 1 para considerarse eficiente, en el prototipo de microválvula de tesla que se realiza, la diodicidad con caudales bajos entre 1 ml/min a 10 ml/min a modo de que se generen 20 puntos con presiones positivas así como negativas véase la tabla 14.

caudal [ml/min]	caudal[m ³ /s]	Diodicidad [-]	Reynolds [-]
0	0.00E+00	0	0
1	1.67E-08	0.75	15.1242424
2	3.33E-08	0.766666667	30.2484848
3	5.00E-08	0.823529412	45.3727273
4	6.67E-08	0.888888889	60.4969697
5	8.33E-08	0.827272727	75.6212121
6	1.00E-07	0.86013986	90.7454545
7	1.17E-07	0.86627907	105.869697
8	1.33E-07	0.930348259	120.993939
9	1.50E-07	0.970212766	136.118182
10	1.67E-07	0.903333333	151.242424

Tabla 14 Diodicidad y numero de Reynolds del modelo físico de la microválvula

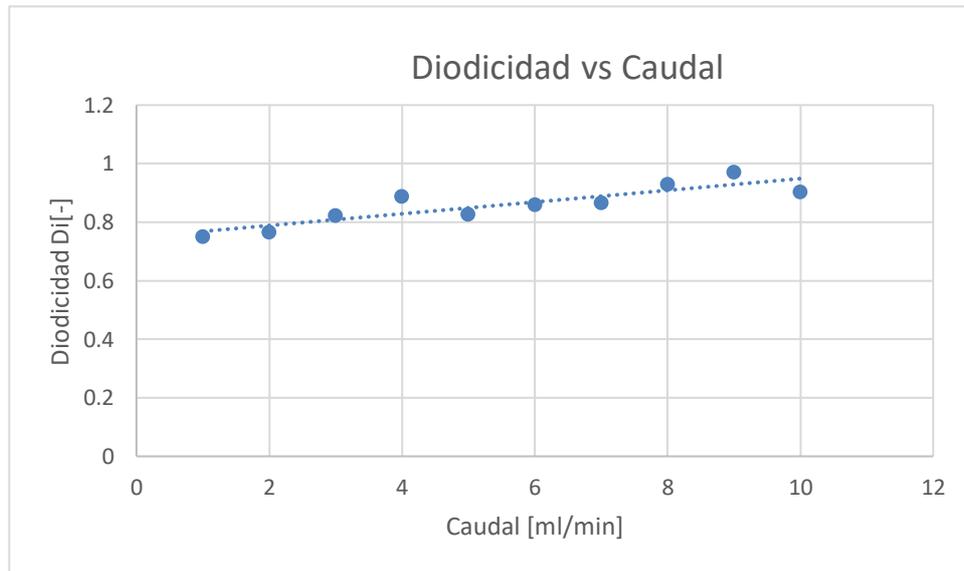


Figura 51 Diodicidad de la microválvula de tesla comparado con el número de Reynolds.

En resumen, en este apartado se determina el número de Reynolds y la diodicidad del dispositivo para verificar la eficiencia y relacionar los caudales con las presiones y caudales implicados, a modo de comparación se grafica las curvas de la simulación con las curvas reales y se obtiene la siguiente curva véase la figura 53 (Truong, 2003). Se puede apreciar que en la simulación la curva de color verde en modo directo la simulación nos dice que con mismos caudales la presión siempre será mayor en el modo directo que en el inverso curva de color violeta teniendo así el comportamiento de un diodo dejando pasar más presión de un lado en concreto, por otro caso se tiene la curva con datos reales de color azul y roja que nos indica igualmente que con mismos caudales

el modo conductor genera presiones mayores a las del modo inversor dejando en claro que en el modo conductor genera más presión y que para que el modo inversor iguale la presión de la curva del modo conductor se deberá inyectar más caudal en la bomba autónoma de jeringa lo que produce un consumo de energía mayor, finalmente cabe recalcar que en la simulación si se nota una gran diferencia en las presiones y caudales lo que significa la diodicidad es alta pero en la gráfica real la diodicidad se ve que la curva tanto en el modo directo como en el inversor se asemejan lo que produce que la diodicidad tiende a 1 lo cual quiere decir que tanto en el modo directo como en el inversor no hay mucha diferencia en la presión del modo conductor como inversor.

