



Diseño y construcción de un prototipo de sistema de recirculación de fluidos a través de estructuras porosas tridimensionales para el análisis de flujo laminar mediante visión artificial.

Lascano Nuñez, Joshua Vinicio y Navas Navas, Miguel Esteban

Departamento de Ciencias De La Energía Y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de ingeniero en mecatrónica

Ing. Lara Padilla, Hernán Vinicio Ph.D

Latacunga

19 de marzo del 2021



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE FLUIDOS A TRAVÉS DE ESTRUCTURAS POROSAS TRIDIMENSIONALES PARA EL ANÁLISIS DE FLUJO LAMINAR MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL**”, fue realizado por los señores **Lascano Nuñez, Joshua Vinicio y Navas Navas, Miguel Esteban**, el cual ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 19 de marzo del 2021



Firmado electrónicamente por:
**HERNÁN
VINICIO LARA
PADILLA**

Ph.D Lara Padilla, Hernán Vinicio

C.C.: 0603247362

Reporte Urkund



Document Information

Analyzed document	Trabajo de titulación - (LASCANO NUÑEZ, JOSHUA VINICIO, NAVAS NAVAS, MIGUEL ESTEBAN).pdf (D98944374)
Submitted	3/19/2021 4:41:00 PM
Submitted by	
Submitter email	hvlara@espe.edu.ec
Similarity	2%
Analysis address	hvlara.espe@analysis.urkund.com

Sources included in the report

W	URL: https://www.motovario.com/spa/solutions/bombas-peristalticas?fbclid=IwAR1n7O69lk3L... Fetched: 3/19/2021 7:31:00 PM		2
W	URL: https://www.quiminet.com/articulos/que-son-las-bombas-peristalticas-32689.htm?fbcl... Fetched: 3/19/2021 7:31:00 PM		2
W	URL: http://laplace.us.es/wiki/index.php/Fuerzas_de_rozamiento_(GIE) Fetched: 3/19/2021 7:31:00 PM		2
W	URL: https://www.mundomicroscopio.com/microscopio-digital/ Fetched: 3/19/2021 7:31:00 PM		2
W	URL: https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/ Fetched: 3/19/2021 7:31:00 PM		1
W	URL: https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/ Fetched: 3/19/2021 7:31:00 PM		1
W	URL: https://avelectronics.cc/producto/pantalla-nextion-5/ Fetched: 3/19/2021 7:31:00 PM		4
W	URL: https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2016/12/11/que-es-arduino-2/ Fetched: 3/19/2021 7:31:00 PM		1
SA	1613879760_Diseño_de_Sistema_de_Control_Gonzalez_y_Ruiz_FINAL.pdf Document 1613879760_Diseño_de_Sistema_de_Control_Gonzalez_y_Ruiz_FINAL.pdf (D96130308)		1
W	URL: https://baixardoc.com/documents/xii-congreso-nacional-de-ingenieria-electrica-y--5... Fetched: 12/22/2020 9:37:12 PM		1
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Tesis-Carrillo-Naveda.pdf Document Tesis-Carrillo-Naveda.pdf (D82437640) Submitted by: hvlara@espe.edu.ec Receiver: hvlara.espe@analysis.urkund.com		1





DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, los señores **Lascano Nuñez, Joshua Vinicio** con cédula de ciudadanía N° 1804704417 y **Navas Navas, Miguel Esteban** con cédula de ciudadanía N°0503912610, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE FLUIDOS A TRAVÉS DE ESTRUCTURAS POROSAS TRIDIMENSIONALES PARA EL ANÁLISIS DE FLUJO LAMINAR MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL”**, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas. Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, 19 de marzo del 2021

Lascano Nuñez, Joshua Vinicio

C.C.: 1804704417

Navas Navas, Miguel Esteban

C.C.: 0503912610



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, los señores **Lascano Nuñez, Joshua Vinicio** con cédula de ciudadanía N° 1804704417 y **Navas Navas, Miguel Esteban** con cédula de ciudadanía N°0503912610, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE FLUIDOS A TRAVÉS DE ESTRUCTURAS POROSAS TRIDIMENSIONALES PARA EL ANÁLISIS DE FLUJO LAMINAR MEDIANTE VISIÓN ARTIFICIAL**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 19 de marzo del 2021

Lascano Nuñez, Joshua Vinicio

C.C.: 1804704417

Navas Navas, Miguel Esteban

C.C.: 0503912610

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mis padres Vinicio y Lady quienes con su esfuerzo y dedicación han forjado la persona que soy hoy y seré, en un futuro. A mi hermana Rebeca quien supo ser mi fuerte desde pequeño y será mi fortaleza a lo largo de mi vida, a mi novia Vanessa quien fue mi apoyo a lo largo de mi carrera universitaria. A todos mis amigos que fueron parte fundamental para culminar esta etapa de estudios.

Joshua

Este trabajo de titulación va dedicado especialmente a mi madre Anita Navas, quién sin importar las circunstancias, ni las adversidades del camino, luchó hasta la culminación de esta meta, que sé, que le llenará de orgullo y felicidad, y quién sin duda fue el apoyo más firme durante mi vida universitaria. A mi hermana Caro, que poco a poco fue entendiendo mi pasión y gusto por mi carrera, dándome ánimo y aliento en cada meta que cumplía. A todos mis compañeros y amigos, que entre risas y malas noches logramos acabar cada proyecto propuesto. En fin, a todos aquellos que de alguna manera aportaron sabiduría y constancia en mí, durante toda mi vida universitaria.

Esteban

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios, por habernos dado la vida y la sabiduría para finalizar esta etapa de nuestras vidas. A nuestros padres, por ser el pilar sobre el cual nos apoyamos cada día, gracias por su tiempo y dedicación logramos culminar nuestros estudios universitarios.

A nuestras hermanas, que con su apoyo y tenacidad lograron inculcarnos valores de superación, dándonos su ejemplo en nuestras vidas.

A los docentes que nos acompañaron en el desarrollo de este trabajo de titulación, en especial a la Ing. Nathaly Rea y al Ing. Hernán Lara, quienes nos encaminaron y apoyaron hasta el final de la meta.

Tabla de contenidos

Carátula.....	1
Certificación.....	2
Reporte Urkund	3
Autoría de responsabilidad	4
Autorización.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento	7
Tabla de contenidos.....	8
Índice de tablas	13
Índice de figuras.....	15
Índice de ecuaciones	18
Resumen	20
Abstract.....	21
Marco metodológico de la investigación.....	22
Introducción	22
Antecedentes	22
Planteamiento del problema	24
Descripción resumida del proyecto.....	25
Justificación e importancia	27
Objetivos	28
<i>Objetivo general</i>	<i>28</i>

<i>Objetivos específicos</i>	29
Hipótesis.....	29
Fundamentación e investigación teórica.....	30
Introducción	30
Prototipo de sistema de recirculación de fluidos	30
Bombas peristálticas	31
<i>Desplazamiento de la bomba</i>	32
<i>Principio de funcionamiento</i>	32
<i>Tipos de bomba peristáltica</i>	33
<i>Principales componentes de la bomba peristáltica</i>	33
<i>Características de las bombas peristálticas de baja presión</i>	34
<i>Efecto de cavitación</i>	35
<i>Características de bombas peristálticas positivas</i>	35
Caudal de la bomba.....	35
Potencia de la bomba.....	36
Rendimiento hidráulico.....	37
Gasto de caudal.....	37
Resistencia a la rodadura	37
Estructuras mínimas triplemente periódicas (tpms)	39
<i>Diseño de poros de una estructura tpms</i>	40
Superficies de nivel.....	40

Combinación de superficies implícitas	43
Variación de la arquitectura del giroide.....	44
Porosidad, tamaño de poro y tamaño de soporte.....	45
Visión artificial	46
<i>Procesamiento digital de imágenes.....</i>	<i>47</i>
<i>Software imagej (fiji)</i>	<i>48</i>
Microscopio digital	48
<i>Aumento del microscopio digital</i>	<i>49</i>
Impresión 3d.....	49
<i>¿Para qué se usa la impresión 3d?.....</i>	<i>50</i>
<i>Técnicas empleadas en la impresión 3d</i>	<i>50</i>
Fdm	51
Sla (estereolitografía).....	51
Sistema electrónico	52
<i>Pantalla nextion.....</i>	<i>52</i>
<i>Características de la pantalla</i>	<i>53</i>
<i>Tarjeta de control - arduino uno r3</i>	<i>53</i>
Diseño mecánico y selección de componentes	55
Diseño de la bomba peristáltica.....	55
<i>Selección del tipo de motor.....</i>	<i>55</i>
<i>Selección del modelo del motor a pasos</i>	<i>57</i>

<i>Cálculos de la bomba peristáltica</i>	58
<i>Cálculo de la velocidad angular de la bomba peristáltica</i>	58
<i>Cálculo del torque producido por el motor nema 17</i>	59
<i>Torque disponible de la bomba</i>	59
<i>Caudal de la bomba</i>	60
<i>Diámetro de la tubería</i>	61
<i>Diámetro del rotor</i>	63
<i>Pérdidas primarias en la manguera</i>	65
<i>Longitud de la manguera dentro del rotor</i>	67
<i>Fuerzas aplicadas al rodillo</i>	68
<i>Experimentación</i>	69
<i>Caudal de operación con nuevos valores</i>	73
Diseño y construcción de las estructuras tpms	75
<i>Variación de la arquitectura del giroide</i>	77
<i>Cálculo de porosidad para período constante $n=0.4$</i>	83
Diseño y construcción de la caja de control	84
Diseño y construcción de la bomba peristáltica.....	88
Diseño y construcción de la recámara de perfusión	92
Diseño y construcción del mecanismo del microscopio	94
Sistema de control y análisis de partículas.....	98
Interfaz gráfica	98

Configuración de tarjetas y software de desarrollo	101
Desarrollo del código	102
<i>Código de la tarjeta de control.....</i>	102
Análisis de partículas en las estructuras porosas	108
<i>Rastreo de la trayectoria de la partícula.....</i>	113
Análisis de resultados	116
Conclusiones y recomendaciones.....	128
Conclusiones	128
Recomendaciones	131
Bibliografía.....	132
Anexos	136

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Estructura giroidea con variación de constantes</i>	45
Tabla 2 <i>Selección de motores para bomba peristáltica</i>	56
Tabla 3 <i>Selección del tipo de motor</i>	57
Tabla 4 <i>Selección del tipo de motor</i>	58
Tabla 5 <i>Resumen Valores</i>	64
Tabla 6 <i>Resumen valores considerando las pérdidas</i>	66
Tabla 7 <i>Condiciones de la fuerza tangencial</i>	73
Tabla 8 <i>Variación de la arquitectura de un giroide con N constante</i>	77
Tabla 9 <i>Variación de la arquitectura de un giroide con C constante</i>	78
Tabla 10 <i>Variación del porcentaje de porosidad de un giroide con N constante</i>	79
Tabla 11 <i>Variación del porcentaje de porosidad de un giroide con C constante</i>	80
Tabla 12 <i>Medición del radio y tamaño de soporte del poro con N constante</i>	80
Tabla 13 <i>Medición del radio y tamaño de soporte del poro con C constante</i>	82
Tabla 14 <i>Selección de la tarjeta de control</i>	84
Tabla 15 <i>Componentes a usar en la caja de control</i>	85
Tabla 16 <i>Componentes internos de la caja de control</i>	87
Tabla 17 <i>Componentes de la bomba peristáltica</i>	90
Tabla 18 <i>Componentes de la recámara de perfusión</i>	93
Tabla 19 <i>Selección de motor para el mecanismo de giro del microscopio</i>	95
Tabla 20 <i>Componentes internos de la caja de control</i>	97
Tabla 21 <i>Relación frecuencia-tiempo-volumen</i>	105
Tabla 22 <i>Medio Libre sin estructura porosa</i>	120
Tabla 23 <i>Estructura porosa N1C01</i>	121
Tabla 24 <i>Estructura porosa N04C01</i>	121
Tabla 25 <i>Estructura porosa N04C05</i>	122

Tabla 26 <i>Estructura porosa N04C09</i>	123
Tabla 27 <i>Estructura porosa N06C01</i>	123
Tabla 28 <i>Estructura porosa N08C01</i>	124
Tabla 29 <i>Comparación de velocidades de la estructura porosa</i>	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Sistema de Perfusión con 3 rodillos</i>	32
Figura 2	<i>Ubicación de la bomba peristáltica</i>	33
Figura 3	<i>Rozamiento y rodadura</i>	38
Figura 4	<i>Porosidad en función de la geometría</i>	39
Figura 5	<i>Corte bidimensional de la superficie de una esfera</i>	41
Figura 6	<i>Corte bidimensional de la superficie de un giroide</i>	42
Figura 7	<i>Corte bidimensional de una esfera</i>	43
Figura 8	<i>Combinación de superficies mediante diferentes campos escalares</i>	44
Figura 9	<i>Etapas del procesamiento digital de imágenes</i>	47
Figura 10	<i>Uso de la impresión 3D</i>	50
Figura 11	<i>Modelo de impresión FDM</i>	51
Figura 12	<i>Modelo de impresión SLA</i>	52
Figura 13	<i>Pantalla Nextion 5</i>	53
Figura 14	<i>Arduino UNO R3</i>	54
Figura 15	<i>Bosquejo 2D de la bomba peristáltica</i>	65
Figura 16	<i>Análisis del diámetro del rodillo</i>	69
Figura 17	<i>Experimento de presión de trabajo</i>	69
Figura 18	<i>Experimento de casero presión de trabajo</i>	70
Figura 19	<i>Presión de la manguera</i>	71
Figura 20	<i>Diferencia de masa</i>	71
Figura 21	<i>Pantalla principal software MathMod</i>	75
Figura 22	<i>Selección de un giroide</i>	76
Figura 23	<i>Giroide en forma de prisma rectangular</i>	77
Figura 24	<i>Ajuste polinómico de grado 3</i>	83
Figura 25	<i>Estructura de la caja de control</i>	86

Figura 26 <i>Vista explosionada de la caja de control</i>	87
Figura 27 <i>Estructura de la bomba peristáltica</i>	89
Figura 28 <i>Vista explosionada de la bomba peristáltica</i>	90
Figura 29 <i>Estructura de la recámara de perfusión</i>	92
Figura 30 <i>Vista explosionada de la recámara de perfusión</i>	93
Figura 31 <i>Estructura del mecanismo del microscopio</i>	96
Figura 32 <i>Vista explosionada del mecanismo del microscopio</i>	96
Figura 33 <i>Pantalla principal de la caja de control</i>	98
Figura 34 <i>Pantalla N°2 control de posición y llenado de recámara</i>	99
Figura 35 <i>Pantalla N°3 control del caudal y tiempo</i>	100
Figura 36 <i>Pantalla N°4 visualización del contador y variables de funcionamiento</i>	101
Figura 37 <i>Diagrama de flujo del prototipo</i>	103
Figura 38 <i>Inclusión de librerías en arduino</i>	104
Figura 39 <i>Definición de los pines de entrada y salida</i>	104
Figura 40 <i>Gráfica en función constante de tiempo y volumen en ml</i>	106
Figura 41 <i>Ingreso de la ecuación de frecuencia en función del caudal</i>	107
Figura 42 <i>Envío de la posición del servo</i>	108
Figura 43 <i>Inicialización software ImageJ (FIJI)</i>	108
Figura 44 <i>Video importado en ImageJ (FIJI)</i>	109
Figura 45 <i>Patrón de medida en el software</i>	110
Figura 46 <i>Set de la escala de la estructura porosa</i>	110
Figura 47 <i>Medidas reales de la pieza</i>	111
Figura 48 <i>Etiqueta de tiempo en el video</i>	112
Figura 49 <i>Imágenes duplicadas</i>	113
Figura 50 <i>Visualización de la trayectoria de una partícula</i>	114
Figura 51 <i>Parámetros para generar la trayectoria</i>	114

Figura 52 <i>Tabla de datos de la trayectoria</i>	115
Figura 53 <i>Seguimiento de la partícula con trayectoria</i>	116
Figura 54 <i>Decremento del porcentaje de porosidad</i>	117
Figura 55 <i>Comparación de período positivo y negativo</i>	118
Figura 56 <i>Relación entre radio del poro y tamaño del soporte, Conjunto N</i>	118
Figura 57 <i>Relación entre radio del poro y tamaño del soporte, Conjunto C</i>	119
Figura 58 <i>Velocidad de la partícula con caudal de 100ml/min</i>	125
Figura 59 <i>Velocidad de la partícula con caudal de 200ml/min</i>	126
Figura 60 <i>Comparación de velocidad entre las estructuras porosas seleccionadas</i>	127

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 <i>Fórmula del caudal con rodillos</i>	35
Ecuación 2 <i>Fórmula del volumen</i>	36
Ecuación 3 <i>Fórmula de la potencia</i>	36
Ecuación 4 <i>Fórmula del gasto de caudal</i>	37
Ecuación 5 <i>Fórmula de la fuerza total</i>	38
Ecuación 6 <i>Fórmula del coef. de rozamiento</i>	38
Ecuación 7 <i>Valores del level set</i>	40
Ecuación 8 <i>Ecuación de una esfera</i>	41
Ecuación 9 <i>Fórmula del giroide</i>	42
Ecuación 10 <i>Fórmula de la porosidad</i>	46
Ecuación 11 <i>Fórmula de la relación entre radio del poro y longitud del soporte</i>	46
Ecuación 12 <i>Fórmula de la velocidad angular</i>	59
Ecuación 13 <i>Conversión de N*cm a N*m</i>	59
Ecuación 14 <i>Fórmula del torque disponible</i>	59
Ecuación 15 <i>Potencia del motor</i>	60
Ecuación 16 <i>Fórmula de la altura en m.c.a</i>	60
Ecuación 17 <i>Fórmula de la presión hidráulica</i>	60
Ecuación 18 <i>Fórmula de la velocidad tangencial</i>	61
Ecuación 19 <i>Fórmula del caudal en base a la velocidad</i>	61
Ecuación 20 <i>Fórmula del área</i>	62
Ecuación 21 <i>Fórmula de la velocidad</i>	63
Ecuación 22 <i>Fórmula de las pérdidas</i>	65
Ecuación 23 <i>Número de Reynols</i>	66
Ecuación 24 <i>Fórmula del flujo laminar</i>	66
Ecuación 25 <i>Fórmula de la longitud de la manguera</i>	67

Ecuación 26 <i>Fórmula de la potencia de pérdida</i>	67
Ecuación 27 <i>Fórmula de la presión atmosférica</i>	70
Ecuación 28 <i>Fórmula de la fuerza tangencial</i>	72
Ecuación 29 <i>Fórmula del coeficiente de rozamiento</i>	72
Ecuación 30 <i>Fórmula del torque total</i>	74
Ecuación 31 <i>Fórmula de la velocidad angular</i>	74
Ecuación 32 <i>Relación constante de nivel y porosidad</i>	83
Ecuación 33 <i>Frecuencia en función del caudal</i>	106

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se ha desarrollado un prototipo de sistema de recirculación de fluidos a fin de imitar el comportamiento de un biorreactor de perfusión, enfocándose en el análisis por visión artificial de un flujo laminar que atraviese estructuras porosas tridimensionales similares a las del hueso humano. Este está integrado por una bomba peristáltica que suministra y retira el medio, una recámara que se encarga de contener la estructura porosa y permitir la visualización de la misma en tres caras por un microscopio digital que crea una secuencia imágenes y a través de software se analiza para crear la ruta de las partículas dentro del medio o del avance del flujo. Además, se ha desarrollado una interfaz HMI sencilla e intuitiva, que permite el ingreso de las variables de caudal y tiempo para el control de la bomba peristáltica, además de la posición del microscopio respecto a la estructura porosa; este proyecto representa un primer avance importante en el desarrollo de este tipo de tecnología a nivel nacional. Al ser un prototipo de bajo costo abre las puertas para futuras mejoras e investigaciones en el área de la ingeniería tisular. Se demuestra que, dado ciertos parámetros de diseño para la estructura porosa, el fluido avanza de manera adecuada a través del mismo.

Palabras clave:

- **ESTRUCTURA POROSA TRIDIMENSIONAL**
- **BOMBA PERISTALTICA**
- **PERFUSIÓN**

ABSTRACT

In the present titration work, a prototype of a fluid recirculation system has been developed in order to imitate the behavior of a perfusion bioreactor, focusing on the analysis by artificial vision of a laminar flow that passes through three-dimensional porous structures similar to those of bone. human. This is made up of a peristaltic pump that supplies and removes the medium, a chamber that is responsible for containing the porous structure and allows its visualization on three sides by a digital microscope that creates a sequence of images and is analyzed through software to create the path of the particles within the medium or the advance of the flow. In addition, a simple and intuitive HMI interface has been developed, which allows the input of flow and time variables to control the peristaltic pump, as well as the position of the microscope with respect to the porous structure; this project represents a first important advance in the development of this type of technology at the national level. Being a low-cost prototype, it opens the doors for future improvements and research in the area of tissue engineering. It is shown that, given certain design parameters for the porous structure, the fluid adequately advances through the.

Keywords:

- **THREE-DIMENSIONAL POROUS STRUCTURE**
- **PERISTALTIC PUMP**
- **PERFUSION**

CAPÍTULO I

1. MARCO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

En el ámbito médico es conocida como “medicina regenerativa”, sin embargo, en este proyecto se usará adecuadamente el término “Ingeniería de Tejidos”, con la finalidad de unir diferentes áreas de conocimientos, las mismas que pueden ser la bioquímica y la fisicoquímica, además de la combinación celular con la variada ingeniería de materiales, con el fin de mejorar parcial o completamente tejidos del cuerpo humano, haciendo un enfoque más general en huesos, cartílagos, etc. Cada tejido a tratar requiere de su propia configuración tanto mecánica como estructural para cumplir con su función específica.

El presente proyecto tiene como finalidad la creación de un prototipo de sistema de recirculación de fluidos que permita el análisis de estructuras porosas similares a las del hueso, observar el comportamiento de partículas dentro de un fluido al atravesar por dichas estructuras y modificar su estructura de ser necesario para que se comporten acorde a lo requerido.

1.2. Antecedentes

Analizando el enfoque del proyecto, se lo orienta hacia el área de la bioingeniería, la misma que aplica una muy acertada combinación entre las células madres, la ingeniería de materiales, la bioquímica y la fisicoquímica, con la finalidad de encontrar la manera de reemplazar y modificar ciertas estructuras que necesita el organismo humano. (Bancroft, Sikavitsas, & Mikos, 2003)

Una manera en la que se ha venido trabajando, es a partir de los injertos del paciente, denominado en el área de la medicina como autoinjertos, si viene del hueso del propio paciente, o aloinjerto en el caso que proceda de un cadáver.

Desafortunadamente en los dos métodos existen complicaciones médicas, como el rechazo del injerto o transmisión de enfermedades, según sea el caso. Bancroft *et al.*, (2003)

Con este antecedente, es donde nace la aplicación de lo que ahora se conoce como ingeniería tisular, la misma que consiste en cambiar el hueso dañado, sin necesidad de recurrir a los métodos tradicionales mencionados anteriormente; sin embargo, este procedimiento es viable si se cultiva una cantidad de células dentro de una estructura porosa, y se la implanta en el lugar donde está ubicada la lesión.