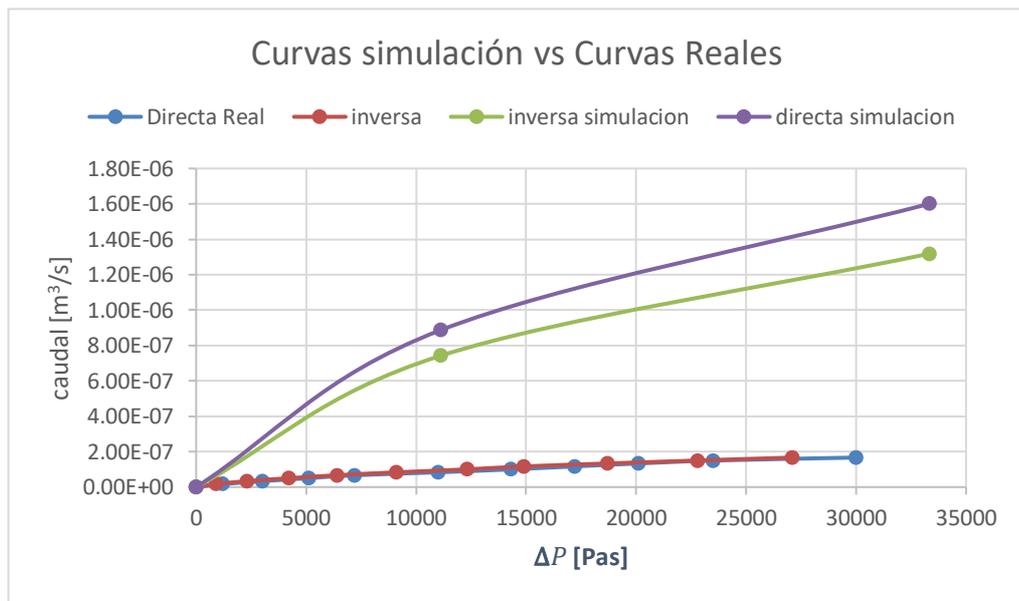


Figura 52 Curvas simuladas y reales de una microválvula de tesla fluidica

La comparación de las curvas de diodicidad de la simulación con la real se puede apreciar en la siguiente tabla 15

Datos Reales		Datos Simulacion	
caudal[ml/min]	diodicidad[-]	caudal[ml/min]	diodicidad[-]
1	1.333333333		
2	1.304347826		
3	1.214285714		
4	1.125	2.64	2
5	1.208791209	4.55	2
6	1.162601626	6.12	1.666666667
7	1.154362416	7.48	1.75
8	1.07486631	8.69	1.6
9	1.030701754	9.80	1.666666667
10	1.10701107	10.82	1.714285714

Tabla 15 curvas de diodicidad simulación vs real

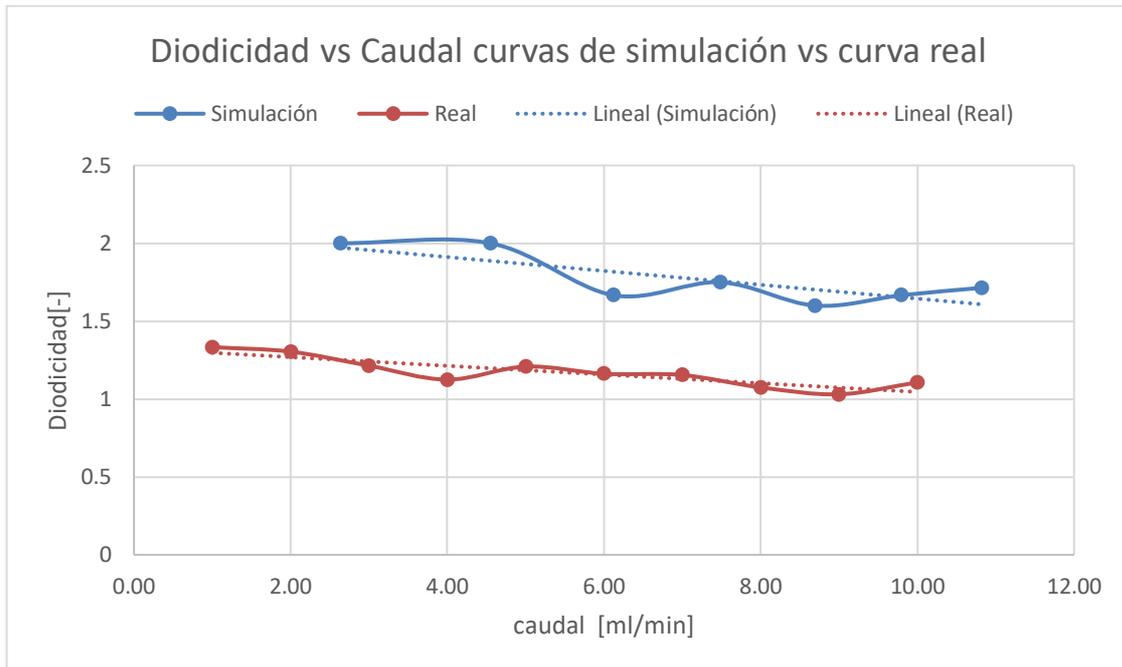


Figura 53 Diodicidad vs caudal comparación de datos de simulación vs Real

Finalmente se obtienen las curvas de diodicidad como se muestra en la figura 54 que nos indican que la microvalvula de tesla funciona de mejor forma tanto en la simulación como en los datos experimentales con caudales inferiores a los 4 ml/min y a presiones bajas de un rango de -400 [pas] a 200 [pas].

6 PRESUPUESTO

6.1 Introducción

En el siguiente apartado se detallan los gastos relativos del diseño e implementación de una microválvula de tesla para el laboratorio de microfluídica

6.2 Impresión por hora

En el ámbito de las impresiones el costo de impresión por hora depende del material a utilizar, el diseño esta realizado si no es así generalmente in ingeniero en mecánica cobraría 80 euros por hora en la creación del modelo CAD y del tipo de impresora que se está utilizando en este caso la impresión de resina, también conocida como impresión 3D de resinas es una metodología tecnológica en la cual se utiliza resinas líquidas fotosensibles a una fuente de luz ultravioleta en donde se procede a solidificar las capas de manera secuencial pasando desde un tiempo de exposición de capara base para que se adhiera el material hasta un tiempo de solidificación normal en donde se procede a acelerar la velocidad de impresión con el fin de crear objetos tridimensionales.

En general el costo del modelo STL depende de la velocidad de impresión y la cantidad de piezas producidas de una misma geometría en este caso se procede a crear un prototipo de microválvula de tesla pero hay otros factores que pueden variar el costo del modelo producido, tales como el tamaño y complejidad del modelo, la resolución también juega un papel importante a mayor resolución los detalles serán más precisos pero el tiempo será mucho mayor, la configuración de la impresión también es un factor intrínseco de la impresora debido a que el color o marca del tipo de resina que se utilice puede cambiar los parámetros de impresión lo cual a su vez afecta a la velocidad de exposición, la altura de capa y el número de capas iniciales que pueden influir en la calidad de la impresión. Otro factor para tener en cuenta es el tipo de resina debido a que cada resina tiene propiedades distintas se debe ajustar nuevos parámetros en la impresora para la solidificación del modelo en este caso se optó por la resina del propio fabricante de la impresora anycubic photon.

El modelo de la impresora y el tipo de tecnología que utilizan también pueden afectar en el tiempo de la impresión del modelo en este caso al tener una anycubic photon con tecnología DLP(procesamiento de luz digital) se tuvo que adaptarse a las velocidades características de la pantalla ultravioleta de la impresora y al ser una de las primeras impresoras de resina la anycubic photon al inicio la velocidad y le eficiencia era regular comparadas con las nuevas impresoras de la gama de las anycubic photon. Otro costo que se debe tener en cuenta es el postprocesamiento ya que como el prototipo de impresión tenía una tubería con la geometría de lagrimales de la válvula de tesla era necesario realizar un enjuago con alcohol isopropílico, además de darle un tiempo de curado y acabado lo cual influye en el tiempo total de la impresión.

En resumen, dependiendo de los detalles del modelo, el tipo de impresora, el tipo de resina y los otros factores mencionados anteriormente el costo de impresión por hora en la impresora anycubic de una resina de la empresa anycubic photon puede oscilar en un precio de 12.21 euros por hora el cual es un costo promedio para piezas con altos detalles como es el modelo de la microválvula de tesla.

6.3 Equipos y licencias.

A continuación, se describen los costes de los componentes necesarios, equipos y software(licencias) utilizados en la creación del sistema de microvalvula de tesla para el laboratorio de fluidifica.

Componente	Unidades	Precio Unidad (€)	Precio Total (€)
NE-1000 Bomba de jeringa autónoma Mangueras para microfluídica	1	280	280
Mangueras para microfluídica	2	16.15	52.3
CO2 SensorPlug	2	4	8
Pegamento epoxi de 2 elementos	1	10	10
Jeringuillas para microfluídica	1	2.17	2.17
Digitron 2023P	1	420.70	420.70
IPA (alcohol isopropílico)	1	6.69	6.69
Impresora Anycubic Photon	1	300	300
Resina anycubic photon gris	1	29.64	29.64
Guantes quirúrgicos	1	6.43	6.43
Anteojos de seguridad	1	10.49	10.49
Coste total del material			1126.42

Tabla 16 Presupuesto para materiales y equipos

Licencia	Unidades	Precio Unidad (€)	Precio Total (€)
Fusion 360	1	581	581
Comsol multiphysics	1	1381.37	1381.37
Lychee Slicer laminador 3D	1	0	0
Coste total del material			1962.37

Tabla 17 Presupuesto de licencias de los softwares empleados

A la hora de utilizar la licencia del respectivo software de Fusion 360 y Comsol multiphysics con sus respectivas licencias hay que recalcar que la Universidad de Sevilla entrega una licencia gratuita a los estudiantes por un año y el software lychee slicer para el laminado 3D es de versión gratuita

6.4 Presupuesto total.

Finalmente, como se ha revisado costos con anterioridad, el presupuesto desarrollado para el siguiente proyecto incluyendo los costes de diseño en CAD, licencias, equipos, materiales y mantenimiento de la impresora 3D se pueden apreciar en la siguiente Tabla 7