Sin embargo, al emplear la ingeniería tisular se encuentran ciertas limitaciones, una de ellas es la transferencia insuficiente de nutrientes y oxígeno, además de la eliminación de productos de desecho de las células al interior de la estructura tridimensional; por lo cual, **al intervenir sistemas que permitan la recirculación de fluidos para mantener los ambientes biológicamente activos, mejor conocidos como biorreactores de perfusión**, depara una mejor transferencia de nutrientes, reduciendo las limitaciones del transporte de masa y evitando las complicaciones médicas por las que se busca dejar de lado los injertos.

Los biorreactores de perfusión son una clave para el futuro no solo de la fabricación biofarmacéutica basada en C-H-O; sino también de varias otras estrategias de fabricación, incluida la investigación y desarrollo de la terapia celular, el desarrollo de

procesos y la producción de vacunas. Un ejemplo es el uso de biorreactores de perfusión en la fabricación de células madre. (Sargent, 2013)

En los biorreactores de perfusión, las células son cultivadas por períodos extensos en lugares adecuados; en la perfusión, hay diferentes formas de mantener las células en cultivo mientras se eliminan los desechos fisiológicos. (Sargent, 2013)

1.3. Planteamiento del problema

Los sistemas para recirculación de fluidos, conocidos como biorreactores de perfusión en contextos institucionalizados, han promovido la reducción y mejora de los tratamientos para defectos óseos, sin embargo, debido a que existen muchas limitaciones y riesgos al implementar procedimientos que involucran partes del cuerpo tales como las células o injertos óseos, surge la necesidad de emplear alternativas.

Desde el año 2014, se han ido implementando biorreactores de perfusión en Ecuador, para poder apoyar en los avances necesarios para la industria farmacéutica; sin embargo, después que ya han transcurrido 7 años, aún no se genera un prototipo que mejore considerablemente la estimulación de los nutrientes a través de impulsos mecánicos en las estructuras porosas tridimensionales. Por este detalle, se pretende utilizar información cualitativa para la generación de un nuevo tejido óseo, ya que, en la actualidad de nuestro país, este tipo de investigaciones son escasas. Por esta razón, el enfoque de este tema de tesis es la construcción de un prototipo de sistema de recirculación de fluidos. Al implementar el prototipo antes mencionado para el análisis de fluidos dentro de una estructura porosa tridimensional, se busca identificar a través de un sistema de visión artificial, si los nutrientes enviados en la perfusión atraviesan las

distintas estructuras porosas tridimensionales o estructuras celulares triplemente periódicas (TPMS) que sirven como soporte para estas células.

1.4. Descripción resumida del proyecto

El presente proyecto tiene como finalidad realizar el diseño y construcción de un prototipo de sistema de recirculación de fluidos a través de estructuras porosas tridimensionales, el cual permitirá analizar su comportamiento en la estructura porosa a través de un sistema de visión artificial.

El proyecto parte del estudio y análisis de los sistemas de recirculación de fluidos (biorreactores de perfusión), y los distintos tipos de estructuras celulares triplemente periódicas existentes en la actualidad. Utilizando como base lo antes mencionado, se tendrán que investigar ciertos parámetros que resulten necesarios para la elaboración del sistema de perfusión, como, por ejemplo: el correcto manejo de la velocidad y la presión del fluido, estructuras porosas adecuadas y un sistema de almacenamiento óptimo para el fluido que permita realizar un análisis por visión artificial. Estos parámetros se convertirán en la base para el diseño del sistema de recirculación de fluidos.

El prototipo consta de tres subsistemas principales: mecánico, electrónico y de control y, de visión artificial. El subsistema mecánico se puede segmentar en tres componentes esenciales: una bomba peristáltica que permita controlar la circulación del fluido de acuerdo a los parámetros previamente investigados, una cámara para el almacenamiento y paso del fluido; y, el diseño de las estructuras porosas triplemente periódicas (TPMS) que se podrán usar dentro de la cámara de perfusión. La selección

de materiales, elementos y el diseño de estos componentes se realizará en base a los parámetros obtenidos de la investigación realizada como primera etapa.

Aunque el enfoque es global, la parte que demandará mayor estudio será la de las estructuras porosas tridimensionales, debido a que se deberán analizar de tal manera que el fluido logre avanzar por cada conducto poroso, por esta razón se tendrán que someter a diferentes pruebas, como es el análisis por visión artificial de un flujo laminar que las atraviese. Los prototipos de estas estructuras serán fabricados en impresión 3D mediante estereolitografía (Resina sensible a rayos UV), debido a la complejidad geométrica de las mismas.

En lo referente al subsistema electrónico y de control, se implementará en una tarjeta electrónica a seleccionar, así como se determinará el algoritmo de control adecuado, de acuerdo a las variables a controlar obtenidas de los requerimientos del sistema. Para poder visualizar y realizar una configuración adecuada del valor numérico al cual se encuentran estas variables, se incluirá una interfaz amigable con el usuario, con la finalidad que realice un óptimo manejo de la misma. Este sistema controlará la bomba peristáltica para la recirculación del fluido. Es necesario mencionar que una alimentación portable, será la encargada de dar energía a este prototipo.

La implementación de visión artificial se usará para el análisis del flujo, dentro del cual se hará un procesamiento de las imágenes obtenidas en la recámara donde estarán las estructuras porosas, este proceso se realizará por medio de una cámara y un ordenador o sistema embebido, en el cual será indispensable analizar los requerimientos mínimos del sistema con la finalidad de obtener resultados y así seleccionar el procesamiento adecuado. Se implementará un algoritmo que permita

medir las variables de interés, como son velocidad y presión con respecto al flujo laminar a través de las estructuras porosas, de acuerdo a los requerimientos encontrados en la investigación previa.

Finalmente se realizarán pruebas de funcionamiento tomando imágenes del flujo que atraviesa las estructuras porosas y se determinará si los valores de los parámetros obtenidos son adecuados, para lo cual se considerará evidencias de trabajos de investigación previos, toma de datos, análisis de expertos en el área y utilizando un método estadístico se validará la hipótesis.

Cabe recalcar que la finalidad de este proyecto es la construcción del sistema que permite la recirculación y análisis del fluido, además del diseño de las estructuras porosas, más no se profundizará en el estudio del fluido como tal o de las soluciones que puedan utilizarse en este prototipo.

1.5. Justificación e importancia

Los costos elevados y los tiempos de espera prolongados para obtener una estructura porosa de buena calidad y totalmente eficiente, han sido el principal problema que las bio farmacéuticas han encontrado.

Por tal motivo se propone implementar un prototipo de sistema de recirculación de fluidos para el análisis de estructuras porosas por medio de flujo laminar a través de un sistema de visión artificial con la finalidad de optimizar recursos en su análisis y producción; en la actualidad el desperdicio de material dentro de la producción es considerablemente alto debido a los fallos dentro de la creación de los modelos, siendo

la razón por la que es necesario realizar este proyecto, para que haciendo pruebas previas, las estructuras porosas no sean desechadas.

Las estructuras porosas que se pretenden analizar sirven para reemplazar ciertas secciones del hueso humano que ya no se pueden regenerar; es por eso que cumplen un papel importante al poder identificar su comportamiento.

La importancia del presente proyecto radica en implementar este prototipo de pruebas a nivel país, dado que al momento no se ha creado un prototipo dentro del mismo que sea capaz de analizar el paso de fluido a través de estructuras porosas en un medio similar al real y esto sería un aporte necesario para el desarrollo de la ingeniería tisular.

En resumen, este trabajo busca implementar un prototipo mecatrónico de un biorreactor de perfusión para analizar las estructuras porosas mencionadas anteriormente incluyendo además un sistema de visión artificial, con el objetivo de perfeccionar esta rama para el desarrollo de la ingeniería tisular a nivel nacional.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

- Diseñar y construir un sistema de recirculación de fluidos a través de estructuras porosas tridimensionales para el análisis de flujo laminar mediante visión artificial.

1.6.2. Objetivos específicos

- Investigar los parámetros de funcionamiento, así como las características aplicables a los sistemas de recirculación de fluidos o biorreactores de perfusión.
- Diseñar y construir una bomba peristáltica que permita el control de caudal de un fluido laminar.
- Diseñar y construir una estructura óptima para el prototipo de biorreactor de perfusión que permita el mejor funcionamiento de sus componentes internos.
- Diseñar e implementar una estructura porosa triplemente periódica de tal forma que un fluido pueda avanzar libremente por todos sus canales.
- Implementar un sistema de visión artificial para monitorear el comportamiento de fluidos en movimiento al interior de las estructuras porosas.
- Ejecutar un protocolo de pruebas de acuerdo a un diseño experimental establecido para diferentes estructuras porosas.

1.7. Hipótesis

¿El prototipo de sistema de recirculación de fluidos con sistema de visión artificial permitirá realizar el análisis del flujo laminar a través de estructuras porosas?

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTACIÓN E INVESTIGACIÓN TEÓRICA

2.1. Introducción

En el presente capítulo se explican los conceptos utilizados para el desarrollo de este prototipo de recirculación de fluidos a través de estructuras porosas tridimensionales para el análisis de flujo laminar.

Es importante mencionar que según la Real Academia de Ingeniería (2018), un Biorreactor de perfusión es un “Tipo de biorreactor que regula el proceso biológico deseado mediante el paso de un flujo de fluido con presión y/o velocidad controladas a través de un órgano, tejido o cultivo celular”, este concepto se ajusta con lo que se pretende implementar, “Sistema de recirculación de fluidos”, sin embargo, debido a que es un prototipo no se utilizará tejidos vivos y en su lugar se reemplazará con una estructura TPMS impresa mediante la tecnología SLA.

2.2. Prototipo de sistema de recirculación de fluidos

Es un tipo de biorreactor que, utiliza una bomba para poder perfundir el medio de manera continua a través de los canales ya existentes en el interior de la estructura porosa; es necesario que la trayectoria del fluido esté confinada y así garantizar que el flujo no se propague por los bordes, sino a través de la estructura porosa. Bancroft *et al.*, (2003)

Este mecanismo ofrece varias ventajas para el cultivo de estructuras porosas para la ingeniería de tejidos. Proporciona un suministro mejorado de nutrientes en toda la estructura al mitigar las limitaciones de difusión externa e interna, ya que el medio

fresco no solo se entrega a cada estructura porosa, sino también a través de la estructura interna de la misma. Además, la tensión de corte del fluido (se sabe que las células óseas son estimuladas por señales mecánicas), es una manera conveniente de proporcionar una estimulación mecánica a las células; la cantidad de esfuerzo cortante experimentado por las células cultivadas en un sistema de perfusión de flujo puede variarse simplemente variando los caudales a través del sistema.

Por supuesto, las tensiones locales de cizallamiento experimentadas por las células individuales dependiendo de la estructura porosa, serán variables y dependen de la micro arquitectura del scaffold. Bancroft *et al.*, (2003)

2.3. Bombas peristálticas

Según (Motovario S.p.A., 2018) “las bombas peristálticas son un tipo de bomba volumétrica que se utiliza para el bombeo de una serie de líquidos”, por lo que será una parte fundamental en el desarrollo del biorreactor de perfusión, por lo que una manguera flexible, será colocada en el interior de la bomba y así empezará la peristalsis, la misma que alterna entre un estrangulamiento y liberación continua de la manguera colocada, permitiendo el suministro constante de líquido.

Al analizar este contexto se puede indicar que “La bomba peristáltica resulta útil para una dosificación precisa, además que suministra cada vez la misma cantidad de líquido: el mismo que está contenido dentro de un tubo flexible reforzado y nunca entra en contacto con las partes móviles.” (Motovario S.p.A., 2018)

2.3.1. Desplazamiento de la bomba

Según (QuimiNet, 2020) “La bomba peristáltica es un tipo de bomba de desplazamiento positivo, es decir, tiene una parte de succión y otra de expulsión, por lo que es utilizada para bombear una gran variedad de fluidos.”

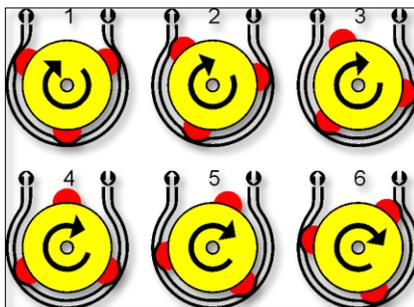
2.3.2. Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento es indispensable para conocer de manera clara lo que va a realizar el prototipo, para lo cual lo primero que se debe tener en cuenta es que se va a comprimir una manguera de manera sucesiva, lo que provocará que el líquido contenido recorra cada vez que se estrangula la manguera, considerando su diámetro interno entre 3 y 25mm. (Veintimilla, 2015).

Una manera clara de simular el movimiento que realiza, es usando de 2 a 3 rodillos distribuidos uniformemente en una estructura circular, la **Figura 1** indica un ejemplo con un sistema de 3 rodillos. (SAdelPlata, 2006).

Figura 1

Sistema de Perfusión con 3 rodillos

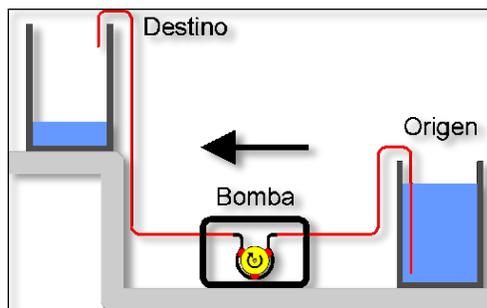


Nota: Se indica un sistema de 3 rodillos, el mismo que se muestra los diferentes puntos de contacto que mantendrá durante su giro. Tomado de: (SAdelPlata, 2006)

En la **Figura 2**, se muestra una recomendación para el recorrido del fluido, desde su origen hasta el destino por medio de la bomba peristáltica.

Figura 2

Ubicación de la Bomba Peristáltica



Nota: Se analiza la disposición de la bomba entre dos reservorios, a manera de una vía que debe recorrer. Tomado de: (SAdelPlata, 2006)

2.3.3. Tipos de bomba peristáltica

Conforme va avanzando el desarrollo de la ingeniería y de la medicina avanza el desarrollo de bombas peristálticas, por lo que es necesario saber que: “Las bombas peristálticas se fabrican, según las necesidades específicas de su aplicación, en diferentes combinaciones de tubos flexibles, rodillos y demás elementos, existiendo así bombas peristálticas de alta y baja presión.” (QuimiNet, 2020)

2.3.4. Principales componentes de la bomba peristáltica

Al momento de ensamblar la bomba peristáltica es muy importante tener presente los componentes que se utilizarán, ya que serán indispensables para su

correcta operación, sin embargo, se considera los siguientes 3 cómo los principales:

(QuimiNet, 2020)

- **Motor:** Se considera la posibilidad de utilizar diferentes tipos de motores, por lo que se muestra una comparación entre los dos tipos de motores necesarios para considerar que son motores a pasos o servomotores. Los factores que deben ser considerados con mayor énfasis son: velocidad, torque, precisión, precio.
- **Estructura de la bomba:** Se debe tener en cuenta que esta estructura será la encargada de resistir el bombeo del líquido dentro de la manguera, por lo que deberá contar con un óptimo diseño que se encargue de soportar estas acciones.
- **Manguera:** Será la encargada de transportar el líquido a bombear, considerando que su selección será primordial para que no exista un contacto entre el líquido y el mecanismo de la bomba.
- **Rodillos móviles:** Serán los que se encarguen de realizar el estrangulamiento de la manguera y así esta pueda hacer que el líquido en su interior avance a manera continua.

2.3.5. Características de las bombas peristálticas de baja presión

Es importante considerar que las bombas peristálticas sean: bi polar, híbrida o de dos fases, además es importante detallar que el modelo del motor puede variar desde un Nema 14 a un 35, con una temperatura ambiente de trabajo de -20 a 50°C.

Otros valores a considerar se detallarán posteriormente en el documento, sin embargo, un punto importante es que la manguera deberá ser desde 0.5mm hasta los 6mm de diámetro para que entre en la clasificación de una bomba de baja presión.

2.3.6. Efecto de cavitación

Según el análisis realizado por (Zamora Parra & Viedna Robles, 2016) “La cavitación se caracteriza por la formación de burbujas de vapor en el interior del flujo o sobre las superficies sólidas, donde las burbujas formadas son arrastradas por el flujo, y al llegar a las zonas de alta presión colapsan.”

En este momento el vapor se condensa y se incrementa la presión, por encima de la presión de trabajo, lo que provoca fuertes golpes mecánicos (golpes de ariete) y se acrecienta la erosión y la corrosión; este fenómeno es conocido como cavitación y es capaz de romper el impulsor y sacar de servicio la máquina; éste fenómeno viene acompañado con un peculiar ruido, además de una disminución considerable del caudal, la carga y rendimiento.

2.3.7. Características de bombas peristálticas con desplazamiento positivo

a. Caudal de la bomba

Para poder realizar los cálculos del caudal se debe considerar 3 aspectos importantes que serán indispensables en su análisis, como indica la **Ecuación 1**, en (Veintimilla, 2015) indica que los aspectos a considerar son: “Volumen de líquido en la manguera comprendido entre dos rodillos, el número de revoluciones por minuto del soporte de rodillos y el número de rodillos de la bomba.”

$$QT = V * \frac{rev}{min} * \text{número de rodillos}$$

Ecuación 1

Fórmula del
caudal con
rodillos

Según la **Ecuación 2**, para poder calcular el volumen se requiere de la longitud de la manguera y el radio de la misma, que servirá por consiguiente para calcular el área.

$$V = \frac{\pi * r^2}{2} * \textit{Longitud de la manguera}$$

Ecuación 2

Fórmula del
volumen

b. Potencia de la bomba

Según (Veintimilla, 2015) indica que: “En mecánica de fluidos, potencia es la rapidez con la que la energía está siendo transferida” por lo que se expresa como indica la **Ecuación 3**.

$$P_h = H.W$$

Ecuación 3

Fórmula de la
potencia

Donde $W = Q \cdot \gamma$

$$P_h = H.Q.\gamma$$

De la **ecuación 3**, se obtiene que:

- P_h : Presión en (w)
- H: Altura manométrica
- Q: Rapidez de Flujo en $\left(\frac{m^3}{s}\right)$
- γ : Peso específico en $\left(\frac{N}{m^3}\right)$

c. Rendimiento hidráulico

Al iniciar con el desarrollo de este prototipo, es indispensable considerar pérdidas por la fricción que existirá entre el fluido y las paredes internas de la manguera, que estará en contacto con los rodamientos de la bomba, por lo que según la Sociedad Acuario lógica del Plata (2006): “El cociente entre la altura manométrica que logra el fluido estaría entre 0.95 hasta 0.97 en bombas grandes, mientras que en bombas pequeñas y de diseño no tan elaborado se lo considera entre 0.85 hasta 0.88.”

d. Gasto de caudal

En este apartado se habla del gasto del caudal, que se debe a la relación que existe entre el gasto teórico y el real, siendo indicado en la **Ecuación 4**.

$$\eta_v = \frac{Q_r}{Q_t}$$

Ecuación 4

Fórmula del gasto de caudal

Donde:

- Q_r : Gasto real
- Q_t : Gasto teórico

Según (Luszczewski, 2004) “El gasto real resulta menor al gasto teórico debido a las pérdidas por fricción que existen en el interior de la bomba.”

e. Resistencia a la rodadura

Según el Departamento de física aplicada de la Universidad de Sevilla (2013) “El rozamiento por la rodadura se produce cuando dos sólidos se encuentran en contacto y uno rueda o se traslada sobre el otro.” Idealmente los dos sólidos se considerarían

como si no existiera fricción, sin embargo, en la realidad el rozamiento no existirá únicamente en un punto, sino se hará presente en una sección debido a que la rueda estará en movimiento, la fórmula que represente este fenómeno está implícita en la **Ecuación 5**; para efectos de cálculos el coeficiente de rozamiento se indica en la **Ecuación 6**, considerando que sean ruedas poco deformables.

$$F_r = F_{apl.} \times \mu_r$$

Ecuación 5

Fórmula de la
fuerza total

$$\mu_r = \sqrt{\frac{z}{\phi}}$$

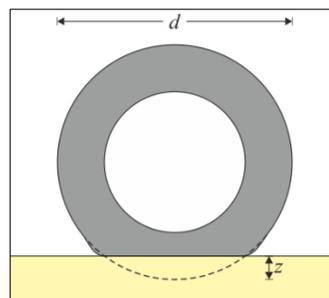
Ecuación 6

Fórmula del coef.
de rozamiento

Donde se estima como ϕ el diámetro de la rueda y z la distancia de hundimiento como se muestra en la **Figura 3**.

Figura 3

Rozamiento-Rodadura



Nota: Coeficiente de rozamiento para ruedas poco deformables. Tomado de (Departamento de física aplicada, 2013)

2.4. Estructuras Mínimas Triplemente Periódicas (TPMS)

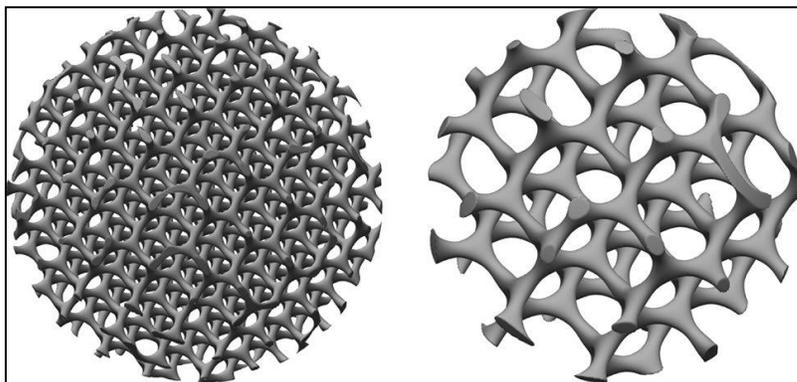
Las superficies mínimas periódicas o TPMS, no intersecantes (por sus siglas en inglés *Triply Periodic Minimal Surfaces*) ofrecen una base atractiva para el diseño de redes de poros interconectados lisos y curvos.

Un TPMS en particular es el giroide, que fue presentado por (Schoen, 1970). Desde entonces estas estructuras han sido encontradas en diferentes sistemas incluyendo bloques de copolímeros, escamas de alas de mariposa y membranas celulares.

La **Figura 4** muestra el uso inadecuado de la porosidad como medida de la geometría de un TPMS. El control total sobre las dimensiones del poro y los soportes facilitan el ajuste de los TPMS para un crecimiento óptimo del tejido, propiedades mecánicas y características de degradación.