Descripción	Precio (€)
Coste diseño CAD	80
Coste de impresion por hora	12.21
Costes de materiales y equipo	1126.42
Coste de licencias	1962.37
Coste total	3181 (€)

Tabla 18 Coste total del proyecto

El presupuesto para el prototipo es de 3181 (€)

7 CONCLUSIONES

7.1 Conclusiones

- Se logro diseñar y realizar el prototipo de una microválvula de tesla a partir del diseño Teardrop Design con tapadera incluida, desde la creación del bosquejo en fusión 360, después el análisis de la cinemática en consol Multithysics y para después realizar el prototipado en impresión 3D mediante resina líquida utilizando un laminador de versión gratuita.
- El principal problema a la hora de crear microcircuitos fluídicos en impresión 3D es la resolución que tiene el equipo de impresión 3D y el tipo que geometría de los canales interiores del dispositivo, en este caso al ser el principal material la resina se tiene un margen de error que pueden variar en cientos de micrómetros por lo que se tiene que aumentar las dimensiones del canal y el tiempo de exposición de la resina debe ser el adecuado para que la resina que se quede líquida dentro del canal sea fácil de limpiar pero a su vez permite crear las microestructuras cerradas de una microválvula de tesla.

Las curvas de diodicidad de la simulación realizada en consol multiphysics como con los datos experimentales se asemejan, pero con diferentes escalas debido a que en la simulación no se tiene en cuenta las pérdidas de presión y caudal que se generan debido a que el microsistema de la microválvula de tesla tiene tuberías adaptadas en el circuito de modo que la curva real es mucho más pequeña que la simulada.

- La eficiencia que muestra el siguiente proyecto a pesar de que en las simulaciones la eficiencia llego hasta un valor de 2 cuando se calculó la diodicidad del dispositivo microfluídico real para caudales entre 1 ml hasta 10 ml generado por la bomba de jeringas automática la eficiencia no es muy alta debido a que la diodicidad siempre tendía al valor de 1 lo que significa que no se están generando las turbulencias dentro de la trayectoria que permite el bloqueo del fluido de la microválvula de tesla por lo cual el fluido se está comportando con régimen de flujo laminar y por ende la diodicidad generada no es muy alta para los caudales que superan los valores de 4 ml/min, cabe recalcar que la microválvula funciona para caudales diminutos entre un valor de 0.33ml/min hasta 4.55ml/min y para finalizar las curvas de diodicidad corresponden a una válvula de tesla por su forma exponencial caso contrario si solo hubiera sido un perfil circular sin ninguna resistencia en serie.

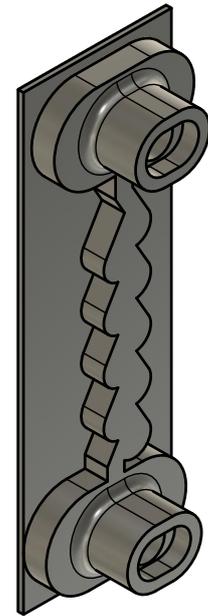
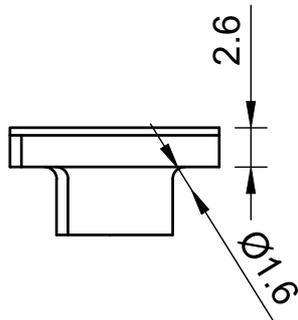
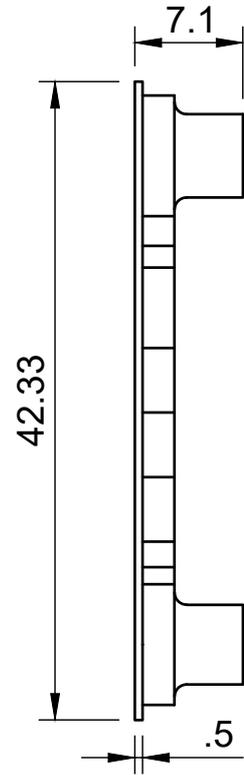
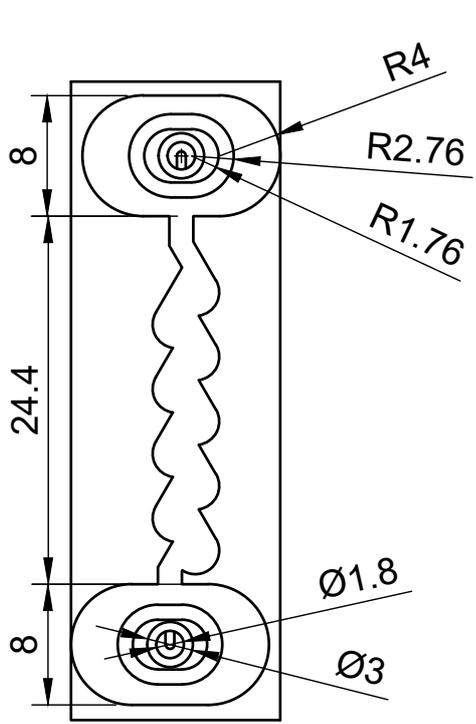
7.2 Trabajos futuros

Se logro cumplir con los requerimientos del dispositivo de microválvula de tesla de modo que se generó la curva característica de un diodo de tal forma que el material usado en este caso resina gris anycubic photon para este prototipo cumplió con las condiciones del equipo que genera caudales de modo que este dispositivo se lo puede utilizar en aplicaciones donde no se tengan que ver implicadas fluidos biológicos, para que este dispositivo se pueda utilizar en campos biomédicos se necesita utilizar una resina biocompatible especializada principalmente en campos de odontología de modo que se necesita experimentar nuevamente con los tiempos de exposición para el nuevo prototipo sin alterar el diseño original. Además, se puede intentar mejorar la dimensión del canal de la tubería reduciendo su forma de modo que se pueda estudiar el comportamiento del fluido con tuberías más estrechas y así este dispositivo puede ser integrado en dispositivos de microfluídica para el laboratorio de microsistemas y nanotecnología.

REFERENCIAS

- autodesk.* (s.f.). (Autodesk Inc) Recuperado el 15 de Febrero de 2023, de <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
- auxilab.* (23 de agosto de 2023). *auxilab.* Obtenido de *auxilab*: <https://www.auxilab.es/es/productos-laboratorio/tubo-tygon-nd-100-65-uso-medico-d-1-60-0-07x3-20-0-12-grosor-0-80mm/>
- Cardona, C. a. (2022). CFD ANALYSIS OF THE HEAD LOSS ON A T45-R TESLA VALVE. *Anales AFA*, 26-30.
- Frijns, S. { . (2017). Design and operation of a Tesla-type valve for pulsating heat pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1-11.
- Gamboa, A. a. (2004). Is There a Best Fixed-Geometry Valve for Micropumps? *American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FED*.
- Li, K. a. (2022). *Diodicity Optimization of Tesla-Type Check Valve Based on Surrogate Modeling Techniques.* Tan, Jianrong.
- Lyche Slicer.* (s.f.). (Mango3D) Recuperado el 10 de marzo de 2023, de <https://mango3d.io/>
- Mayo Capella, J. (2023). Dispositivos microfluídicos impresos en 3D: un enfoque alternativo para una variedad de aplicaciones.
- Nguyen, Q. a. (2021). Early turbulence and pulsatile flows enhance diodicity of Tesla's macrofluidic valve. *Nature Communications*.
- Purwidyantri, A. a. (2023). Tesla Valve Microfluidics: The Rise of Forgotten Technology. *Chemosensors*, 256. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2227-9040/11/4/256>
- tehnologies, m.* (23 de agosto de 2023). *micrus tehcnologies.* Recuperado el 23 de agosto de 2023, de <https://www.micruxfluidic.com/es/tienda/instrumentacion/sistemas-de-bombeo/?p=all>
- Truong, T. a.-T. (2003). Simulation and optimization of Tesla valves.
- Wang, J. a. (2022). Tesla Valve-Based Flexible Microhybrid Chip with Unidirectional Flow Properties. *ACS Omega*, 31744-31755.

PLANOS



Material	Peso	autor	profesor
Resina	4.7 gr	Nelson Molina	José Quero
Metodo de proyección	fecha	universidad	
	1/09/2023	ETSI	
	título	N ° Plano	
	Microválvula de tesla en impresión 3D	1/1	
	Idioma	Firma	escala
	es		2:1

ANEXOS

Anexo I. Manual de Dispositivos.

2000P Series

Easy to operate, reliable and robust the 2000P Series Pressure instruments surpass the performance and cost demands of today's **industrial & HVAC markets**. Combining innovative functions with high accuracy and speed of response they are designed to make the operator's job simple and efficient.

The 2000P Series offers twin input for differential or gauge measurement with pressure ranges from 25mbar to 10bar. All instruments are dust and waterproof as standard (IP67) and optional coloured rubber boots are available adding protection and style to these multifunctional pressure instruments.