Figura 4

Porosidad en función de la geometría



Nota: Comparación de diferentes arquitecturas de poros esféricos con mismas dimensiones externas y porcentaje de porosidad. Tomado de Walker *et al.*, (2016)

Según (Walker, Bodamer, Kleinfehn, & Luo, 2016) la superficie giroidea puede ser descrita implícitamente por una ecuación nodal relativamente simple, la superficie misma separa el espacio 3D en dos fases complejas y entrelazadas, pero separadas. Una fase es establecida como una sólida red de soporte mientras que la segunda fase está vacía y constituye el volumen del poro; debido a su complejidad matemática, las estructuras porosas de tipo giroideo son extremadamente manipulables y computacionalmente eficientes.

2.4.1. Diseño de poros de una estructura TPMS

a. Superficies de nivel

El método “*level set*” es una herramienta para representar una curva cerrada usando una función level set, Φ . En dos dimensiones la función level set toma valores negativos dentro de la curva y valores positivos fuera. El método level set puede ser generalizado a tres dimensiones. Los valores que se encuentran directamente en la superficie toman el valor de cero y forman el level set cero.

Al usar este método, Φ es definido en cada punto de un espacio, no solo en la superficie, lo que lleva a la creación de un campo escalar 3D. En cada punto, la función define un valor escalar que indica si el punto está dentro, fuera o en la superficie, tal como se indica en la **Ecuación 7**.

$$\Phi(x, y, z) - C = \begin{cases} < 0, & \text{dentro} \\ 0, & \text{en} \\ > 0, & \text{fuera} \end{cases} \quad \text{Ecuación 7}$$

Valores del
level set

La **Ecuación 8** indica un ejemplo, una esfera está representada implícitamente por el set de nivel en cero de una función algebraica:

$$\Phi_{esfera} = x^2 + y^2 + z^2 - r^2$$

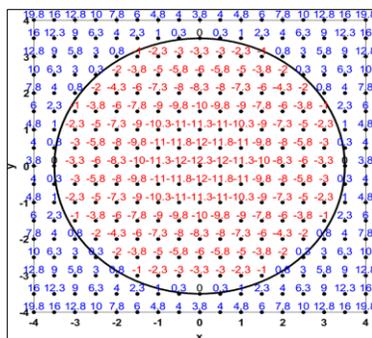
Ecuación 8

Ecuación de
una esfera

En donde r es el radio de la esfera. La **Figura 5** muestra un campo escalar bidimensional para Φ_{esfera} en $z = 0$, con $r = 3.5$ donde $x = y = [-4,4]$. La superficie de la esfera está construida en el level set cero de Φ_{esfera} ; eso es en donde sea que $\Phi_{esfera} = 0$. Todos los puntos dentro de la superficie tienen valores negativos, mientras que, todos los puntos fuera de la superficie son positivos.

Figura 5

Corte bidimensional de la superficie de una esfera



Nota: Corte representado por el level set cero establecido con $r = 3.5$ en $z = 0$ en el campo escalar algebraico Φ_{esfera} . Tomado de Walker *et al.*, (2016)

(Schoen, 1970) Identificó a las superficies del giroide como pertenecientes a la familia de las superficies mínimas periódicas TPMS. El giroide puede ser descrito implícitamente mediante la **Ecuación 9**, en el primer orden de aproximación, por la ecuación nodal:

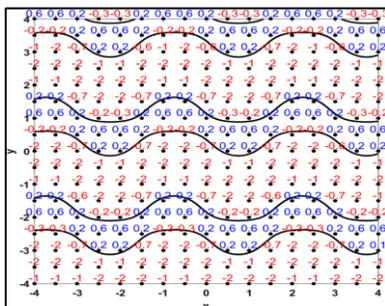
$$\Phi_G = \sin(Nx)\cos(Ny) + \sin(Nz)\cos(Nx) + \sin(Ny)\cos(Nz) - C \quad \text{Ecuación 9}$$

Fórmula del
giroide

La superficie giroidea realmente se minimiza cuando la constante C , es cero. En este caso, la curvatura media en todas las partes de la superficie llega a ser cero. Con valores de C diferentes de cero, la curvatura media también es distinta de cero, pero permanece constante en toda la superficie. La **Figura 6** muestra un campo escalar de dos dimensiones para Φ_G en $z = 0$, con $C = 0.67$, $N = 0.67\pi$ y dentro de los límites $x = y = [-4,4]$.

Figura 6

Corte bidimensional de la superficie de un giroide



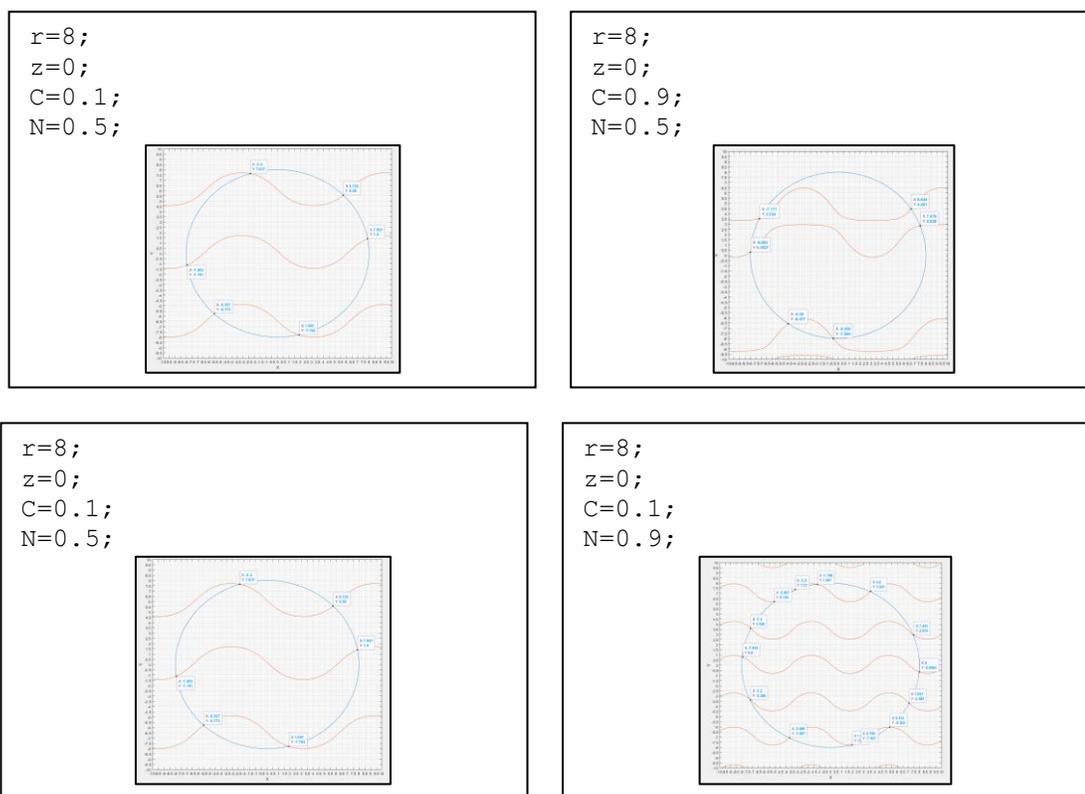
Nota: Corte bidimensional de la superficie de un giroide representado por el level set cero. Tomado de Walker et al., (2016)

b. Combinación de superficies implícitas

Las operaciones booleanas pueden ser usadas para combinar dos o más campos escalares, y considerando que esta operación es totalmente viable para combinar este tipo de superficies, será implementada en este caso. Por ejemplo, la esfera de la **Figura 5**, puede hacerse porosa con la arquitectura de poros derivada del giroide de la **Figura 6**, tomando el valor escalar máximo en cada punto y reconstruir la superficie a lo largo del nuevo level set cero, como se indica en la **Figura 7**.

Figura 7

Corte bidimensional de una esfera



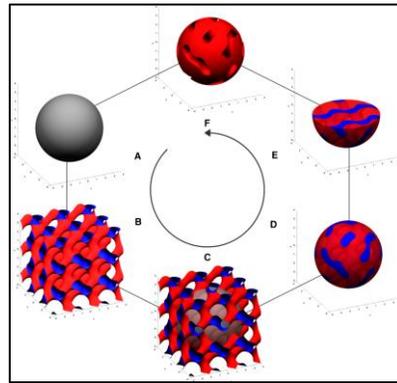
Nota: Comparación del corte bidimensional de la superficie de una esfera con arquitectura porosa de tipo giroides, con diferente periodo y constante de nivel.

Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

La **Figura 8**, indica la combinación de las superficies usando campos escalares en tres dimensiones: (A) una esfera con radio = 3.5; (B) un giroide con su parte interna coloreada de rojo y su parte interna de azul; (C) una superposición del giroide y una esfera; (D) una esfera dividida en dos fases separadas por una superficie giroidea; (E) un corte de la esfera dividida en $z=0$; y (F) una esfera con una arquitectura porosa del giroide, esto podría repetirse con cualquier otra figura específica.

Figura 8

Combinación de superficies mediante diferentes campos escalares



Nota: Ilustración del proceso de combinar superficies usando sus campos escalares en tres dimensiones. Tomado de (Schoen, 1970)

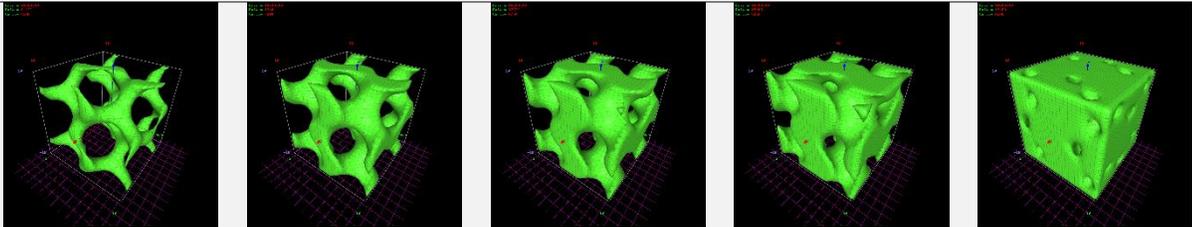
c. Variación de la arquitectura del giroide

El periodo de la superficie giroidea se puede modular de una forma similar a una onda seno o coseno simple. Por ejemplo, con un coeficiente de periodo $N = 2\pi$, la superficie del giroide es periódica en todas sus tres dimensiones con un periodo o unidad de longitud 1. Al escalar el periodo, el tamaño y el número de poros se pueden adaptar.

El giroide puede modularse aún más cambiando la constante de nivel. Cuando $C = 0$, la superficie divide el espacio en dos dominios congruentes, cada uno con una fracción volumétrica del 50% del espacio. Al sumar o restar una constante distinta de cero, C , del campo escalar, se cambia el conjunto de nivel cero y se pueden obtener porosidades que oscilan entre aproximadamente el 2 y el 98%. La **Tabla 1**, muestra cómo la variación de C cambia la geometría y la porosidad, n , de la estructura giroidea.

Tabla 1

Estructura giroidea con variación de constantes

N	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
					
n	91.9%	66.7%	50.6%	34.6%	9.6%
C	-1.2	-0.5	0	0.5	1.2

Nota: Ilustración del efecto de la constante de nivel, C , sobre la geometría y la porosidad, n , de la célula de la unidad giroidea, de 2 cm por cada lado. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

d. Porosidad, tamaño de poro y tamaño de soporte

La porosidad, n , se expresa como una fracción decimal en términos del volumen sólido, V_S , y el volumen total, V_T , donde el volumen total constituye la suma de los volúmenes sólido y poroso como se expresa en la **Ecuación 10**.

$$n = \left(1 - \frac{V_S}{V_T}\right)$$

Ecuación 10

Fórmula de la
porosidad

Otro parámetro importante para describir el giroide se muestra en la **Ecuación 11**, que es la relación entre la dimensión del poro d_p , para las dimensiones del soporte, d_s , y es representado por ξ :

$$\xi = \frac{d_p}{d_s}$$

Ecuación 11

Fórmula de la
relación entre
radio del poro
y longitud del
soporte

Esta relación es de particular interés, pues al igual que la porosidad es una función de la constante de nivel, C , independiente del coeficiente del periodo, N , lo que hace que sea fácil dibujar relaciones directas entre la ecuación implícita y la geometría resultante.

2.5. Visión artificial

Al hablar de visión artificial, se puede englobar a todo aquel sistema que es capaz de obtener información a través de un proceso óptico e interpretarlo mediante una computadora, con la finalidad de procesar cantidades de datos superiores a las que el cerebro puede imaginar, además de hacerlo en menor tiempo. (Rossius, 2013)

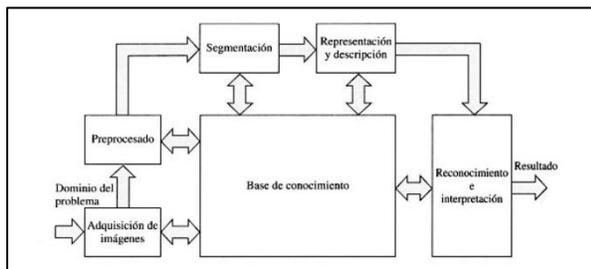
2.5.1. Procesamiento digital de imágenes

De la investigación de (Domingo, 2014) se obtiene que el procesamiento digital de imágenes es la transformación de una imagen en otra. Es decir, a partir de una imagen extraída del mundo real se obtiene otra imagen modificada facilitando la extracción de información para su posterior análisis.

Según (Fernández, 2012) “El análisis de imágenes es un proceso mediante el cual a partir de una imagen se obtiene una medición, interpretación o decisión.” Este análisis consiste en cinco etapas, que están indicadas en la **Figura 9**.

Figura 9

Etapas del procesamiento digital de imágenes



Nota: Indica una secuencia del procesamiento digital de imágenes, desde su inicio hasta su desenlace, además de los procesos por los que tiene que pasar. Tomado de: (Fernández, 2012)

- **Adquisición de la imagen:** Se extrae la imagen adecuada del objeto a estudiar.
- **Pre procesamiento:** Para mejorar la imagen en aspectos generales de calidad se usarán filtros digitales, los mismos que serán los encargados de eliminar el ruido de la misma o bien aumentan su contraste.

- **Segmentación:** Consiste en identificar objetos de interés de la imagen pre procesada para su posterior estudio o análisis.
- **Medición (extracción de características):** Se realiza una extracción de características de interés del objeto de estudio para poder cuantificarlas.
- **Interpretación (clasificación):** De acuerdo a los valores obtenidos dentro de la medición, se realiza una interpretación del objeto.

2.5.2. Software ImageJ (Fiji)

Es un software de dominio público, que sirve para el procesamiento de imágenes en base a java, la arquitectura de este software proporciona una extensibilidad a partir de plugins grabables.

Según (Rasband, 2020), este programa ha sido desarrollado en el instituto nacional de la salud, por lo que detalla que puede resolver problemas de procesamiento y análisis de imágenes, de células en tres dimensiones, además, procesa imágenes radiológicas y puede comparar múltiples datos de sistemas de imágenes.

2.6. Microscopio digital

Al hablar de un microscopio digital, se lo caracteriza por constituirse y estar equipado por una cámara digital, la que cual captura las imágenes a analizar.

Una ventaja es que estas imágenes pueden ser analizadas o simplemente visualizadas en tiempo real, ya sea en una pantalla o en un ordenador. (Mundo Microscopio, 2021)

2.6.1. Aumento del microscopio digital

El microscopio a utilizar netamente es el digital, sin embargo, es necesario explicar la diferencia que existe entre un microscopio digital y un óptico. Una manera general de detallar este proceso en el microscopio óptico es que el aumento se calcula multiplicando el aumento proporcionado por el objetivo y el aumento proporcionado por el ocular; mientras que, en el digital, al carecer de un ocular no es posible utilizar la relación anterior, sino que se calcula mediante el tamaño de la muestra observada en la pantalla. (Mundo Microscopio, 2021)

Otro aspecto que Mundo Microscopio (2021) considera importante es la resolución de la cámara empleada, debido a que, si la cámara posee una resolución alta, la imagen se podrá aumentar sin perder la calidad y el aumento será mayor, mientras que, si la cámara posee una resolución baja, sucederá lo contrario y el resultado se verá pixelado al intentar hacer un aumento considerado en la imagen.

Sin embargo, en ambos casos hay que considerar que el aumento máximo útil es alrededor de 1500x, ya que la naturaleza de la luz los limita, y si anuncian más de lo mencionado se trata de un aumento vacío.

2.7. Impresión 3D

La tecnología de la impresión 3D, también llamada "*additive manufacturing*" por sus siglas en inglés actualmente es muy usada, debido a que corresponde a una adición de material en capas sucesivas, las mismas que se corresponden a la sección transversal del modelo a imprimir; el material más usado es el ácido poliláctico (PLA) que es un termoplástico biodegradable, sin embargo, se pueden usar aleaciones de metal, hormigón, incluso tejido vivo. (Autodesk, 2020)

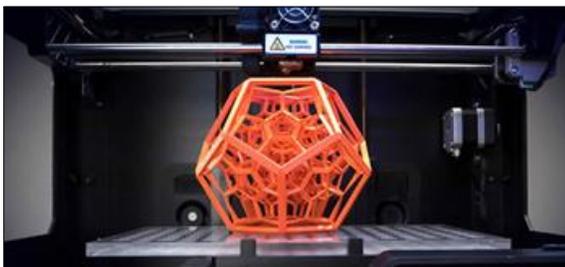
2.7.1. ¿Para qué se usa la impresión 3D?

Según la comunidad de Autodesk (2020), “Actualmente su uso ha dado una mayor apertura debido a que tiene una manera eficiente de crear piezas únicas, además de geometrías complejas que serían posibles únicamente gracias a la impresión 3D.” Como se indica en la **Figura 10**.

Entre los usos más comunes desarrollados actualmente, está: la fabricación de prototipos, piezas ligeras, productos con funcionalidad mejorada, implantes médicos personalizados, patrones para fundición de metal, medicina, odontología, moldes a inyección, proyectos de estudiantes de arquitectura, herramientas, calibradores, entre una gran variedad de accesorios.

Figura 10

Uso de la impresión 3D



Nota: Se muestra un modelado 3D de una impresión geométrica. Tomado de: (Prieto, 2017)

2.7.2. Técnicas empleadas en la impresión 3D

Las técnicas que se pueden emplear en la actualidad son bastante extensas, sin embargo, para el desarrollo de este proyecto de titulación, las técnicas usadas se detallan a continuación.

a. FDM

La técnica FDM es considerada como el método de impresión más sencillo que existe. La misma que consiste de 3 elementos principales, como son: una placa, una bobina de filamento, la misma que contiene el material de impresión y una cabeza que contiene un extrusor; para una mayor comprensión.

Entre los materiales más utilizados para la impresión se encuentra el: PLA, ABS, TPU, PETG, entre otros con materiales compuestos; se puede detallar que el material es succionado y fundido a través del extrusor, el mismo que va depositando material capa tras capa, como se observa en la **Figura 11**. (Restrepo, 2017)

Figura 11

Modelo de impresión FDM



Nota: Placa o mesa de impresión de una Zortrax M200. Con la impresión 3D con soportes del célebre justiciero. Tomado de: (Restrepo, FDM o modelado por deposición fundida, 2017)

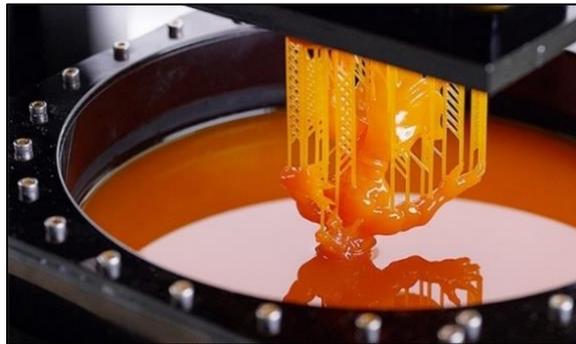
b. SLA (estereolitografía)

Según el análisis realizado por (Restrepo, 2017), indica que. “Este proceso de impresión utiliza el principio de fotopolimerización para crear modelos 3D a partir de resinas sensible a los rayos UV.”

Un condicionante en este tipo de impresión es la limitación de colores, sin embargo, al poder realizar capas de menor espesor la resolución final de la impresión será mucho mejor, como se muestra en la **Figura 12**.

Figura 12

Modelo de impresión SLA



Nota: Se muestra una impresión con la técnica SLA, donde se observa una pieza con mayor definición que la tradicional impresión 3D. Tomado de: (Restrepo, 2017)

2.8. Sistema electrónico

2.8.1. Pantalla Nextion

La placa Nextion TFT usa solo un puerto serie para comunicarse. Permite a los usuarios evitar la molestia del cableado. Según el análisis hecho por (Aelectronics, 2021) indica que: “El editor de Nextion tiene componentes masivos como botones, texto, barra de progreso, control deslizante, panel de instrumentos, etc. para enriquecer el diseño de la interfaz.”

Además, la función de arrastrar y soltar garantiza que los usuarios dediquen menos tiempo a la programación, lo que reducirá el 99% de sus cargas de trabajo.

2.8.2. Características de la pantalla

Según (Aelectronics, 2021), la placa Nextion TFT, es compatible con Raspberry Pi A +, B + y Raspberry Pi 2, Arduino, además consta de con panel táctil resistivo integrado de 4 hilos con resolución de 800x480 para Raspberry Pi y Arduino como se puede observar en la

Figura 13, entre otras características se tiene:

- RGB 65K fiel a los colores de la vida.
- Área visual: 108 mm (L) x 64.8 mm (W).
- Consumo de energía 5V 410mA.

Figura 13

Pantalla Nextion 5



Nota: Nextion es una solución para Interfaces Humano Máquina (HMI). Tomado de:
(Aelectronics, 2021)

2.8.3. Tarjeta de control - Arduino UNO R3

Según (Crespo, 2016), arduino es una plataforma que consta de un hardware libre, está basada en un microcontrolador y un software que permite al usuario desarrollar proyectos multidisciplinarios de electrónica y programación.

Generalmente el microcontrolador que se usa, es un Atmel AVR, el mismo que está colocado en una placa impresa y contiene puertos de comunicación y puertos de entrada/salida, según (Crespo, 2016) los microcontroladores más usados son: Atmega168, Atmega328, Atmega1280, ATmega8, debido a la sencillez.

En la **Figura 14**, se muestra la representación física del Arduino Uno que se implementará para el desarrollo de este proyecto, es importante reconocer e indicar que el Arduino Uno usa un microcontrolador ATmega2560, su voltaje operativo es de 5V y posee 54 pines digitales de Entrada/Salida, de los cuales 15 proveen salida PWM.

Figura 14

Arduino UNO R3



Nota: El Arduino Uno consta de un microcontrolador ATmega2560, ayudando a un mejor desarrollo de programas. Tomado de: (Salazar, 2021)

CAPÍTULO III

3. DISEÑO MECÁNICO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES

En este capítulo se pretende indicar de una manera selectiva los componentes que se usará en el prototipo de sistema de recirculación de fluidos.

Este prototipo contiene cuatro subsistemas principales: bomba peristáltica, estructuras TPMS, recámara para las estructuras TPMS y mecanismo que permita posicionar el microscopio digital en tres posiciones fijas, estas son: parte superior y costados. Un sistema de control que se compone de una tarjeta electrónica y un HMI como interfaz de usuario.