General Specification

Operating Temperature:	0°C to +50°C/+14°F to +122°F (ambient)
Battery Type:	Two AA or equivalent cells (not supplied)
Battery Life:	Typically 200 hours
Low Battery Check:	Symbol appears on display
Display:	12.7mm / 0.5" custom L.C.D.
Over range/Under range:	'Out' displayed
Environmental Specifications:	IP67 as standard with hose connected
Auto Switch-Off Time:	12 minutes
Dimensions:	155 x 67 x 40mm/6.1 x 2.6 x 1.6"
Weight:	180g/6.4oz
2000P Series Instrument Accuracies (except 2020P7):	+20 to +50°C: 0.10% of RDG +0.10% of F.S + 1 LSD -10 to +20°C: 0.15% of RDG +0.15% of F.S + 1 LSD
2020P7 Accuracy:	+20 to +50°C: 0.20% of RDG +0.20% of F.S + 1 LSD -10 to +20°C: 0.5% of RDG +0.5% of F.S + 1 LSD



2020P Model

For other options, please contact us digitronsales@rototherm.co.uk or +44 (0)1656 740551

Key Features and Benefits

- Pressure ranges from 25mbar to 10bar
- Positive and negative (vacuum) pressure measurement
- Auto ranging displays – for precise readings
- Selectable auto switch-off – saves on operation cost and battery life
- IP67 BSI Cert 229/000132 – Dust and waterproof for added protection
- Selectable pressure units: psi, mbar, inH₂O, mmH₂O, mmHg, inHg, Pa

Optional Extras

- Protective Rubber Boot
- 6mm Nylon Tubing and 'T' Piece
- Carry Case
- Calibration Certificate

Main Applications

A **world leader** in digital pressure instruments, Rototherm has become the standard for accurate and reliable measurement across the following industries:



Industrial & Domestic
HVAC



Laboratories & Clean
Rooms



Service, Maintenance
& Calibration

NE-1010 Programmable Single Syringe Pump \$830

Continuous Infusion High
Pressure Syringe Pump System

DUAL-NE-1010: \$1670

OEM High Pressure Syringe Pump

NE-510: \$535

OEM High Pressure Syringe Pump w/Encoder

NE-511: \$590



NE-1000 Family of Syringe Pumps

- ***Built For Automation*** -

NE-1010- Features

Accepts 1 syringe from the smallest size available up to 60 mL. A 140 mL syringe can be filled up to 120mL. NE-1010 pumping rate as low as 1.459 μ L/hr with a 1 mL syringe or as high as 127.2 mL/min with a 60 mL syringe and 208.3 mL/min with a 140 mL syringe. For more information on the OEM versions refer to the NE-500 brochure. For more information on the Continuous Infusion version refer to the DUAL-NE-1000 brochure.

The NE-1000 Family of Syringe Pumps Features

- Built for Automation
- Operates stand-alone or from a computer
- Infuses and withdraws
- Applications range from simple infusions to complex pumping programs
- Programmable preset protocols
- Program up to 41 pumping phases that change pumping rates, set dispensing volumes, insert pauses, control and respond to external signals, sound the buzzer
- RS-232 and TTL logic control interfaces

****Not For Clinical Use On Humans****

NEW ERA
Pump Systems Inc.
SyringePump.com

SyringePump.com
Clever Pumps, Priced Right!

New Era Pump Systems, Inc.
138 Toledo St. • Farmingdale, NY 11735 • 631-249-1392



Specifications

Mechanical & Electrical

Syringe sizes:	Up to 60 cc
Number of syringes:	1
Motor type:	Step motor
Motor steps per revolution:	200
Motor to drive screw ratio:	15/28
Drive screw pitch:	20 revolutions/”
DC connector:	2.5 mm, center positive
Voltage at DC connector:	12V DC at full load
Amperage:	1000 mA at full load
Power supply type:	Unregulated linear external wall adapter, country and power source specific
Power supply output rating:	12V DC @ 1000 mA
Dimensions:	8 3/4” x 5 3/4” x 4 1/2” High (22.86 cm x 14.605 cm x 11.43 cm)
Weight:	3.8 lbs. (1.63 kg)
Allen Wrench	3/32 Hex

Operational

Maximum speed:	18.36964 cm/min
Minimum speed:	0.008409 cm/hr
Maximum pumping rate:	6120 mL/hr with a B-D 60 cc syringe
Minimum pumping rate:	1.459 µL/hr with a B-D 1 cc syringe
Maximum force:	100 lbs. at minimum speed, 18 lbs. at maximum speed
Number of Program Phases:	41
RS-232 pump network:	100 pumps maximum
RS-232 selectable baud rates:	300, 1200, 2400, 9600, 19200
Syringe inside diameter range:	0.100 to 50.00 mm



3. Technical Specification

Printing

System	ANYCUBIC Photon
Operation	2.8-inch Color TFT Screen
Software	ANYCUBIC Photon Slicer
Connectivity	USB memory stick

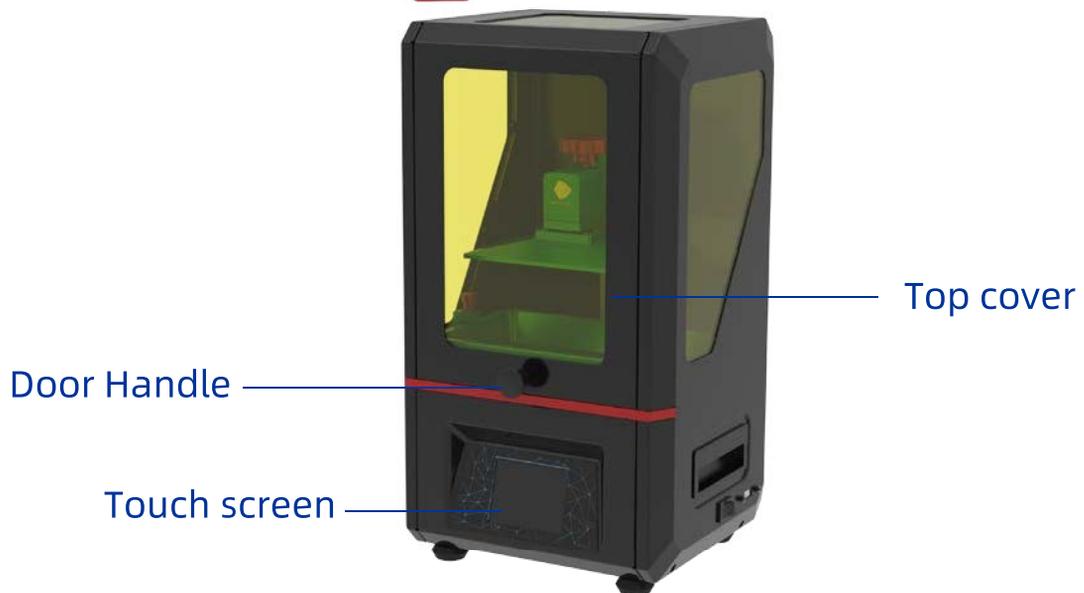
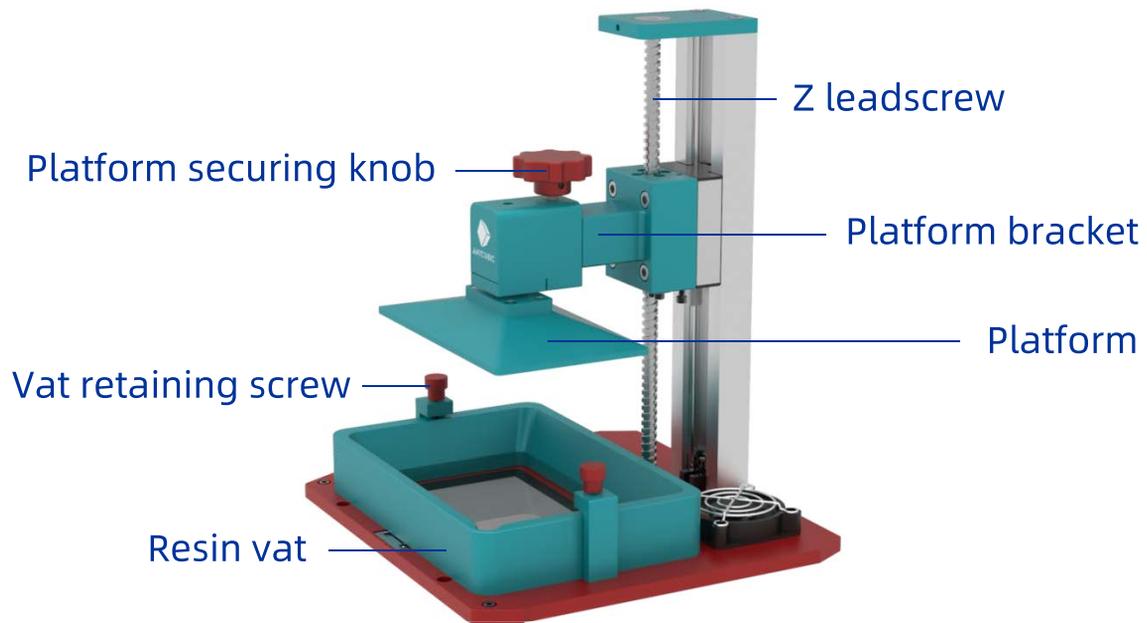
Specifications

Technique	LCD Shadow Masking
Light source	UV-LED (wavelength 405nm)
XY Resolution	0.047mm (2560*1440)
Z axis Accuracy	0.00125mm
Suggested Layer Thickness	0.01 ~ 0.2mm
Suggested Print Speed	20mm/h
Rated power	40W

Physical Dimensions

Dimension	220mm (L) *200mm (W) *400mm (H)
Build volume	115mm (L) *65mm (W) *155mm (H)
Materials	405nm UV-resin
Net weight	~6.6kg