Es necesario indicar que el prototipo a realizar, será de bajo costo, por lo que la selección de sus componentes será indispensable para que se cumpla las características de diseño especificadas, se puede considerar que el motor es uno de los componentes más importantes debido al trabajo que va a realizar en todo el proyecto y su selección será considerada de manera prioritaria.

3.1. Diseño de la bomba peristáltica

3.1.1. Selección del tipo de motor

Dentro del mercado internacional existen a la venta bombas peristálticas impulsadas por un motor a pasos, servo motores o motores DC con escobillas, sin embargo, es necesario considerar que los componentes a utilizar se consigan con facilidad dentro del mercado local.

En la **Tabla 2** se realiza una comparación de estas tres alternativas calificándolas con un valor de “+1”, “0” y “-1”. Esta alternativa de selección se considera debido a la facilidad con la que se puede filtrar las características de los diferentes componentes acorde a las necesidades de trabajo.

Tabla 2

Selección de motores para bomba peristáltica

<u>Criterio</u> <u>de</u> <u>selección</u>	<u>Motor a</u> <u>pasos</u>	<u>Servo motor</u>	<u>Motor DC con escobillas</u>
<i>Bajo costo</i>	0	-1	+1
<i>Durabilidad</i>	+1	+1	+1
<i>Precisión</i>	+1	+1	-1
<i>Peso bajo</i>	+1	-1	+1
<i>Alto torque</i>	+1	+1	-1
<i>Encoder</i>	0	+1	0
<i>Disponibilidad de drivers</i>	+1	+1	+1
<i>Disponibilidad mercado local</i>	+1	0	+1
<i>Evaluación</i>	6	3	3

Nota: Se indica la comparativa entre los motores más utilizados en el mercado para el desarrollo de bombas peristálticas. Tomado de: (Boxer GmbH, 2020)

Tras haber culminado el análisis correspondiente, se pudo determinar que el motor que más se acopla a las necesidades del prototipo es el motor a pasos, debido a los beneficios que otorga al proyecto.

3.1.2. Selección del modelo del motor a pasos

Dentro del mercado internacional se encuentra la empresa Boxer (2020), encargada de fabricar bombas peristálticas, donde indica que: “Dentro de su stock de productos se encuentra la bomba peristáltica impulsada por un motor a pasos; en la **Tabla 3** se indica las características recomendadas del motor.”

Tabla 3

Selección del tipo de motor

	NEMA 17	NEMA 14
<i>Velocidad</i>	200 pasos por revolución y 1.8°	200 pasos por revolución y 1.8°
<i>Par motor</i>	4,8 kg · cm	1 kg · cm
<i>Corriente</i>	2.5 A	0.5 A
<i>Tamaño</i>	48 mm	30 mm

Nota: Diferencias entre los 2 tipos de motores a pasos más usados en el desarrollo de bombas peristálticas Tomado de: (Pololu, 2021)

Al tomar en cuenta las características de la **Tabla 2** y **Tabla 3**, se logró identificar como la mejor opción al Motor Nema 17 42BYGHW811 a 2.5 A, debido principalmente a la disponibilidad en el mercado, y además de las características para el óptimo funcionamiento de la bomba peristáltica.

3.1.3. Cálculos de la bomba peristáltica

Es necesario partir con el detalle de las características del motor a usar que se indica en la **Tabla 4**, ya que serán indispensables para realizar este procedimiento.

Tabla 4

Selección del tipo de motor

NEMA 17	
<i>Presión Máx.</i>	1 bar
<i>Corriente</i>	2 A
<i>RPM</i>	0 – 500 rpm

Nota: Características a considerar para aplicar en los cálculos de una bomba peristáltica. Tomado de: (Boxer GmbH, 2020)

3.1.4. Cálculo de la velocidad angular de la bomba peristáltica

Según el catálogo de (Boxer GmbH, 2020), las bombas peristálticas con motor a pasos tienen un rango de velocidad RPM comprendido entre 0-500 revoluciones por minuto. Para este caso según datos del fabricante se tiene un torque de 3.6Ncm a 200RPM.

Cabe recalcar que un motor a pasos puede alcanzar las 500 RPM sin problema, pero su torque es mínimo, por ello se pretende tomar como tope una velocidad de 200 RPM para los cálculos.

Se realiza el cálculo de la velocidad angular que se indica en la **Ecuación 12**, para su posterior análisis.

$$\omega = V * \frac{2\pi}{60}$$

$$\omega = 200 \text{ rpm} * \frac{2\pi}{60} = 20.94 \text{ rad/s}$$

Ecuación 12

Fórmula de la
velocidad
angular

3.1.5. Cálculo del Torque producido por el Motor Nema 17

El Torque a 200RPM, según el fabricante es de 3.6 N*cm, donde se convierte a N*m y quedaría expresado en la **Ecuación 13**.

$$T_m = 0.036 \text{ N} * \text{m}$$

Ecuación 13

Conversión de
N*cm a N*m

3.1.6. Torque disponible de la bomba

El torque disponible parte de la **Ecuación 14**, donde se considera el rendimiento por transmisión.

$$T_{disp} = T_m * \eta_T$$

$$T_{disp} = 0.036 \text{ Nm} * 1$$

$$T_{disp} = 0.036 \text{ Nm}$$

Ecuación 14

Fórmula del
torque
disponible

Una vez hallado el torque disponible, en la **Ecuación 15**, se vuelve a calcular la potencia que va a suministrar el motor:

$$P_{ot} = T_{disp} * W$$

$$P_{ot} = 0.036 Nm * 20.94 rad/s = \mathbf{0.756W}$$

Ecuación 15

Potencia del motor

3.1.7. Caudal de la bomba

Debido a que la bomba a realizar se basa en bombas de baja presión y al tomar los datos que menciona (Boxer GmbH, 2020), se procede a seleccionar una presión de 1 bar como la presión máxima a la que trabajará el equipo, como se muestra en la

Ecuación 16.

$$h = 1 bar * \frac{10.2 m.c.a.}{1 bar} = 10.2 m.c.a.$$

Ecuación 16

Fórmula de la altura en m.c.a.

Por medio de la fórmula de la presión hidráulica, cuya fórmula es indicada en la **Ecuación 17**, se procede a calcular el caudal.

$$P_{ot} = \lambda * h * Q$$

$$Q = \frac{P_{ot}}{\lambda * h}$$

$$Q = \frac{0.756 N * m/s}{9800 N/m^3 * 10.2 m.c.a.}$$

$$Q = 7.567 * 10^{-6} m^3/s = 7.567 * 10^{-3} Lit/s$$

$$Q = 7.567 ml/s$$

Ecuación 17

Fórmula de la presión hidráulica

3.1.8. Diámetro de la tubería

En este parámetro es necesario conocer la velocidad tangencial a la que estará trabajando el equipo, por lo que la manera que se usará consiste en que el radio que se aplastará la manguera quedará a destreza del diseñador, para ello se estable un valor de 60mm de diámetro, ya que se busca que la bomba sea compacta y a la vez funcional. La fórmula de la velocidad tangencial se muestra en la **Ecuación 18**, y posteriormente se reemplaza con los datos obtenidos.

$$V_t = r * \omega$$

Ecuación 18

Fórmula de la
velocidad
tangencial

Para un valor de 200RPM y un diámetro de 60mm, el valor de la velocidad Tangencial es:

$$V_t = 0.03m * 20.94 \frac{rad}{s} = 0.6283 \frac{m}{s}$$

En la **Ecuación 19**, se muestra la fórmula del caudal, a partir de la que se puede hallar el diámetro, si se despeja el área de la tubería.

$$Q = v * A$$

Ecuación 19

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{7.567 * 10^{-6} m^3/s}{0.6283 m/s} = 1.204 * 10^{-5} m^2$$

Fórmula del
caudal en base a
la velocidad

Como la manguera a utilizar tiene sección circular, que es por donde fluirá el agua, se emplea la **Ecuación 20**, de área para esta sección.

$$A = \pi * r^2$$

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{1.204 * 10^{-5} m^2}{\pi}}$$

$$r = 1.958 * 10^{-3} m$$

$$r = 1.958 mm$$

Ecuación 20
Fórmula del
área

Una vez realizado el cálculo para encontrar el valor del radio, se calcula el diámetro necesario de la manguera:

$$\phi_{Manguera} = 2r = 3.92 mm$$

El tubo de silicona flexible se encuentra comercialmente de 4mm de diámetro interior, y 5.5mm de diámetro exterior, y por esta razón se debe realizar los cálculos anteriores, pero ahora con los datos correctos indicados en la **Ecuación 20**.

$$A = \pi * 0.002^2 = 1.257 * 10^{-5} m^2$$

Al obtener el valor del área y también los datos del caudal, se podrá despejar la velocidad de la **Ecuación 19**, y así calcular el valor al que trabajará la bomba.

$$Q = v * A$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{7.567 * 10^{-6} m^3/s}{1.257 * 10^{-5} m^2}$$

$$v = 0.602 m/s$$

3.1.9. Diámetro del rotor

Tanto la velocidad tangencial como la velocidad angular, son datos conocidos, por esta razón y aplicando la **Ecuación 21**, se puede calcular la velocidad a la que estará trabajando el rotor.

$$v = w * r_{rot}$$

$$r_{rot} = \frac{0.602 m/s}{20.94 rad/s} = 0.02875 m$$

$$r_{rot} = 28.75 mm$$

Ecuación 21

Fórmula de la
velocidad

Para encontrar el diámetro del rotor, únicamente se duplica el valor obtenido en el radio calculado, dando como resultado:

$$\phi_{Rotor} = 2r = 57.5 mm$$

Con los valores obtenidos se puede desarrollar la bomba peristáltica, es indispensable hacer correctamente el procedimiento de los cálculos debido a que los parámetros hallados, son usados en el diseño correcto de la bomba, en la **Tabla 5**, se pueden observar los valores más importantes de todos los cálculos realizados.

Tabla 5

Resumen Valores

Detalle	Símbolo	Valor
<i>Diámetro interno de la manguera</i>	<i>ID</i>	<i>4 mm</i>
<i>Diámetro de aplastamiento</i>	\emptyset_{Rotor}	<i>57.5 mm</i>
<i>Velocidad Tangencial</i>	<i>m/s</i>	<i>0.6283</i>
<i>Velocidad Angular</i>	<i>RPM</i>	<i>0 – 200 rpm</i>
<i>Presión Máxima</i>	<i>bar</i>	<i>1</i>
<i>Potencia</i>	<i>W</i>	<i>0.756 w</i>
<i>Caudal</i>	<i>Q</i>	<i>7.567 ml/s</i>

Nota: Tabla de la selección de los valores más relevantes para el desarrollo de la bomba peristáltica. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

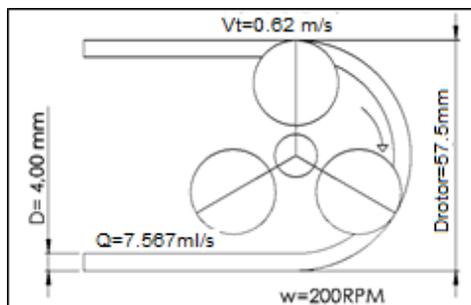
Una vez que se ha realizado cada operación necesaria para calcular los parámetros de la bomba, se procede a diseñar el prototipo de la bomba peristáltica.

Por lo que en la **Figura 15**, se muestra un bosquejo en 2D, con la intención que se obtenga una mejor interpretación de donde se utilizarán los valores mostrados en la

Tabla 5.

Figura 15

Bosquejo 2D de la bomba peristáltica



Nota: Valores obtenidos en el bosquejo para una mejor interpretación de los datos calculados. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

3.1.10. Pérdidas primarias en la manguera

Las pérdidas primarias se calculan con la **Ecuación 22**, luego se calcula el coeficiente de fricción.

$$Hr = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 22

Fórmula de las pérdidas

Es necesario calcular el número de Reynolds con la finalidad de comprobar si el flujo es: Laminar, Turbulento o está en transición de laminar a turbulento, por lo que en la **Ecuación 23**, se muestra la fórmula para hallar el número de Reynolds, donde ρ representa la densidad del líquido, v la velocidad, D el diámetro de la tubería y μ la viscosidad dinámica del fluido. Y con los datos que se muestran en la **Tabla 6**, se reemplazan en la **Ecuación 23**, obteniendo así el número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu}$$

Ecuación 23Número de
Reynolds**Tabla 6***Resumen valores considerando las pérdidas*

Detalle	Valor	Nomenclatura
<i>D</i>	0.004	<i>m</i>
<i>v</i>	0.628	$\frac{m}{s}$
μ	1.102×10^{-3}	$\frac{N \cdot s}{m^2}$

Nota: Tabla de la selección de los valores más relevantes para el desarrollo de la bomba peristáltica. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

$$Re = \frac{1000 \frac{kg}{m^3} * 0.628 \frac{m}{s} * 0.004 m}{1.102 \times 10^{-3} \frac{N \cdot s}{m^2}}$$

$$Re = 2279$$

Según (Frías, 2012) en su presentación corroboró que cuando “El número de Reynolds es menor a 2300 se considera un flujo laminar y para calcular el coeficiente de fricción se utiliza la **Ecuación 24**.

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{2279} = 0.0280$$

Ecuación 24Fórmula del
flujo laminar

3.1.11. Longitud de la manguera dentro del rotor

Es importante considerar que la cantidad de manguera a usar no es controlada, sin embargo, dentro del rotor si es necesario conocer la longitud de la misma, por lo que se aplicará la **Ecuación 25**.

$$L = \pi * r_{rot}$$

Ecuación 25

$$L = \pi * 0.02875m$$

Fórmula de la

longitud de la

$$L = 0.0903m = 90.32mm$$

manguera

Una vez hallados los valores que eran requeridos, se tiene que calcular las pérdidas que se generarán dentro de la manguera, para lo cual se hace uso de la **Ecuación 22**, de Darcy-Weisbach.

$$Hr = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

$$Hr = 0.0280 * \frac{90.32mm}{4mm} * \frac{\left(0.6283 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(9.8 \frac{m}{s^2}\right)} = 0.0127m. c. a.$$

Adicionalmente, se expresan todas las pérdidas primarias expresadas en potencia, por medio de **Ecuación 26**.

$$P_{per} = Hr * \gamma * Q$$

Ecuación 26

Fórmula de la

$$P_{per} = 0.0127 * \frac{9800N}{m^3} * 7.567 * 10^{-6} m^3/s$$

$$P_{per} = 0.000944W$$

potencia de
pérdida

El valor hallado, debido a que es muy pequeño, se procede a despreciarlo para efectos de cálculos.

3.1.12. Fuerzas aplicadas al rodillo.

Los rodillos en este apartado, deben permitir que la manguera sea aplastada en su totalidad. Dadas las siguientes características:

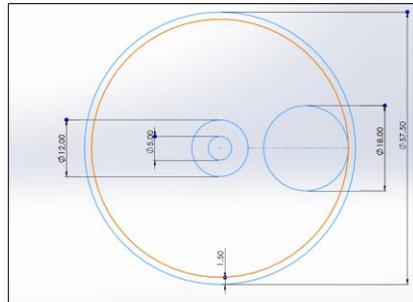
- El diámetro que se aplastará la manguera será igual a 57.5mm
- El espesor de la manguera será de 0.75mm
- Diámetro del eje del motor de 5mm
- Acople para el eje del motor de 12mm

Con estos datos se determinará las dimensiones del rodamiento a utilizar, considerando que su valor debe ser de 18mm, tal cual se indica en la **Figura 16**. Se genera un espacio pequeño entre el acople del eje del motor y el rodillo para evitar algún posible rozamiento entre las partes.

Sin embargo, para una mejor comprensión del lector, se debe recalcar que la distancia que se deja entre las medidas obtenidas, servirá para que, al momento de realizar el diseño, este no tenga fallas y no se desperdicie material al momento de su construcción.

Figura 16

Análisis del diámetro del rodillo



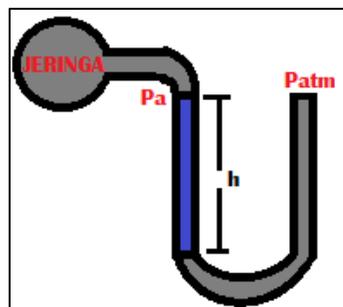
Nota: Se debe hacer un bosquejo, con la finalidad de obtener el valor más óptimo a utilizar en el presente proyecto. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

3.1.13. Experimentación

Para los futuros cálculos es necesario contar con el valor de la fuerza al aplastar la manguera, tanto en vacío como en trabajo, es decir a la presión de diseño que es de 1 bar, mostrado en la **Figura 17**. Mientras que el dato desconocido sería la altura de diferencia de los líquidos, la misma que se calcula a través de la **Ecuación 27**.

Figura 17

Experimento de presión de trabajo



Nota: Esquema de la representación de un experimento de diferencia de presiones.

Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

$$P_a + \rho gh = P_{atm}$$

$$100000 \frac{N}{m^2} + \left(1000 \frac{kg}{m^3}\right) \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) (h) = 101325 \frac{N}{m^2}$$

$$h = \frac{101325 \frac{N}{m^2} - 100000 \frac{N}{m^2}}{\left(1000 \frac{kg}{m^3}\right) \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right)} = 0.135 m = 13.5 cm$$

Ecuación 27

Fórmula de la
presión atmosférica

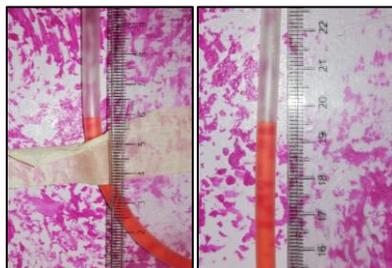
Donde:

- P_A : Presión en el punto A de 1 bar
- P_{atm} : Presión atmosférica en Pa
- ρ : Densidad del líquido (agua) $1000 \frac{kg}{m^3}$

En la **Figura 18**, se logra observar que el fluido se encuentra a una altura inicial de 6cm por lo que la altura a la que debe llegar es 19.5cm. Para encontrar la fuerza con la que se aplastará la manguera, se coloca un objeto que permita aplastarla.

Figura 18

Experimento de casero presión de trabajo



Nota: Esquema de la representación de un experimento de diferencia de presiones.

Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Para lo cual se optó por un calibrador y para medir el peso ejercido se utilizó una balanza digital, como se indica en la **Figura 19**.

Figura 19

Presión de la manguera



Nota: Manguera presionada sobre una balanza digital para analizar el valor de la presión. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

De este análisis se analizó que la masa con la que se aplastaría la manguera a 1 bar de presión es 258gr, mediante la ecuación del peso igual a masa por gravedad, considerando como peso igual a 2.5N. La experimentación de la presión en vacío, en cambio, como está indicada en la **Figura 20**, se observa que la diferencia de masa entre la manguera y el objeto a aplastar con la manguera aplastada por el mismo objeto es 121gr, la fuerza ejercida por consiguiente es 1.19N.

Figura 20

Diferencia de masa





Nota: Se realiza una diferencia de masas para poder utilizar este valor en el análisis de la presión en vacío. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Una vez conocida los datos anteriores, se calculará la fuerza tangencial, también conocida como fuerza periférica, considerando la **Ecuación 28**.

$$F_T = F_{apl} * \mu_r$$

Ecuación 28

Fórmula de la
fuerza tangencial

Para calcular el coeficiente de rozamiento se lo determina empleando la **Ecuación 29**, donde se sabe que $z = 4\text{mm}$ y ϕ del rodillo = 18mm .

$$\mu_r = \sqrt{\frac{z}{\phi \text{ del rodillo}}} = 0.47$$

Ecuación 29

Fórmula del
coeficiente de
rozamiento

Utilizando la **Ecuación 28**, se calcula la fuerza tangencial mencionada anteriormente, y se procede a mostrar los datos en la **Tabla 7**.

Tabla 7

Condiciones de la fuerza tangencial

<i>Condiciones de vacío</i>	<i>Condiciones de trabajo</i>
$F_{Tv} = 1.19N * 0.47$	$F_{Tt} = 2.5N * 0.47$
$F_{Tv} = 0.56 N$	$F_{Tt} = 1.17 N$

Nota: Se detalla los valores obtenidos al calcular la fuerza tangencial en condiciones de vacío y de trabajo. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

3.1.14. Caudal de operación con nuevos valores

Se procede a calcular tanto el torque de bombeo como el torque sin carga en la máquina empleando la **Ecuación 30**. Como primer paso se calculará en condiciones de trabajo, teniendo en cuenta que $F_{Tt} = 1.17 N$ y $r_{rot} = 57.5 mm$.

$$\mu_r = F_{Tt} * r_{rot}$$

$$T_t = 1.17 N * 0.0575m = 63.33 x 10^{-3} Nm$$

Como segundo paso se calculará en condiciones de vacío, teniendo en cuenta que $F_{Tv} = 0.56 N$ y $r_{rot} = 57.5 mm$.

$$\mu_r = F_{Tv} * r_{rot}$$

$$T_v = 0.56 N * 0.0575m = 30.31 x 10^{-3} Nm$$

Para calcular el torque total aplicado, se lo hace tras aplicar una suma entre los torques calculados anteriormente, como se indica en la **Ecuación 30**.

$$T_{Total} = T_t + T_v$$

Ecuación 30

$$T_{Total} = 63.33 \times 10^{-3} Nm + 30.31 \times 10^{-3} Nm$$

Fórmula del
torque total

$$T_{Total} = 93.64 \times 10^{-3} Nm$$

Como ya se conoce la potencia del motor y el torque total que se calculó anteriormente, se procede con el cálculo de la velocidad angular, esta es necesaria para conocer los parámetros de trabajo de la bomba, como está en la **Ecuación 31**.

$$w = \frac{Pot}{T_T}$$

Ecuación 31

$$w = \frac{0.756W}{93.64 \times 10^{-3} Nm}$$

Fórmula de la
velocidad

$$w = 8.07 \frac{rad}{s} = 77.09 rpm$$

angular

A continuación, se calculará el caudal sabiendo que $V = A_{manguera} * l_{manguera}$, y siendo que $A_{manguera} = \pi * (r_{manguera})^2$, entonces: $A_{manguera} = 1.2566 \times 10^{-5} m^2$, por lo que el valor del volumen calculado será: $V = 1.0686 \times 10^{-6} m^3$, una vez encontrados los valores anteriores y utilizando la **Ecuación 19**.

$$Q = V * w * \text{número de rodillos}$$

$$Q = 1.0686 \times 10^{-6} m^3 * 77.09 * 3 = 2.47 \times 10^{-4} \frac{m^3}{min} = 4.11 \frac{ml}{seg}$$

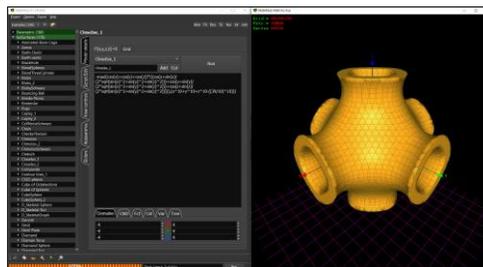
Se puede concluir que el caudal real que proporcionará la bomba peristáltica a una velocidad de 77 RPM será de $4.11 \frac{ml}{seg}$.

3.2. Diseño y construcción de las estructuras TPMS

Para realizar el diseño de las estructuras TPMS, se parte de la **Ecuación 9**, y se asume por efectos de diseño un valor de período N para un caso y de la constante de nivel C que serán constantes para otro caso. Es necesario considerar que su desarrollo partirá del software de modelado matemático en ingeniería, MathMod, el mismo que al inicializarse tendrá una imagen que es representada en la **Figura 21.**

Figura 21

Pantalla principal software MathMod

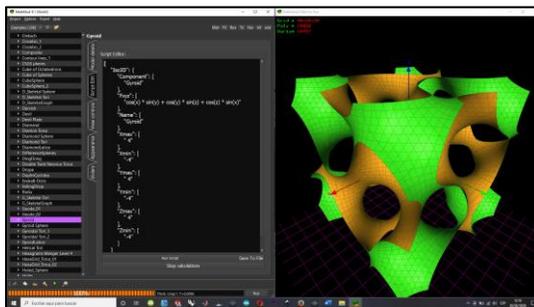


Nota: Al inicializar MathMod, en la mayoría de computadores se podrá observar el mismo menú de inicio. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

A continuación, en la pestaña de la izquierda se tendrá que seleccionar “Gyroid” y en las viñetas del menú de configuración seleccionar “Script Edit”, una vez realizado estas indicaciones, en la **Figura 22**, se podrá visualizar la pantalla que se mostrará en el software mencionado, lo que servirá para una mejor comprensión al momento de empezar el análisis de las estructuras TPMS.

Figura 22

Selección de un giroide



Nota: Se muestra la forma de un giroide que servirá como guía para desarrollar la estructura TPMSA. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

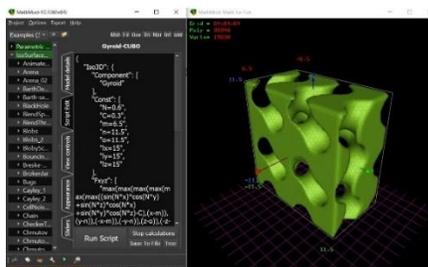
La **Figura 22**, mostrada anteriormente, representa lo que es un giroide en forma, pero solo es una muestra de un conjunto de planos, por este motivo carece de espesor, por lo que, para darle un espesor se debe intersecar con otra figura como un cubo, una esfera, un cilindro, etc.

La forma de programar en MathMod es utilizar las ecuaciones de las figuras que se necesita por lo cual también se definen los límites de las ecuaciones. El comando “MAX” permite intersecar los puntos extremos de una figura con otra. Al ingresar el código del programa generado (Véase el Anexo 1), se han definido variables, esto con

el fin de que el cambio de un valor se realice de forma breve desde el encabezado, de la misma forma se define como figura intersecante un prisma rectangular como se muestra en la **Figura 23**.

Figura 23

Giroide en forma de prisma rectangular



Nota: Se visualiza un conjunto de dos planos intersecados entre un giroide y un prisma rectangular. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

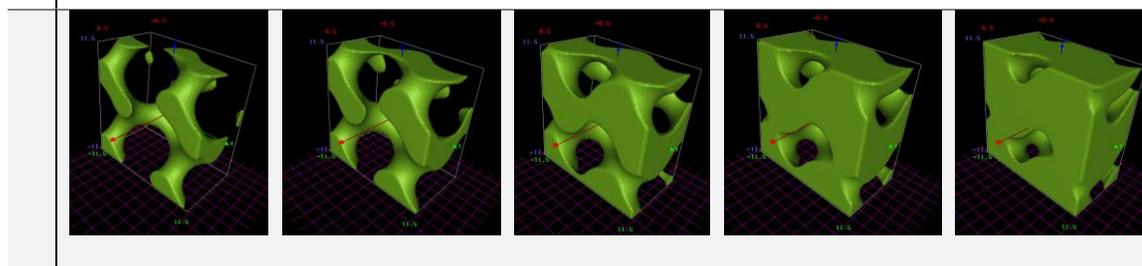
3.2.1. Variación de la arquitectura del giroide

En la **Tabla 8**, se presentan 5 ejemplos de giroide cuyo valor N permanecerá constante, mientras la constante C varía en un rango de -0.9 a 0.9 , con la finalidad de obtener sus valores de porosidad, radio y tamaño de soporte del poro.

Tabla 8

Variación de la arquitectura de un giroide con N constante

Giroide de 23x23x13mm el parámetro igual en estos casos es $N=0.4$



Giroide de 23x23x13mm el parámetro igual en estos casos es N=0.4

N	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
C	-0.9	-0.5	0.1	0.5	0.9

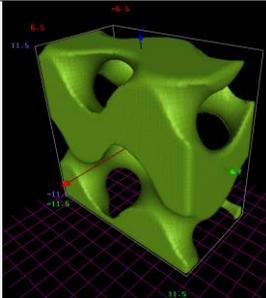
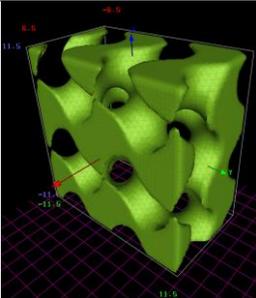
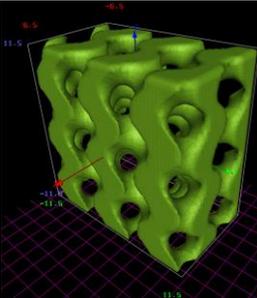
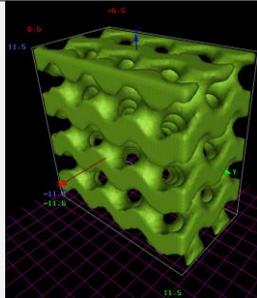
Nota: Se muestra la forma de 5 giroides cuyo valor N permanece constante. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

En la **Tabla 9**, se presentan 4 ejemplos de giroide cuyo valor de la constante C permanecerá constante, mientras que el período N varía en un rango de 0.4 a 1, con la finalidad de obtener sus valores de porosidad, radio y tamaño de soporte del poro, no se consideran valores negativos debido a que el valor N dentro de la **Ecuación 9** representa el período de la función.

Tabla 9

Variación de la arquitectura de un giroide con C constante

Giroide de 23x23x13mm el parámetro igual en estos casos es C=0.1

				
N	0.4	0.6	0.8	1
C	0.1	0.1	0.1	0.1

Nota: Se muestra la forma de 4 giroides cuyo valor C permanece constante. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

La manera de exportar los archivos de este programa es en formato .obj el cual se puede abrir en el software gratuito de Microsoft 3D Builder que además de reparar el archivo y darle un relleno permite guardarlo en formato. stl el cual se puede abrir en un software CAD y obtener sus propiedades físicas, como el volumen, (Véase el Anexo 2).

Dado que es un prisma rectangular de medidas concretas se puede calcular su volumen total, que está dado por la multiplicación de la medida de su largo, ancho y profundidad; en la **Tabla 10** (Véase el Anexo 3), y **Tabla 11** (Véase el Anexo 4), se muestran las propiedades físicas de los giroides donde el volumen total es 6877mm³, y el porcentaje de porosidad se obtiene de la **Ecuación 10**.

Tabla 10

Variación del porcentaje de porosidad de un giroide con N constante

Giroide de 23x23x13 mm

Obtención del valor de porosidad para n=0.4

	N04 C-09	N04 C-05	N04 C01	N04 C05	N04 C09
V_S	1381.68 mm ³	2292.87 mm ³	3656.98 mm ³	4564.03 mm ³	5471.36 mm ³
n	79.9%	66.7%	46.8%	33.6%	20.4%
	Anexo 3-a	Anexo 3-b	Anexo 3-c	Anexo 3-d	Anexo 3-e

Nota: Se muestra las propiedades físicas y porcentaje de porosidad cuando el valor N de los giroides permanece constante. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Tabla 11

Variación del porcentaje de porosidad de un giroide con C constante

Giroide de 23x23x13 mm

Obtención del valor de porosidad para C=0.1

	N04 C01	N06 C01	N08 C01	N1 C01
V_s	3643.02 mm ³	3622.39 mm ³	3628.89 mm ³	3619.98 mm ³
n	47.02%	47.32%	47.23%	47.36%
	Anexo 4-a	Anexo 4-b	Anexo 4-c	Anexo 4-d

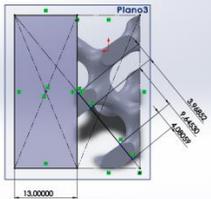
Nota: Se muestra las propiedades físicas y porcentaje de porosidad cuando el valor C de los giroides permanece constante. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

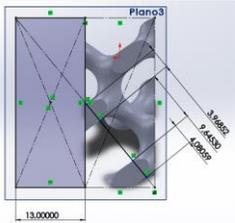
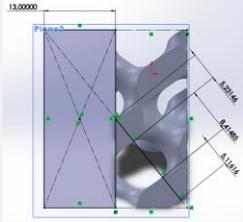
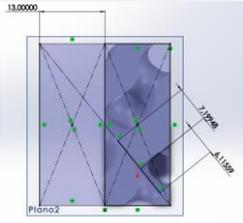
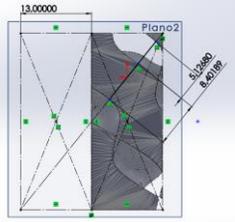
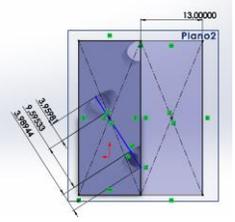
Para la obtención de la relación entre la dimensión del radio del poro d_p , y las dimensiones del soporte d_s , se procede a utilizar un software CAD. En la **Tabla 12** y **Tabla 13** se muestran las mediciones realizadas a cada uno de los giroides y mediante la **Ecuación 11**, se obtiene la relación entre el radio del poro y el tamaño del soporte.

Tabla 12

Medición del radio y tamaño de soporte del poro con N constante

Obtención de la relación: dimensiones del poro y soporte para N=0.4

		d_p	d_s	ξ
N04C-09		9.64	4.02	2.398

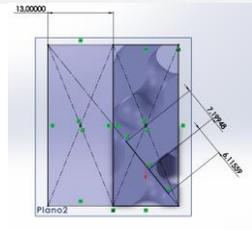
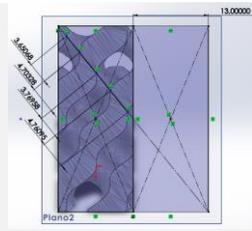
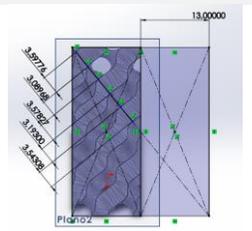
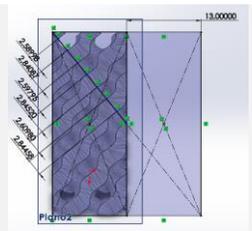
		d_p	d_s	ξ
N04C-09		9.64	4.02	2.398
N04C-05		8.41	5.17	1.626
N04C01		6.11	7.19	0.849
N04C05		5.12	8.40	0.609
N04C09		3.95	9.59	0.411

Nota: Se toma un valor promedio para obtener la relación entre ellas a pesar de que las medidas no sean iguales. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Tabla 13

Medición del radio y tamaño de soporte del poro con C constante

Giroide de 23 x 23 x 13 mm obtención de la relación entre dimensiones del poro y soporte para $C=0.4$

		d_p	d_s	ξ
N04 C01		6.11	7.19	0.849
N06 C01		3.70	4.73	0.782
N08 C01		3.13	3.57	0.876
N1 C01		2.60	2.84	0.915

Nota: A pesar de que las medidas del radio y tamaño del soporte del poro para un mismo giroide no sean exactamente iguales se toma un valor promedio de las mismas para obtener la relación entre ellas. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

3.2.2. Cálculo de porosidad para período constante $N=0.4$

Por medio de un ajuste polinómico a grado 3 en el software GeoGebra Online con los datos obtenidos en la **Tabla 8** de la constante de nivel y en la **Tabla 10** del porcentaje de porosidad, se procede a generar la **Ecuación 32**, como se muestra claramente en la **Figura 24**.

$$C = 0.091n^3 - 0.121n^2 - 2.981n + 1.512$$

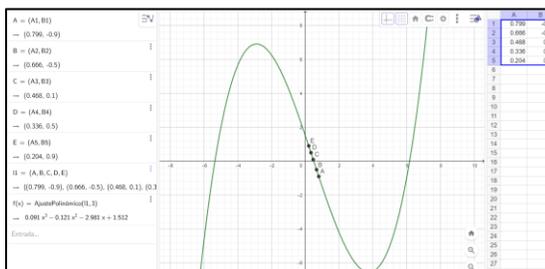
Ecuación 32

Relación
constante de
nivel y porosidad

Por medio de la **Ecuación 32** se puede obtener una relación entre el porcentaje de porosidad y la constante de nivel C , es importante que para definir completamente una estructura TPMS con forma de giroide se requieren tres datos.

Figura 24

Ajuste polinómico de grado 3



Nota: Este ajuste se realizará con el período constante $N=0.4$. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

3.3. Diseño y construcción de la caja de control

Se requiere un software de diseño CAD, en este caso será SolidWorks 2020 SP3, con la versión estudiantil, que fue adquirida por los tesisistas para su desarrollo.

En **Tabla 14** se realiza una comparativa entre las tarjetas de control más usadas en el desarrollo de proyectos actualmente, se implementará tres alternativas calificándolas con un valor de “+1”, “0” y “-1”, con la finalidad de que sean evaluadas con más parámetros y en base a ellos, la que ofrezca más beneficios será la ideal.

Tabla 14

Selección de la tarjeta de control

<u>Criterio</u> <u>de</u> <u>selección</u>	<u>Arduino</u> <u>UNO R3</u> 	<u>Arduino</u> <u>MEGA</u> 	<u>Raspberry</u> <u>Pi 3</u> 
<i>Bajo costo</i>	+1	0	-1
<i>Soporte</i>	+1	+1	0
<i>Periféricos</i>	+1	+1	-1
<i>Lenguaje</i>	+1	+1	+1
<i>Respuesta</i>	0	0	+1
<i>Evaluación</i>	4	3	0

Nota: Se indica la comparativa entre las tarjetas de control más utilizados en el mercado para el desarrollo de bombas peristálticas. Tomado de: (Boxer GmbH, 2020)

Es importante señalar que para el desarrollo la selección de la tarjeta de control se ha realizado con un enfoque únicamente al tema general de este proyecto, por lo que la mejor opción que se consideró es el Arduino UNO R3.

Adicionalmente es necesario considerar los componentes que se van a utilizar, con la finalidad de conseguir un diseño óptimo y a la vez aprovechar todo el espacio del mismo con una distribución adecuada del mismo, para lo que es indispensable visualizar la **Tabla 15**, en la misma que se indicarán a detalle los elementos utilizados, que deberán estar incluidas en la estructura del sistema de control.

Tabla 15

Componentes a usar en la caja de control

Detalle	Cantidad	Característica
<i>Fusible</i>	1	2 Amp
<i>Arduino</i>	1	UNO R3
<i>Interruptor</i>	1	125 Vac – 10 Amp
<i>Ventilador 12V</i>	1	12 Vcc
<i>Pantalla Nextion</i>	1	“5 inch” NX8048T050
<i>Fuente de 5 Vcc</i>	1	110 Vac - 5 Vcc
<i>Fuente de 6 Vcc</i>	1	12 Vcc - 6 Vcc
<i>Fuente de 12 Vcc</i>	1	110 Vac - 12 Vcc
<i>Conector de la Fuente</i>	1	Trifásico

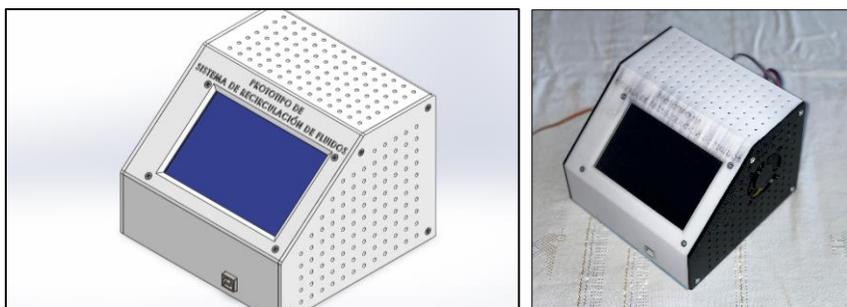
Nota: En la tabla se muestran los componentes a utilizar en el desarrollo de la caja de control para poder obtener un diseño óptimo de la misma. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Una vez que se han considerado todos los componentes que van a integrar la caja de control se procede a identificar un diseño óptimo, el mismo que, debido a la pantalla que servirá de interfaz con el usuario, tendrá que mantener una ubicación idónea para un mejor manejo del prototipo.

En la **Figura 25**, se puede observar el diseño y su modelo fabricado en impresión 3D, que mejor se adecuó a las necesidades mencionadas, además que debido a la disposición de sus componentes la ventilación será de gran ayuda.

Figura 25

Estructura de la caja de control



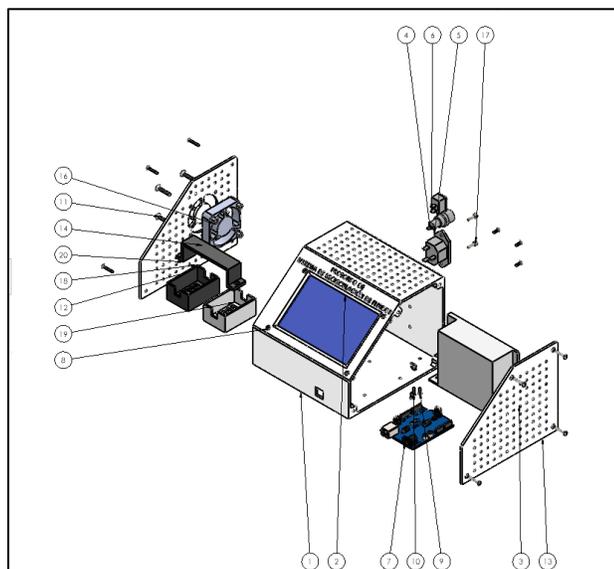
Nota: Se muestra la caja de control del prototipo general, donde está contenida toda la electrónica Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Internamente la caja de control, como se indicó en la **Tabla 15**, tiene algunos materiales, en la **Figura 26**, se muestra una vista explosionada con la finalidad de indicar a detalle el lugar en donde están ubicados los componentes antes mencionados,

y posteriormente se mostrará en la **Tabla 16**, todo lo usado para el ensamblaje de la caja de control.

Figura 26

Vista explosionada de la caja de control



Nota: Está indicada la vista explosionada de la caja de control, la misma que está señalada con globos para su posterior identificación. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Tabla 16

Componentes internos de la caja de control

N° de elemento	Detalle	Cantidad
1	Caja	1
2	Pantalla Nextion	1
3	Fuente de 12 Vcc	1

N° de elemento	Detalle	Cantidad
4	<i>Porta Fusible</i>	<i>1</i>
5	Conector Fuente	<i>1</i>
6	<i>Interruptor</i>	<i>1</i>
7	<i>Arduino UNO</i>	<i>1</i>
8	<i>Pernos M3x0.5x16</i>	<i>12</i>
9	<i>Pernos M3x0.5x8</i>	<i>5</i>
10	<i>Pernos M3x0.5x10</i>	<i>5</i>
11	<i>Pernos M4x0.7x20</i>	<i>4</i>
12	<i>Tapa lateral izquierda</i>	<i>1</i>
13	<i>Tapa lateral derecha</i>	<i>1</i>
14	<i>Ventilador 12V</i>	<i>1</i>
15	<i>Tuerca hexagonal M3x0.5</i>	<i>19</i>
16	<i>Tuerca hexagonal M4x0.7</i>	<i>4</i>
17	<i>Tuerca hexagonal M3x0.5</i>	<i>2</i>
18	Fuente de 5 Vcc	<i>1</i>
19	Fuente de 6 Vcc	<i>1</i>
20	<i>Agarre de fuentes</i>	<i>1</i>

Nota: Componentes internos y externos utilizados en la construcción de la caja de control. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

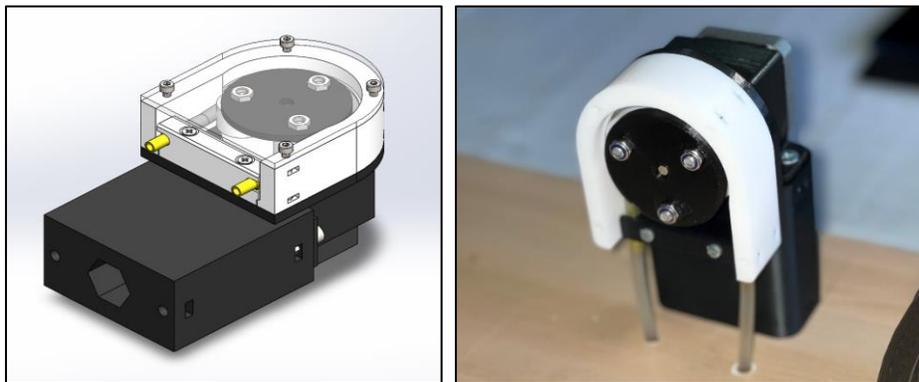
3.4. Diseño y construcción de la bomba peristáltica

Para el diseño de la bomba peristáltica es importante iniciar con el bosquejo mostrado en la **Figura 15**, que indica las medidas reales de diseño.

Por esta razón se ha desarrollado un modelo 3D, que, aparte de ser agradable visualmente, tiene un correcto desempeño en lo que corresponde a la recirculación de fluidos; en la **Figura 27**, se muestra el diseño de la bomba peristáltica.

Figura 27

Estructura de la bomba peristáltica



Nota: Se muestra la caja de control del prototipo general, donde está contenida toda la electrónica. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

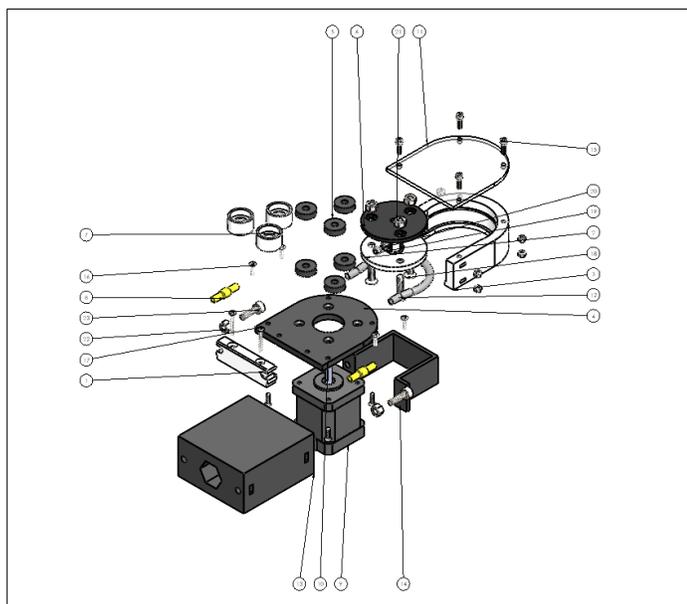
Para una mayor comprensión del tema, y del diseño es importante indicar una vista explosionada de la misma, para lo cual en la **Figura 28**, se muestra una enumeración por globos para cada componente, con la finalidad de que se pueda interpretar de mejor manera la ubicación y distribución de los componentes de la bomba peristáltica. Adicionalmente en la **Tabla 17**, se indican todos los materiales usados para su construcción.