4. Product Overview

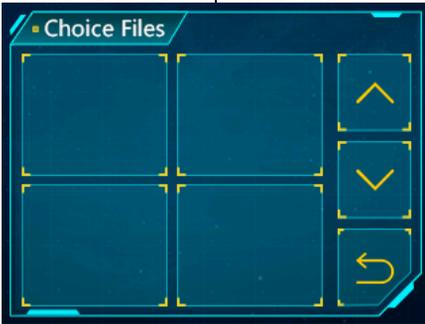


5. Menu Directory

Home menu



Print



System



Tools



Home menu



Enter the Print Menu

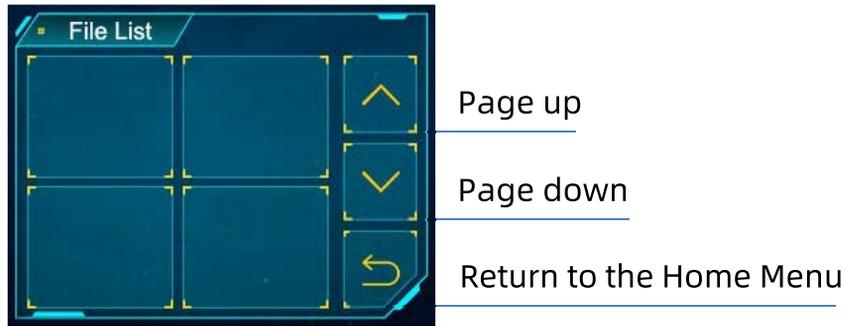
Enter the System Menu

Enter the Tools Menu

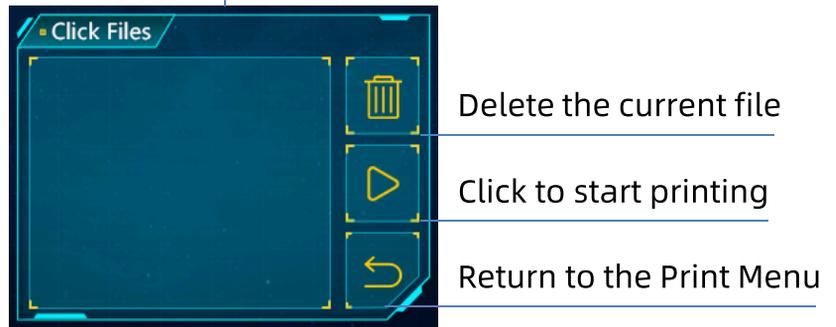
5. Menu Directory

Print

File List:



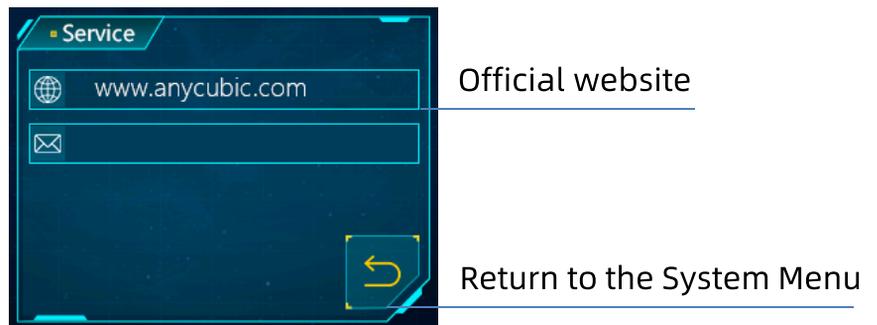
Click Files



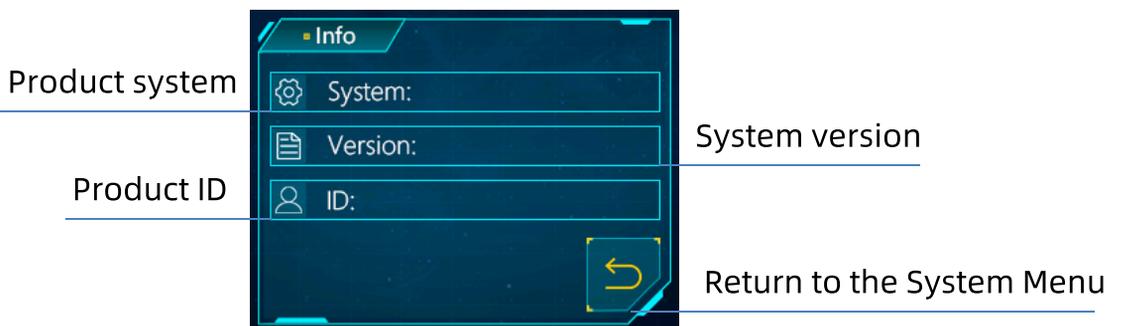
System

Language: Change language(English/Chinese)

Service:



Information:



5. Menu Directory

Tools

Move Z:



Move Z by 0.1mm/1mm/10mm

Move the Z axis upwards

Return to Zero

Stop moving the Z axis

Return to the Tools Menu

Move the Z axis downwards

Detection:



Select one of the images to detect

Click to set the test time

Reduce the test time

Test LED and LCD for the preset time

Return to the Tools Menu

Increase the test time

Z=0: Reset the zero point