Es importante indicar que como se trata de un prototipo, la mayoría de sus componentes han sido realizados en impresión 3D tanto FMS como SLA, y algunos en

láminas de acrílico, es importante entender el funcionamiento de la bomba peristáltica para que sus componentes puedan ser ubicados de una manera adecuada dentro de su estructura.

Figura 28

Vista explosionada de la bomba peristáltica



Nota: Está indicada la vista explosionada de la bomba peristáltica, la misma que está señalada con globos para su posterior identificación. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Tabla 17

Componentes de la bomba peristáltica

N° de elemento	Detalle	Cantidad
1	<i>Abrazadera</i>	1
2	<i>Base de rodillos</i>	1

N° de elemento	Detalle	Cantidad
3	Conjunto de alojamiento	1
4	Plato de montura	1
5	Rodamientos 5x5x16	6
6	Tapa de rodillos	1
7	Sostén del rodamiento	3
8	Conector	2
9	Motor nema 17	1
10	Eje motor nema 17	1
11	Tapa de acrílico	1
12	Manguera	1
13	Base de motor	1
14	Pinza base de motor	1
15	Pernos M3x0.5x10	4
16	Pernos M3x0.5x5	1
17	Pernos M5x0.8x16	2
18	Pernos M3x0.5x10	8
19	Pernos M3x0.5x20	2
20	Pernos M5x0.8x20	3
21	Tuerca hexagonal M3x0.5	11
22	Tuerca hexagonal M5x0.8 Estilo 2	2
23	Tuerca hexagonal M5x0.8 Estilo 1	3

Nota: En la tabla se muestran los componentes a utilizar en la construcción de la bomba peristáltica para poder obtener un diseño óptimo. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

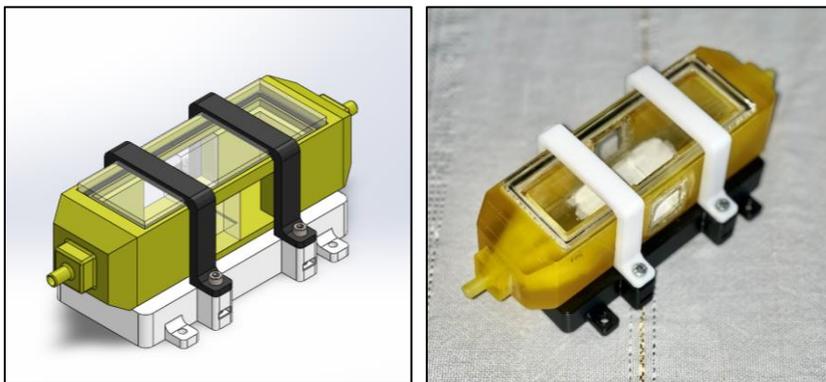
3.5. Diseño y construcción de la recámara de perfusión

Para el diseño de la recámara de perfusión, es importante tener en cuenta tanto la estructura TPMS, y el flujo laminar que recorrerá a través de ella.

Las pruebas que se realizaron hasta llegar al modelo que se observa en la **Figura 29**, fueron minuciosas, por lo que este diseño fue el más adecuado debido a los resultados obtenidos. Se observa que en el cuerpo donde recorrerá el fluido tiene unos espacios, esto es debido a que para su análisis se ubicará un microscopio en tres posiciones alrededor de la misma, por lo que se ha elegido el acrílico para lograr sellarla de mejor manera y un “o-ring” que servirá a manera de empaque y así evitar fugas de líquido. Como último detalle a considerar en este apartado es que la base de la recámara es necesaria para que el microscopio pueda cumplir su función y analizar los laterales de la recámara.

Figura 29

Estructura de la recámara de perfusión

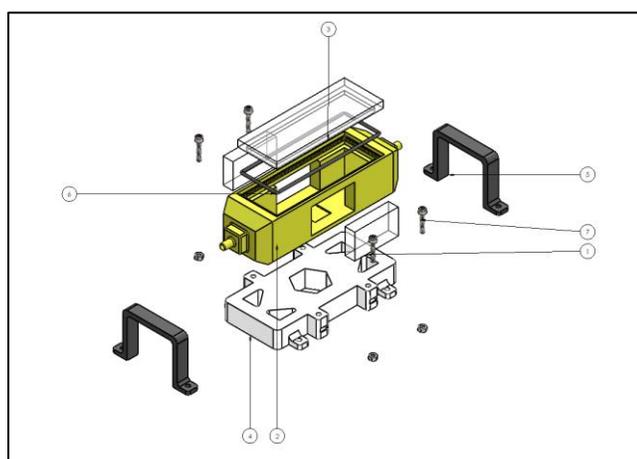


Nota: Se muestra la vista isométrica de la recámara de perfusión. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

A manera de tener una mejor comprensión del ensamble de la recámara de perfusión, se detalla en la **Figura 30**, una vista explosionada, con la cual resulta más factible el análisis de este diseño. Además, en la **Tabla 18**, se detallan cada uno de los componentes utilizados.

Figura 30

Vista explosionada de la recámara de perfusión



Nota: Los globos indicados alrededor de la vista explosionada son ubicados para señalar las partes de la recámara. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Tabla 18

Componentes de la recámara de perfusión

N° de elemento	Detalle	Cantidad
1	<i>Acrílico lateral</i>	2
2	<i>Cuerpo</i>	1
3	<i>Tapa de acrílico</i>	1
4	<i>Base de la recámara</i>	1

N° de elemento	Detalle	Cantidad
5	<i>Enganche de la base</i>	2
6	<i>O-Ring de sellado</i>	1
7	<i>Pernos M3x0.5x16</i>	4
8	<i>Tuerca hexagonal M3x0.5</i>	4

Nota: Componentes internos y externos utilizados en la construcción de la caja de control. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

3.6. Diseño y construcción del mecanismo del microscopio

El desarrollo del mecanismo que sostendrá el microscopio es el encargado de mantener una posición fija para realizar la adquisición de datos y su posterior análisis con visión artificial.

Como se indica en la **Figura 31**, el mecanismo consta de un brazo encargado de transmitir el movimiento, por lo que en la **Tabla 19**, se hace una comparación de estas tres alternativas calificándolas con un valor de “+1”, “0” y “-1”, como se mencionó anteriormente, este método se ha elegido con el propósito de escoger una solución adecuada para los diferentes escenarios a los que se puede someter este prototipo.

Es importante mencionar que el giro que tendrá que realizar el motor está comprendido entre 0 y 180°.

Tabla 19

Selección de motor para el mecanismo de giro del microscopio

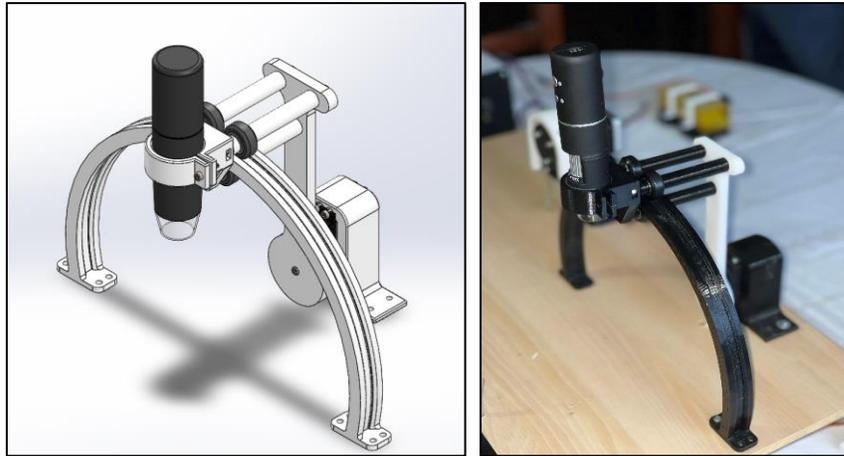
<u>Criterio</u> <u>de</u> <u>selección</u>	<u>Motor a pasos</u>	<u>Servo motor</u>	<u>Motor DC con escobillas</u>
<i>Bajo costo</i>	0	-1	+1
<i>Durabilidad</i>	+1	+1	+1
<i>Precisión</i>	+1	+1	-1
<i>Peso bajo</i>	+1	-1	+1
<i>Alto torque</i>	+1	+1	-1
<i>Disponibilidad</i> <i>mercado local</i>	+1	0	+1
<i>Evaluación</i>	6	3	3

Nota: Se indica la comparativa entre los motores más utilizados en el mercado para el desarrollo de bombas peristálticas. Tomado de: (Boxer GmbH, 2020)

Una vez que se realizó el análisis correspondiente, se pudo determinar que el motor que más se acopla a las necesidades del mecanismo es un servomotor, debido a la precisión y al torque que debe entregar al brazo de transmisión. En la **Figura 31**, se indica el diseño del mecanismo que servirá para el correcto movimiento del brazo y servirá para un posicionamiento preciso en la estructura, y en la **Figura 32**, se indicará la visa explosionada de la misma.

Figura 31

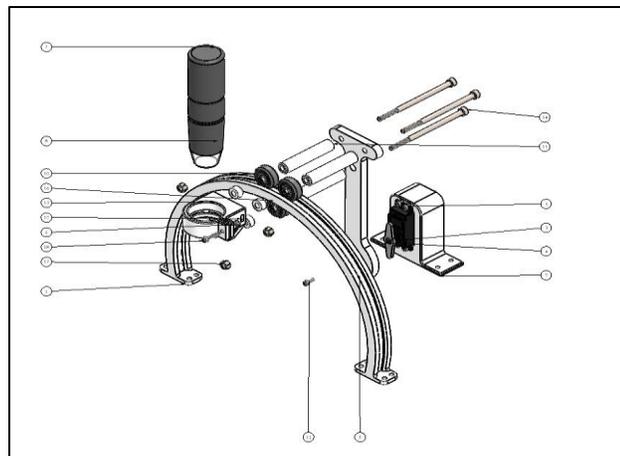
Estructura del mecanismo del microscopio



Nota: Se muestra la estructura del mecanismo que dará el movimiento al microscopio para el análisis en las 3 posiciones. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Figura 32

Vista explosionada del mecanismo del microscopio



Nota: Se presenta la vista explosionada de los componentes que contiene el mecanismo del microscopio. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

En la **Tabla 20**, se indica a detalle los globos numerados en la vista explosionada del mecanismo del microscopio.

Tabla 20

Componentes internos de la caja de control

N° de elemento	Detalle	Cantidad
1	<i>Base de rodamientos</i>	1
2	<i>Ensamblaje del servo</i>	1
3	<i>Microscopio</i>	1
4	<i>Brazo de transmisión</i>	1
5	<i>Llanta para rodamiento</i>	3
6	<i>Separador brazo - microscopio</i>	3
7	<i>Separador microscopio - brazo</i>	3
8	<i>Soporte microscopio</i>	1
9	<i>Pernos M5x0.8x90</i>	3
10	<i>Pernos M3x0.5x8</i>	1
11	<i>Pernos M3x0.5x16</i>	1
12	<i>Rodamientos 05x05x16</i>	6
13	<i>Tuerca hexagonal M5x0.8</i>	3
14	<i>Tuerca hexagonal M3x0.5</i>	1

Nota: Componentes del mecanismo del microscopio, utilizados para la construcción del mismo. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

CAPÍTULO IV

4. SISTEMA DE CONTROL Y ANÁLISIS DE PARTÍCULAS

4.1. Interfaz gráfica

En el diseño de la interfaz gráfica con el usuario se establecen ventanas que mostrarán información relevante, para ello se hace uso de una pantalla Nextion de 5 pulgadas modelo NX8048T050 la misma que mediante comunicación serial transmite información con el microcontrolador.

La interfaz cuenta con 4 ventanas que se manipulan mediante el touch de la pantalla, de manera muy intuitiva se genera un avance entre cada una de ellas ingresando los datos requeridos, en la **Figura 33**, se muestra la pantalla inicial que se activa al encender el equipo en ella se encuentran los datos de presentación de los creadores, así como la institución y el nombre del equipo. Además de los botones que permitirán un avance entre cada una de las pantallas.

Figura 33

Pantalla principal de la caja de control



Nota: Simboliza el esquema de la pantalla que aparecerá al encender la caja de control.

Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

En la **Figura 34**, se muestran 3 botones en la parte superior a manera de gráficos, los mismos que indican la posición del microscopio visto de manera frontal. Adicionalmente se ha incorporado un botón de llenado con una duración de 60 segundos para la recámara debido a que es necesario realizar este procedimiento previo al análisis de las partículas, así como de un botón “STOP” en el caso que sea necesario.

Figura 34

Pantalla N°2 control de posición y llenado de recámara



Nota: La segunda pantalla indica los procedimientos necesarios que se deben realizar antes de proceder al análisis de las estructuras TPMS. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

La **Figura 35**, muestra la pantalla 3 que permite ingresar el valor de caudal a la cual la bomba peristáltica debe trabajar, este es un valor comprendido entre 10 y 250ml/min. De la misma forma permite el ingreso del tiempo a funcionar por parte de la bomba peristáltica.

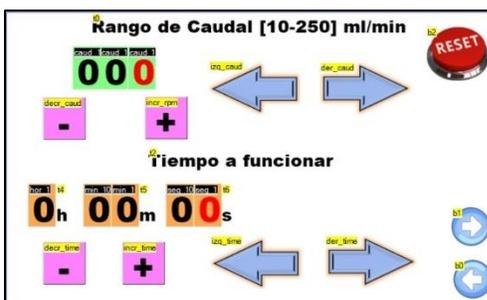
El ingreso de los datos depende de los botones mostrados en pantalla se encuentran dos flechas que permiten intercambiar entre los diferentes valores de

decimas y centenas, además de otro par de botones que permitirán incrementar y decrementar los valores.

Se encuentra también un botón de “RESET” ubicado en la parte superior derecha de la pantalla, que eliminará todos los datos ingresados en esa pantalla en el caso de existir algún cambio total.

Figura 35

Pantalla N°3 control del caudal y tiempo



Nota: Da la facilidad de elegir el tiempo que permanecerá encendido el prototipo y se podrá ingresar el valor del caudal. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

La **Figura 36**, muestra la pantalla 4 que replica los datos adquiridos en la pantalla anterior además de que se muestran 3 flechas las cuales permiten desplazar el mecanismo del servo a las posiciones que muestran en pantalla. Los datos no se envían al microcontrolador hasta que se pulse el botón “START”. En ese instante empieza un contador que llega hasta el tiempo establecido, en el caso de ser necesario se dispone de un botón “STOP” que al ser presionado generará una pausa hasta que se pulse el botón “start” nuevamente.

Figura 36

Pantalla N°4 visualización del contador y variables de funcionamiento



Nota: Se muestra la primera capa a imprimir, donde la sección con verde será la que se solidificará en la impresión. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

4.2. Configuración de tarjetas y software de desarrollo

Finalizada la parte estructural y la conexión de los componentes electrónicos se procede a realizar las configuraciones de la tarjeta de control, la cual es un Arduino UNO conectado a una CNC Shield.

Para el desarrollo del proyecto se utilizó el software de Arduino y el programa Nextion y para establecer una comunicación entre ellos se utiliza comunicación serial a través de los puertos TX y RX del arduino. Dado que el arduino UNO posee solo un puerto de comunicación es necesario crear un puerto serial virtual a través de las librerías del arduino. Con ello se consigue establecer los pines 2 y 3 como un puerto de comunicación serial y liberar el puerto de comunicación principal para que el microcontrolador pueda ser reprogramado sin complicaciones. Para la comunicación del servo con el microcontrolador se utiliza la librería "servo.h" que facilita la programación del servo y por consiguiente la posición del mecanismo del microscopio.

4.3. Desarrollo del código

El lenguaje de programación que se utilizó es C, en el entorno de Arduino IDE para la tarjeta arduino UNO; mientras que para la pantalla Nextion se utilizó el software propio llamado “Nextion editor” cuyo lenguaje de programación se basa en C++.

4.3.1. Código de la tarjeta de control

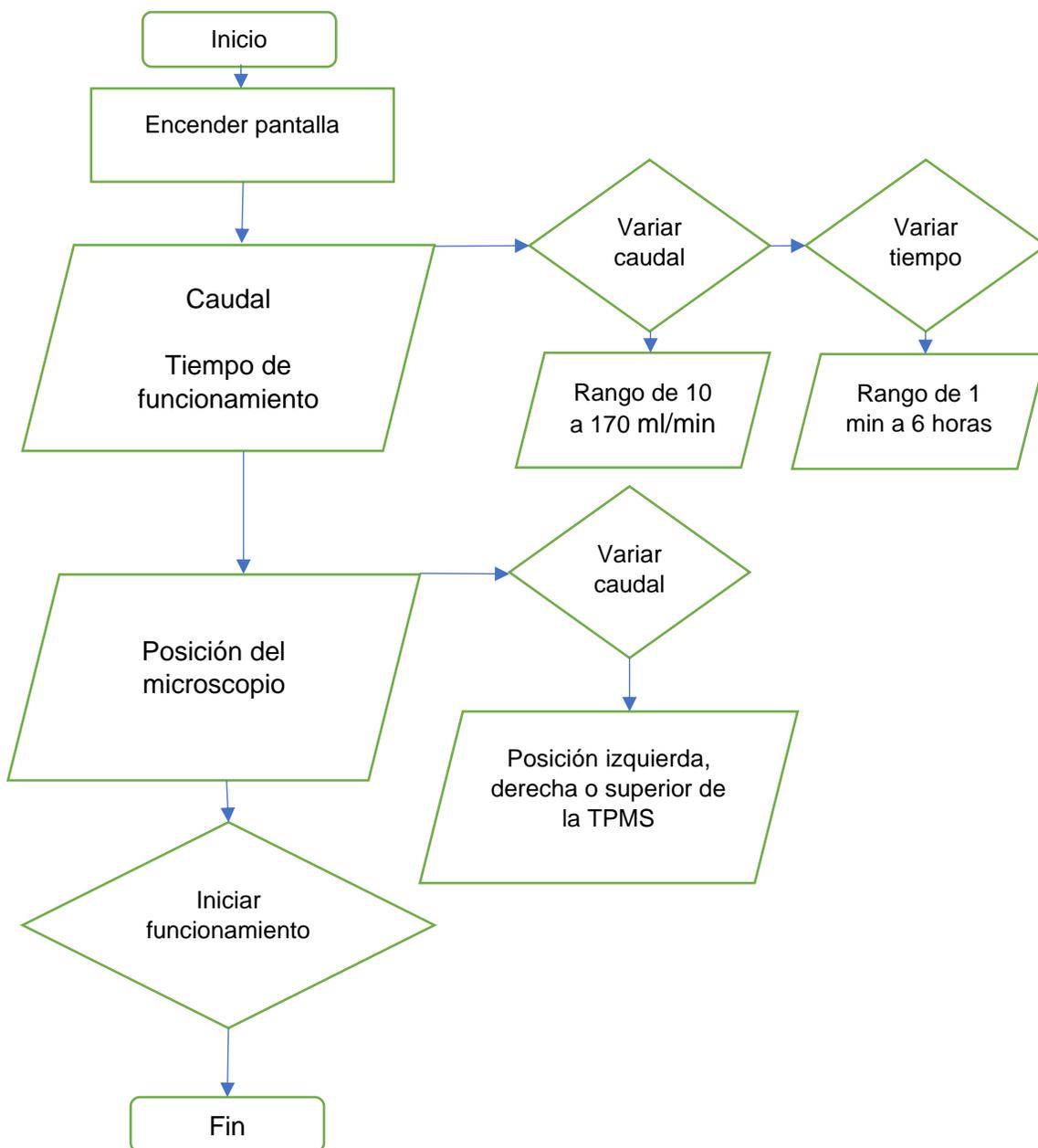
En la **Figura 37**, se muestra el diagrama de flujo del algoritmo de programación implementado en el prototipo del sistema de recirculación de fluidos.

La programación de la tarjeta de control en conjunto con la misma, será la encargada de controlar la bomba peristáltica y de regular el tiempo de funcionamiento, dentro del algoritmo para el microcontrolador está como una característica principal la comunicación con la pantalla Nextion y la inicialización de las variables que permitirán el correcto funcionamiento del prototipo.

En la **Figura 38**, se observa la inclusión de las librerías que permiten el control del servo y la creación de un puerto serial virtual, y la inicialización de las variables necesarias para el funcionamiento correcto del programa. En la **Figura 39**, se establece los pines de entrada y salida, así como el valor inicial de las señales.

Figura 37

Diagrama de flujo del prototipo



Nota: Muestra el proceso que se desarrollará desde que se enciende la pantalla, y las diversas alternativas que se podrían tomar. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Figura 38

Inclusión de librerías en arduino

```
#include <Servo.h>
#include <SoftwareSerial.h>

SoftwareSerial Serial_1 (3, 2); // Crea nueva conexion- Pin3(RX) a TX y Pin2(TX) a RX
Servo myservo; // create servo object to control a servo

int posicion = 0;
//Pines fisicos a los cuales estan conectadas las señales del driver TB6600
int STEP = 4; //Pin para la señal de pulso
int DIR = 7; //define Direction pin
int EN = 8; //define Enable Pin
char a;
//variables programa
float valor_FRECUENCIA_CAUDAL = 0;
float valor_caudal = 0;
```

Nota: Se indica el encabezado del programa, conjuntamente con las variables a trabajar. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Figura 39

Definición de los pines de entrada y salida

```
void setup() {
  //Serial.begin(9600);
  Serial_1.begin(9600);

  myservo.attach(9);
  pinMode (STEP, OUTPUT); //inicializacion variables motor a pasos
  pinMode (DIR, OUTPUT); //inicializacion variables motor a pasos
  pinMode (EN, OUTPUT); //inicializacion variables motor a pasos

  digitalWrite(EN, HIGH); //apago las bobinas del motor a pasos
  digitalWrite(DIR, HIGH); // ingreso una dirección de avance del motor
}
```

Nota: Se establecen los pines de comunicación con el motor a pasos, y su valor booleano. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Es necesario contar con una ecuación que relaciones un valor de frecuencia con el caudal necesario para el funcionamiento de la bomba peristáltica, por lo que en la **Tabla 21**, se presenta un grupo de mediciones realizadas a manera de pruebas para obtener estos valores.

Tabla 21*Relación frecuencia-tiempo-volumen*

Proceso realizado con 1/32 de paso

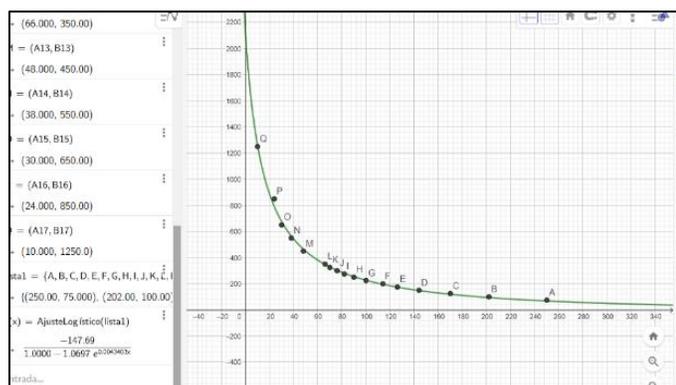
Frecuencia	Tiempo (s)	Volumen (ml)	Caudal (ml/min)
75	30	125	250
100	30	101	202
125	30	85	170
150	30	72	144
175	30	63	126
200	30	57	114
225	30	50	100
250	30	45	90
275	30	41	82
300	30	38	76
325	30	35	70
350	30	33	66
450	30	24	48
550	30	19	38
650	30	15	30
850	30	12	24

Nota: Se hace un total de 17 mediciones con un valor constante de tiempo, con la finalidad de encontrar una ecuación adecuada Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Al obtener todos estos valores se generan pares entre la frecuencia y el valor de caudal. Mediante el software GeoGebra al ingresar esta lista de puntos se puede generar un ajuste logarítmico en base a esta lista, como se observa en la **Figura 40**.

Figura 40

Gráfica en función constante de tiempo y volumen en ml



Nota: Al tratar de unir dichos puntos a través de una ecuación, el ajuste logarítmico es el que proporciona mayor grado de aceptabilidad. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Con los datos obtenidos de la **Figura 40**, se logró obtener una ecuación que relaciona la frecuencia con el caudal, la misma que se expresa en la **Ecuación 33**.

$$y = \frac{-147.69}{1 - 1.0697e^{0.0043403 * X}}$$

Ecuación 33

Frecuencia en

función del

caudal

Donde “y” es el valor de frecuencia y “x” es considerado como el valor del caudal. La **Ecuación 33** se procede a ingresarla dentro del programa de arduino como se muestra en la **Figura 41**, para que mediante el ingreso del valor de caudal se calcule la frecuencia.

Figura 41

Ingreso de la ecuación de frecuencia en función del caudal

```
void loop() {
  if (Serial_1.available() > 0)
  {
    String Received = Serial_1.readString();
    valor_caudal = float(Received[1]) * 100 + float(Received[5]) * 10 + float(Received[9]) + float(Received[13]) / 10;
    //Serial.println(valor_caudal);
    valor_FRECUENCIA_CAUDAL = -(147.69 / (1 - 1.0697 * exp(0.0043403 * valor_caudal)));
    a = Received[0];
  }
  if (a == 'm')
  {
    if (valor_caudal > 0)
    {
      //Serial.println("Mtores encendidos...");
      digitalWrite(EN, LOW);
      digitalWrite(STEP, HIGH); // Sube el pin STEP
      delayMicroseconds(valor_FRECUENCIA_CAUDAL / 2); // Mitad del periodo
      digitalWrite(STEP, LOW); // Vuelve a bajarlo
      delayMicroseconds(valor_FRECUENCIA_CAUDAL / 2); // La otra mitad
    }
    if (valor_caudal == 0)
    {
      digitalWrite(EN, HIGH);
      //Serial.println("Mtores pagados...");
    }
  }
}
```

Nota: No se genera un ingreso directo al programa debido a que está a la espera de la recepción de un carácter por parte de la pantalla, a través de la comunicación serial.

Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Mediante la selección en la pantalla de la configuración del mecanismo del microscopio se envía un carácter que ayuda a determinar qué proceso seguir y el valor al cual posicionarse por parte del servo, como se muestra en la **Figura 42**.

Figura 42

Envío de la posición del servo

```

}
}
if (a == 's')
{
    posicion = valor_caudal;
    myservo.write(posicion);
}
}

```

Nota: Los valores de la posición del servo serán 3 y estarán regulados por el envío de datos por medio de la pantalla. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

4.4. Análisis de partículas en las estructuras porosas

En este apartado se hará una breve introducción, de cómo se obtendrán datos precisos, en cuanto a las imágenes a analizar por medio del software ImageJ (FIJI). Para empezar con el análisis, se deberá inicializar el programa ya mencionado que es ImageJ (FIJI), el mismo que una vez ejecutado se mostrará como indica la **Figura 43**.

Figura 43

Inicialización software ImageJ (FIJI)

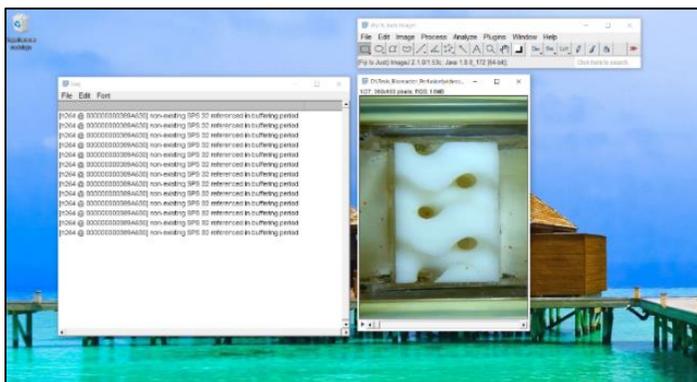


Nota: Pantalla principal del software FIJI en la que se muestra los distintos menús para trabajar. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

La finalidad de ejecutar este software es para poder analizar un video, en el cual se debe reconocer el movimiento de las partículas, por lo que se debe importar el video requerido, de preferencia en formato .avi o .mp4, a continuación, aparecerá una pantalla temporal en la que indica si desea activar el “VIRTUAL STACK” y se activa para que no exista ningún tipo de interferencia. En la **Figura 44**, se muestra el video importado en el software ImageJ (FIJI), junto con una ventana de errores la misma que será despreciable, ya que únicamente son errores de compatibilidad que no afectaran en las características originales del video.

Figura 44

Video importado en ImageJ (FIJI)

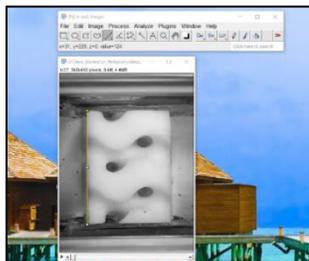


Nota: Ingreso de video principal, se puede observar un error de proporción con respecto a la imagen real (Lascano, Navas, 2020)

El formato con el que se carga el video es RGB, sin embargo, es importante convertir el video a un formato de 8 bits, luego se debe calibrar la imagen para que los datos a calcular sean correctos, es por eso que en la **Figura 45**, se traza una línea entre el punto inicial y final de la estructura, procurando que sea lo más recto posible.

Figura 45

Patrón de medida en el software

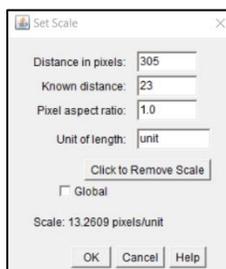


Nota: Al modificar la imagen RGB a una imagen de 8 bits el peso del archivo a trabajar reduce drásticamente. (Lascano, Navas, 2020)

La línea seleccionada, corresponde con la medida original de un lateral de la estructura porosa, por lo que se debe indicar al programa, en la **Figura 46**, se muestra la configuración de la distancia conocida que se debe cambiar, este proceso se lo realiza debido a que la estructura porosa al ser diseñada aparte, consta de medidas concretas que son conocidas y que servirán para este análisis.

Figura 46

Set de la escala de la estructura porosa



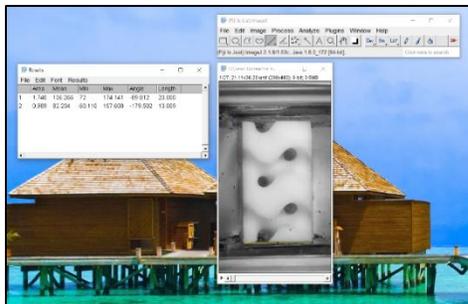
Nota: Valores a modificar para establecer un patrón de medida y que así el software reconozca la medida de pixeles. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Una vez que se ha corregido el valor hay que considerar que la imagen real ha sido afectada, entonces se realiza nuevamente una medición, pero esta vez se tomará de referencia el lado horizontal de la estructura, que en este caso es 17.23mm, lo cual es una clara diferencia con respecto al valor real de la pieza que es de 13mm. Esto se debe a que al momento de grabar la resolución de la cámara no es la adecuada para capturar los pixeles acordes a lo real, para lo cual se procede a cambiar el tamaño de la imagen en su valor horizontal. Para cambiar el tamaño de la imagen se debe realizar un cambio en el tamaño, donde primero se desactiva la opción de la relación de aspecto.

Posteriormente se modifica únicamente el valor horizontal con el valor de 280, el mismo que permite mantener una relación de aspecto muy similar a la original; en la **Figura 47**, se muestran los valores, que se pueden visualizar al momento de analizar las medidas.

Figura 47

Medidas reales de la pieza



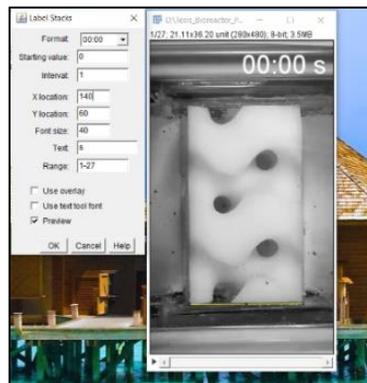
Nota: La imagen recupera su valor proporcional correcto con respecto a las medidas reales de la estructura TPMS. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

En este punto se ha terminado de preparar la imagen para su posterior análisis, posteriormente se prepara el video para una mejor visualización y se establece el valor de tiempo en el apartado de etiqueta incluido en la pestaña de imagen. Aquí aparecerá una nueva ventana que deberá asemejarse a la que se muestra en la **Figura 48**.

Si se seleccione el botón “PREVIEW” se puede observar de forma previa el mensaje de tiempo que aparecerá, además, los recuadros que aparecen para completar ayudarán a ubicar este mensaje de una manera adecuada en la que no interfiera con la visualización del video.

Figura 48

Etiqueta de tiempo en el video



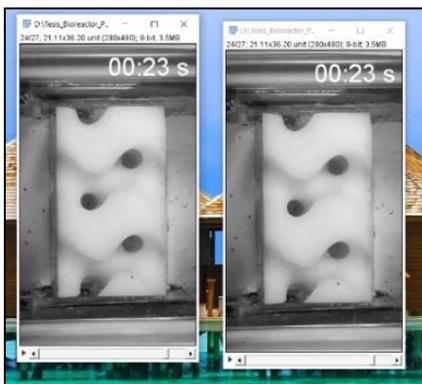
Nota: Las características a colocar dentro de la ventana deben ser semejantes a las mostradas en la figura, así se obtendrá un tamaño y disposición de texto adecuado.

Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Es necesario duplicar la imagen debido a posibles errores al momento de continuar con el programa que, en lugar de repetir nuevamente el proceso, se podrá partir de este punto, por lo que al dar clic derecho sobre la imagen se despliega un menú para duplicar la imagen como se muestra en la **Figura 49**.

Figura 49

Imágenes duplicadas



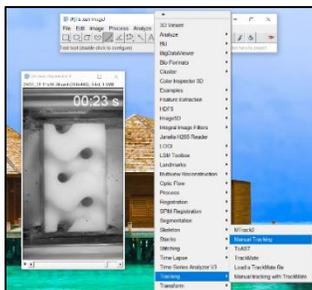
Nota: Este procedimiento es necesario, debido a que si existe algún error se deberá repetir todos los pasos anteriores. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

4.4.1. Rastreo de la trayectoria de la partícula

Para realizar el rastreo de la partícula se procede a utilizar el plugin de rastreo manual. Este permitirá dar clic sobre la partícula de la cual se necesita realizar el rastreo en cada frame del video. Al finalizar se genera una muestra de valores que se pueden exportar a Excel para su posterior análisis, en la **Figura 50**, se observa en donde se encuentra el comando de la trayectoria.

Figura 50

Visualización de la trayectoria de una partícula

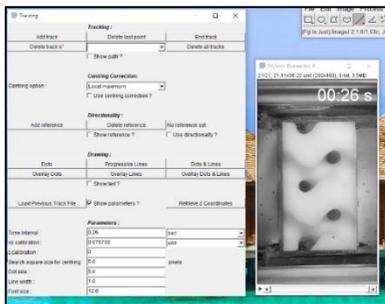


Nota: Se visualiza la opción de trayectoria, donde se elegirá la trayectoria manual por efectos de conveniencia. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Posteriormente aparecerá una ventana como se muestra en **Figura 51**, la cual muestra distintos parámetros para generar la trayectoria y mostrar los datos requeridos para este análisis, donde el primer valor a cambiar es el tiempo de duración del video, luego se introduce el valor de los milímetros por cada píxel y en el valor de “z” se colocará “0”, debido a que se estaría haciendo un análisis en 2 dimensiones.

Figura 51

Parámetros para generar la trayectoria

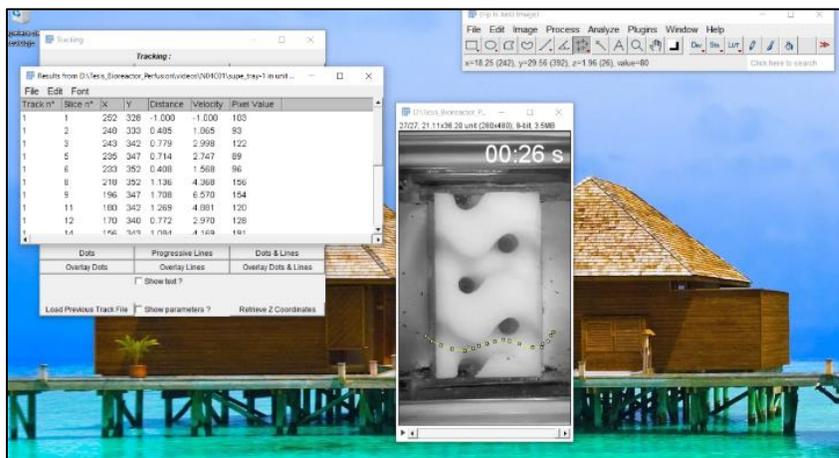


Nota: Se debe modificar únicamente los tres primeros parámetros. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

El análisis de la trayectoria manual lleva este nombre debido a que se dará un clic por cada lugar que vaya recorriendo la partícula, generando así una tabla de datos como se muestra en la **Figura 52**.

Figura 52

Tabla de datos de la trayectoria

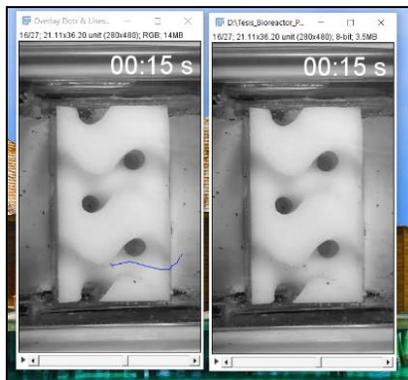


Nota: Es importante exportar estos datos para poder visualizar en un documento de cálculo, por lo que el software permite exportar en formato CSV. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

En la **Figura 53**, se observa que, una vez realizado este procedimiento se puede reproducir el video, pero ahora aparecerá una trayectoria que seguirá a la partícula en cada instante de su recorrido.

Figura 53

Seguimiento de la partícula con trayectoria



Nota: Se realiza una comparación entre las dos imágenes para demostrar el trazo de la trayectoria. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

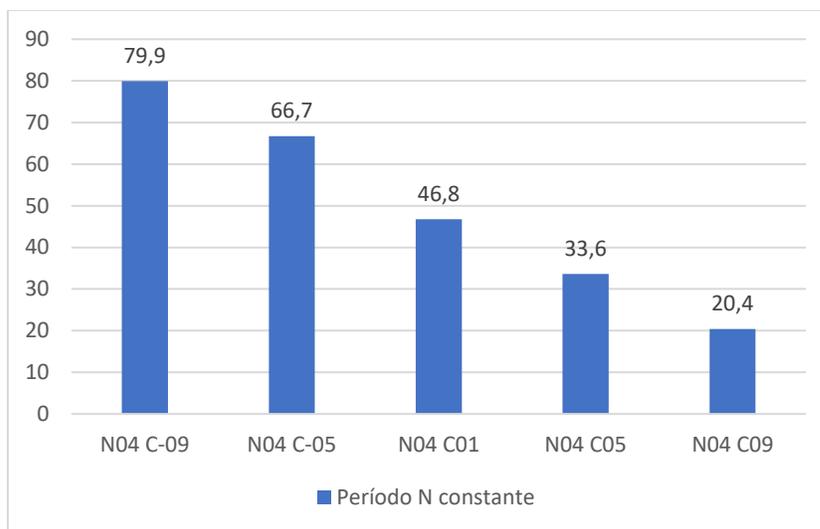
4.5. Análisis de resultados

Para verificar el correcto funcionamiento de las estructuras porosas se toma en cuenta los dos casos principales analizados en la etapa de diseño. Un conjunto de TPMS con igual valor de periodo N , que en este análisis se denominará “conjunto N ” y otro con igual valor de la constante de nivel C , que en adelante se denominará “conjunto C ”. El conjunto N , presenta una variación de su porosidad de manera relacionada a su constante de nivel C como se muestra en la **Tabla 10**, a diferencia del conjunto C , el cual presenta un valor similar de porosidad en todos los casos analizados como se muestra en la **Tabla 11**.

El conjunto N presenta las siguientes constantes de nivel $[-0.9 -0.5 0.1 0.5 0.9]$ y su porcentaje de porosidad decreciente respectivamente $[79.9\% 66.7\% 46.8\% 33.6\% 20.4\%]$ como se puede ver en la **Figura 54**, cabe recalcar que para un valor de la constante de nivel igual a cero el porcentaje de porosidad es igual al 50%.

Figura 54

Decremento del porcentaje de porosidad



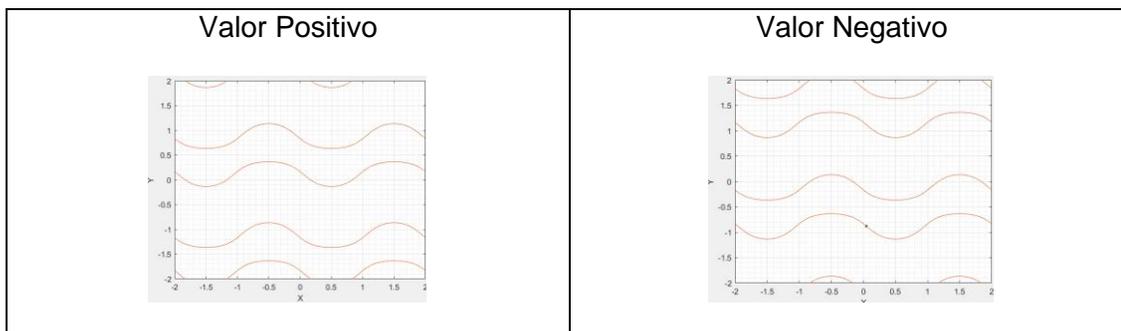
Nota: Se observa que para una constante de nivel positiva y negativa de igual valor el porcentaje de porosidad representa su valor faltante. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

El conjunto C presenta los siguientes valores de periodo [0.4 0.6 0.8 1] y su porcentaje de porosidad es muy similar para todos los casos, respectivamente [47.02% 47.32% 47.23% 47.36%]. Cabe recalcar que para un valor de periodo igual a cero el porcentaje de porosidad es nulo debido a la **Ecuación 9**.

Para valores negativos a los periodos presentados no es necesario un análisis debido a que presentan las mismas características que sus valores positivos, como se muestra en la **Figura 55**.

Figura 55

Comparación de período positivo y negativo

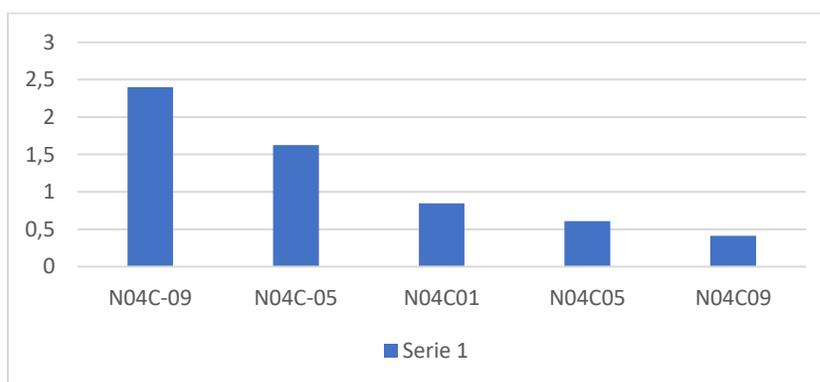


Nota: Se observa que únicamente presentan un desplazamiento en su eje Y, con el valor de período igual. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

La **Ecuación 11** muestra la relación entre el radio del poro y el tamaño del soporte, cuyo valor se encuentra en la **Tabla 12** para el conjunto N, que se puede visualizar en la **Figura 56**.

Figura 56

Relación entre radio del poro y tamaño del soporte, Conjunto N

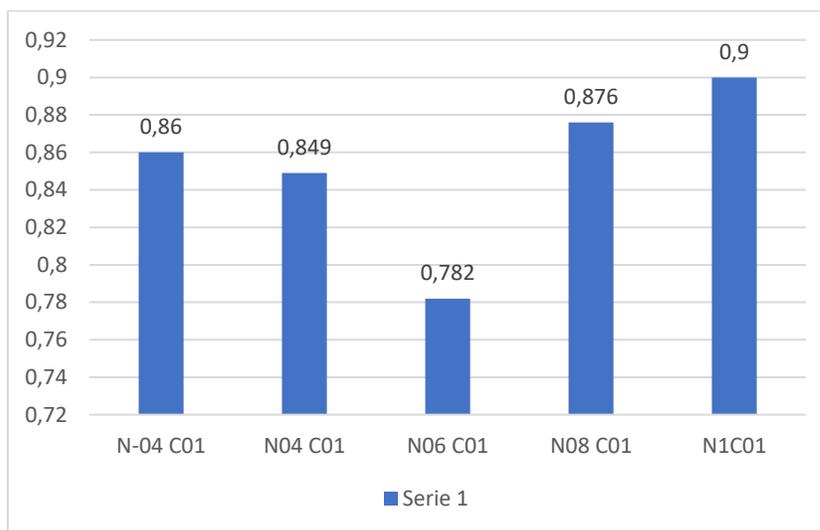


Nota: Disminuye el valor de la misma conforme la constante C aumenta su valor de negativo a positivo. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

En contraste con la **Figura 56**, para el conjunto C, el valor de la relación entre el radio del poro y el tamaño del soporte no varía por mucho es decir tiende a ser muy similar como se muestra en la **Figura 57**.

Figura 57

Relación entre radio del poro y tamaño del soporte, Conjunto C



Nota: Se observa que, para valores iguales de período, tanto positivos como negativos las características de radio y tamaño de soporte de poro son idénticas. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Una vez analizados los parámetros de las estructuras TPMS en su totalidad se procede a su análisis por medio del software FIJI. Para ello se toman en cuenta siete casos principales, uno de ellos con la recámara vacía y los seis restantes con una estructura TPMS diferente. Se seleccionaron 3 estructuras TPMS del conjunto N, 3 del conjunto C y una de ellas pertenece a los dos grupos. Para cada caso se toman seis pruebas, dos por cada lado a diferentes valores de caudal.

Los datos que se presentan a continuación forman parte de los resultados extraídos a través del software FIJI para los 42 casos analizados. El objetivo de estas pruebas es determinar la variación del comportamiento de la partícula en un mismo escenario, pero con diferentes estructuras porosas. Las tablas que se muestran a continuación son un extracto de los resultados obtenidos para cada caso analizado agrupados por la estructura porosa a tratar.

Los valores de la **Tabla 22**, muestran una clara diferencia de velocidad entre las partículas que se desplazan a un determinado valor de caudal. Se observa que tanto para el enfoque derecho, izquierdo y superior existe una disminución de velocidad de la partícula al desplazarse con un valor de caudal de 100 y 200 ml/min, estos son 60%, 55% y 75% respectivamente.

Tabla 22

Medio Libre sin estructura porosa

Medio libre (sin estructura)			
	ml/min	mm/ms	mm/s
Derecha	100	0,320	19,19
	200	0,804	48,23
Izquierda	100	0,258	15,49
	200	0,570	34,18
Superior	100	0,261	15,64
	200	1,166	69,95

Nota: Se indica el análisis en tres posiciones, además que se hace con el caudal a 100 y 200 ml/min. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

En la **Tabla 23**, **Tabla 24**, **Tabla 25**, **Tabla 26**, **Tabla 27** y **Tabla 28** se muestran los resultados promedio obtenidos del análisis de una partícula al atravesar por la estructura porosa en sus tres caras.

Tabla 23

Estructura porosa N1C01

N1C01 Estructura porosa			
	ml/min	mm/ms	mm/s
Derecha	100	0,398	23,88
	200	0,696	41,75
Izquierda	100	0,604	36,27
	200	1,348	80,86
Superior	100	0,556	33,38
	200	1,124	67,45

Nota: Se indica el análisis en tres posiciones, además que se hace con el caudal a 100 y 200 ml/min. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Tabla 24

Estructura porosa N04C01

N4C01 Estructura porosa			
	ml/min	mm/ms	mm/s
Derecha	100	0,682	40,94
	200	1,265	75,91

	ml/min	mm/ms	mm/s
Izquierda	100	0,443	26,58
	200	1,964	117,83
Superior	100	0,779	46,73
	200	1,609	96,55

Nota: Se indica el análisis en tres posiciones, además que se hace con el caudal a 100 y 200 ml/min. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Tabla 25

Estructura porosa N04C05

N04C05 Estructura porosa

	ml/min	mm/ms	mm/s
Derecha	100	3,164	189,83
	200	2,180	130,83
Izquierda	100	1,004	60,24
	200	2,498	149,87
Superior	100	2,188	131,29
	200	2,154	129,22

Nota: Se indica el análisis en tres posiciones, además que se hace con el caudal a 100 y 200 ml/min. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Tabla 26*Estructura porosa N04C09*

N04C09 Estructura porosa			
	ml/min	mm/ms	mm/s
Derecha	100	1,005	60,30
	200	2,082	124,93
Izquierda	100	0,603	36,15
	200	3,348	200,87
Superior	100	0,759	45,55
	200	3,167	190,00

Nota: Se indica el análisis en tres posiciones, además que se hace con el caudal a 100 y 200 ml/min. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Tabla 27*Estructura porosa N06C01*

N06C01 Estructura porosa			
	ml/min	mm/ms	mm/s
Derecha	100	1,257	75,43
	200	3,216	192,98
Izquierda	100	0,818	49,10
	200	0,862	51,72
Superior	100	1,316	78,93
	200	1,608	96,50

Nota: Se indica el análisis en tres posiciones, además que se hace con el caudal a 100 y 200 ml/min. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Tabla 28*Estructura porosa N08C01***N08C01 Estructura porosa**

	ml/min	mm/ms	mm/s
Derecha	100	0,442	26,49
	200	0,970	58,19
Izquierda	100	1,680	100,79
	200	1,304	78,23
Superior	100	0,582	34,93
	200	2,826	169,55

Nota: Se indica el análisis en tres posiciones, además que se hace con el caudal a 100 y 200 ml/min. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Estos valores se pueden resumir en la siguiente **Tabla 29** para compararlos de una manera más adecuada.

Tabla 29*Comparación de velocidades de la estructura porosa*

DIRECCIÓN	ML/MIN	NONE	N1 C01	N04 C01	N04 C05	N04 C09	N06 C01	N08 C01
Derecha	100	19,19	23,88	40,94	189,83	60,3	75,43	26,49
	200	48,23	41,75	75,91	130,83	124,93	192,98	58,19
Izquierda	100	15,49	36,27	26,58	60,24	36,15	49,1	100,79

DIRECCIÓN	ml/min	NONE	N1	N04	N04	N04	N06	N08
			C01	C01	C05	C09	C01	C01
	200	34,18	80,86	117,83	149,87	200,87	51,72	78,23
Superior	100	15,64	33,38	46,73	131,29	45,55	78,93	34,93
	200	69,95	67,45	96,55	129,22	190	96,5	169,55

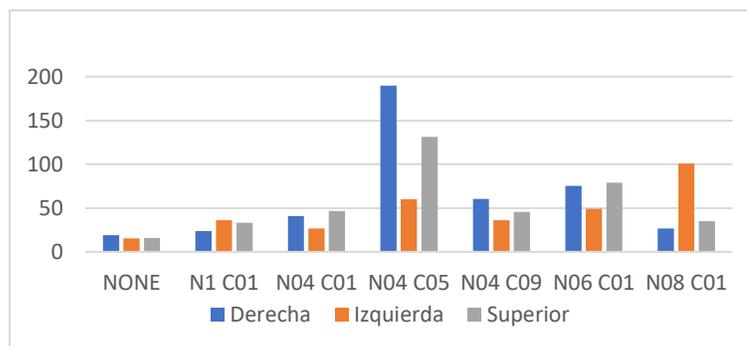
Nota: Comparativa general de las 3 posiciones y los 2 caudales con todas las estructuras porosas analizadas en las tablas anteriores. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

En la

Figura 58, se muestra que para un caudal de 100ml/min las velocidades de la mayoría de partículas se mantienen dentro de un rango moderado, sin embargo, la estructura N04C05 muestra un incremento en la velocidad de su partícula.

Figura 58

Velocidad de la partícula con caudal de 100ml/min



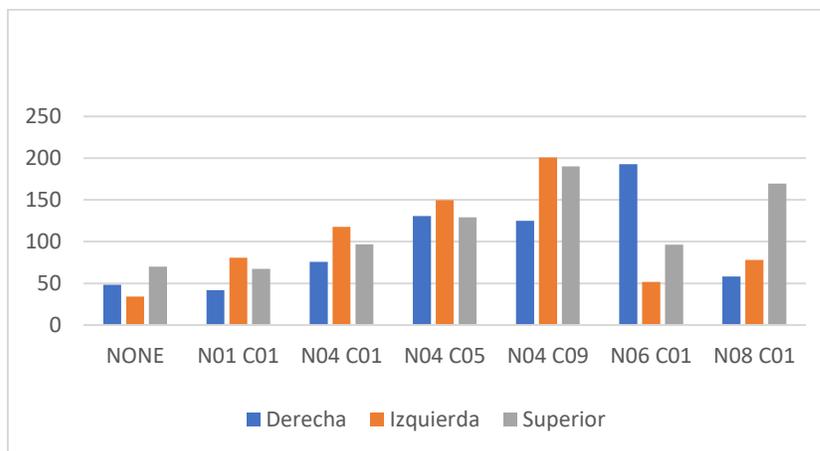
Nota: N1C01, N04C01, N04C09 y N06C01 no presentan cambios abruptos en su velocidad para las tres caras. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

Esto se puede deber a dos factores, uno de ellos es que exista un error de medición o que la medición sea correcta y la propia estructura ayude a la movilidad de la partícula. Se debe reconocer que en la medición del lado izquierdo para otra partícula la velocidad cuantificada es muy inferior a la de su lado derecho. Por lo cual se determina que es un error de medición.

En la **Figura 59**, se muestra que para un caudal de 200ml/min las velocidades de la mayoría de partículas se mantienen dentro de un rango moderado. Sin embargo, N1C01, N04C01, N04C05 y N04C09 no presentan cambios abruptos en su velocidad.

Figura 59

Velocidad de la partícula con caudal de 200ml/min



Nota: Se presentan errores en el análisis de las estructuras N06C01 y N08C01.

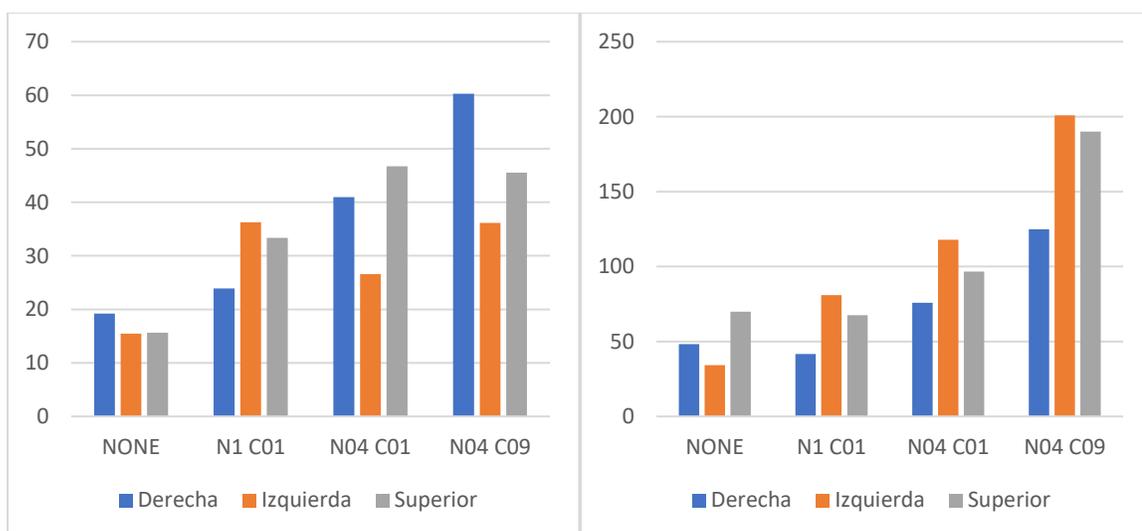
Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

A través del análisis realizado se puede separar un grupo de estructuras porosas que no presenta errores en su medición.

Estas son: N1C01, N04C01 y N04C09; por lo que en la **Figura 60**, se genera una gráfica con estas estructuras y sus mediciones para ambas velocidades. La cual muestra un aumento de la velocidad de la partícula conforme su estructura se vuelve menos porosa.

Figura 60

Comparación de velocidad entre las estructuras porosas seleccionadas



Nota: N1C01, N04C01, N04C09 y N06C01 no presentan cambios abruptos en su velocidad para las tres caras. Realizado por los autores (Lascano, Navas, 2020)

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Se diseñó y construyó un prototipo de sistema de recirculación de fluidos a través de estructuras porosas tridimensionales para el análisis de flujo laminar mediante visión artificial, y mediante las pruebas realizadas se comprobó su funcionamiento.

Al investigar sobre los parámetros necesarios para la elaboración del prototipo se identificó a la bomba peristáltica y las estructuras porosas como aquellos elementos que demandaran mayor atención debido a su alto grado de complejidad tanto de diseño como de construcción.

Para el diseño de la bomba peristáltica fue necesaria una profunda investigación sobre la existencia de este tipo de dispositivos dentro del mercado local e internacional para llegar a conocer sus parámetros de funcionamiento y demás características. La empresa alemana (Boxer GmbH, 2020) es una de las pocas que se dedican a la fabricación de este tipo de bombas peristálticas con fines médicos y ponen a disposición del público en general su catálogo y características específicas para cada bomba. En particular tienen un modelo de bomba peristáltica impulsada por un motor a pasos, cuyas características se han tomado como referencia para el diseño de la bomba peristáltica presentada en este trabajo.

El diseño de la bomba peristáltica parte de las principales características del motor a pasos a utilizar que según el fabricante son 3.6N.cm a una velocidad de 200RPM, mediante estos datos se pueden calcular y estimar algunos datos, entre los cuales resalta el caudal de la bomba. El diámetro de la bomba es un criterio del diseñador que debe ser evaluado con los cálculos respectivos; se establece un valor de 57.5mm.

El diámetro de la manguera calculado debe ser de 4mm interno, su medida externa no se encuentra en los cálculos debido a que esto dependerá de la disposición en el mercado. Las medidas de la manguera se establecieron como 4mm interno y 5.5mm externo.

Es necesario conocer la fuerza tangencial de aplastamiento de la manguera para verificar la factibilidad del motor elegido, mediante cálculos se determina un valor de 0.56N para condiciones de vacío y de 1.17N para condiciones de trabajo. Valores muy por debajo del proporcionado para el motor por el fabricante.

Los cálculos para la bomba peristáltica en condiciones normales generan un valor de caudal de 4.11 *ml/seg* a una velocidad de 200RPM. Mediante las pruebas realizadas en la **Tabla 21**, se verifica que para un valor de frecuencia igual a 75 en el microcontrolador, la bomba genera un caudal de 4.16 *ml/seg*.

El número de Reynolds es aplicable a fluidos en movimiento para establecer si presentan un flujo laminar o turbulento. Para ello establece que los valores inferiores a 2300 se consideran parte de un flujo laminar, mediante la **Ecuación 23** se establece un valor de 2279 para el flujo presente dentro del proyecto. Por lo cual se considera un flujo laminar.

Para el diseño de las estructuras porosas es necesario un software de modelamiento matemático como Matlab. Sin embargo, una alternativa a éste es el software MathMod que además de ser gratuito provee un entorno especializado para la creación de estructuras mínimas periódicas como es el giroide.

Las estructuras porosas o TPMS según la **Ecuación 9** dependen de dos valores: periodo N y constante de nivel C . Estos valores permitirán modificar la porosidad, tamaño del radio y soporte del poro. Las estructuras seleccionadas parten de dos condiciones un periodo igual para establecer los cambios generados en las mismas al

modificar la constante de nivel C y una constante de nivel C igual para verificar los cambios que produce la medicación del periodo.

En la **Tabla 10** se observa que para un valor de periodo igual a 0.4 y una constante de nivel C comprendida entre los valores [-0.9 -0.5 0.1 0.5 0.9] el porcentaje de porosidad disminuye respectivamente de acuerdo a cada configuración. Mientras que para un valor de la constante de nivel igual a 0.1 y un valor de periodo comprendido entre [0.4 0.6 0.8 1] el porcentaje de porosidad se mantiene en el rango del 47% para todos los casos. Por lo que se considera como un claro indicador que la constante de nivel C está relacionada directamente con el porcentaje de porosidad en la estructura.

El software Fiji además de ser gratuito, está adaptado para el análisis de partículas, cuenta con varios plugins entre los cuales se encuentra el generador de tracking o trayectoria. Este plugin es el adecuado para realizar los respectivos análisis de una partícula en movimiento ya que provee de datos como la velocidad y posición de la partícula en una determinada fracción de segundo.

Al realizar las pruebas para el análisis de visión se implementaron 2 conjuntos de estructuras porosas, 3 pertenecen a aquellas con un mismo valor de la constante de nivel C, 3 de ellos con un valor igual de periodo N y 1 que pertenece tanto al primer y segundo grupo. La recámara que permite el almacenamiento de la estructura porosa contiene 3 espacios transparentes por medio de los cuales se puede obtener las imágenes necesarias para las pruebas a realizar.

El banco de pruebas realizado con 42 casos forma parte de dos conjuntos generales a un valor de caudal establecido, los valores seleccionados fueron 100 y 200 ml/min. Estos valores generan una velocidad de la partícula, de acuerdo a la estructura porosa colocada, de entre 50 y 100 mm/s según las figuras 58 y 59.

La alimentación de todo el sistema depende de la red local, la caja de control contiene una fuente de 110ac a 12vcc a 5amp, necesaria para alimentar el motor a

pasos de la bomba peristáltica; un transformador de 12vcc a 6vcc para alimentar el servomotor y una fuente de 110ac a 5vcc para la pantalla Nextion de 5" y el arduino uno.

El prototipo consta de bomba peristáltica, recámara para las estructuras TPMS, mecanismo del microscopio, caja de control y reservorio para el líquido. Todo ello se lo colocó sobre una mesa de acrílico de 9mm de espesor. Esto con el fin de que no exista degradación por efectos de humedad o temperatura en parte de su estructura.

5.2. Recomendaciones

Considerando lo anteriormente mencionado, el diseño de una bomba de este tipo debe tratar de eliminar en lo posible la existencia de cavitación, ya que de no hacerlo se verían afectados parámetros de trabajo, dañaría el equipo, además de elevar el consumo energético del mismo.

Verificar el estado de la manguera interna de la bomba peristáltica previo a su funcionamiento, ya que debido al aplastamiento por los rodillos puede llegar a quebrarse en alguna sección.

Previo al iniciar las pruebas se debe realizar un llenado de la recámara, para ello se colocará la misma en posición de 45°, para que el líquido la llene completamente evitando posibles espacios de aire y reduciendo así el riesgo de cavitación.

Las partículas a utilizar deben estar suspendidas dentro del fluido y no sedimentarse. Para ello es necesario realizar pruebas con varias partículas y colocarlas dentro de un recipiente con el fluido a analizar; posteriormente utilizar únicamente las partículas suspendidas en el fluido.

Las partículas que resultaron más adecuadas para el presente análisis fueron las *Capsicum annum* encontradas en presentación de 24gr dentro del mercado local, debido a que sus características son adecuadas para un mejor análisis.

Bibliografía

- Alectronics. (2021). *Pantalla Nextion 5*. Recuperado el 13 de Enero del 2021 de:
<https://avelectronics.cc/producto/pantalla-nextion-5/>
- Autodesk, I. (2020). *Impresión 3D*. Recuperado el 15 de Enero del 2021 de: Autodesk:
<https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/3d-printing>
- Bancroft, G., Sikavitsas, V. I., & Mikos, A. G. (2003). Design of a Flow Perfusion Bioreactor System for Bone Tissue-Engineering Applications. *TISSUE ENGINEERING*, 549-554.
- Boxer GmbH. (2020, 03 110). Recuperado el 18 de Enero del 2021 de:
<https://www.boxerpumps.com/en/products/peristaltic-pumps-liquid/>
- Crespo, J. E. (2016, Diciembre 11). *Aprendiendo Arduino* . Recuperado el 21 de Enero del 2021 de: Arduino Open Source Community:
<https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2016/12/11/que-es-arduino-2/>
- Departamento de física aplicada. (2013). *Resistencia a la rodadura*. Recuperado el 22 de Enero del 2021 de:
[http://laplace.us.es/wiki/index.php/Fuerzas_de_rozamiento_\(GIE\)](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Fuerzas_de_rozamiento_(GIE))
- Domingo, M. (2014). *Visión por Computador*. Santiago de Chile: Departamento de Ciencia de la Computación.
- Fernández, N. (2012, 04 25). *Introducción a la Visión Artificial*. Recuperado el 25 de Enero del 2021 de: Universidad de Córdoba. Escuela Politécnica Superior:
<http://www.uco.es/users/ma1fegan/2011-2012/vision/Temas/Vision-artificial.pdf>

- Frías, C. (2012, 10 19). *Numero de Reynolds*. Recuperado el 20 de Diciembre del 2020 de: SlideShare: <https://www.slideshare.net/CarlosFriasFraire/numero-de-reynolds-14803948>
- Ingeniería, H. d. (2021). *Calculadora Altitud-Presión*. Recuperado el 20 de Marzo del 2020 de: <https://www.herramientasingeneria.com/onlinecalc/spa/altitud/altitud.html>
- Ingeniería, R. A. (2018, Julio 11). *Real Academia de Ingeniería*. Recuperado el 13 de Julio del 2020 de: <http://diccionario.raing.es/es/lema/biorreactor-de-perfusión>
- Luszczewski, A. (2004). *Redes industriales de tubería, bombas para agua, ventiladores y*. barcelona: Barcelona Reverté 1999.
- Motovario S.p.A. (2018, 11 05). *Bombas Peristálticas*. Recuperado el 1 de Enero del 2021 de: Motovario Heart of Motion: <https://www.motovario.com/spa/solutions/bombas-peristalticas?fbclid=IwAR1n7O69Ik3L4Jb00a1n8qDEuPQdIHyoSLRLK95I8xgV42XK8OHEJ6Oo1no>
- Mundo Microscopio. (2021). *El microscopio digital*. Recuperado el 14 de Febrero del 2021 de: <https://www.mundomicroscopio.com/microscopio-digital/>
- Pololu. (2021). *Pololu Robotics & Electronics*. Recuperado el 11 de Julio del 2020 de: <https://www.pololu.com/product>
- Prieto, F. P. (2017). *Taller «Modelado e impresión 3D»*. Recuperado el 18 de Agosto del 2020 de: <https://canaltic.com/blog/?p=2732>
- QuimiNet. (2020). *¿Qué son las bombas peristálticas?* Recuperado el 28 de Marzo del 2020 de: <https://www.quiminet.com/articulos/que-son-las-bombas-peristalticas-32689.htm?fbclid=IwAR3MJnAhNUHmOcrjg23Vog8nhybEDbVlyKUqBGmRCfIRIQ3E9ZWgwz4KrEo>

- Rasband, W. (2020, 01 22). *National Institutes of Health*. Recuperado el 27 de Junio del 2020 de: <https://salud.nih.gov>
- Restrepo, S. S. (2017, 10 10). *FDM o modelado por deposición fundida*. Recuperado el 6 de Abril del 2020 de: <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/#!>
- Restrepo, S. S. (2017, 09 09). *SLA: Impresión 3D por estereolitografía*. Recuperado el 17 de Enero del 2020 de: <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/#!>
- Rossius, S. (2013, 05 21). *Reconocimiento de objetos mediante WebCam en tiempo real*. Recuperado el 20 de Enero del 2021 de: <https://riunet.upv.es/handle/10251/29009>
- SAdelPlata. (2006). *Las bombas peristálticas*. Argentina: Sociedad Acuariológica del Plata. Recuperado el 24 de Octubre del 2020 de: Sociedad Acuaroliógica de Plata : http://www.sadelplata.org/articulos/groel_060906.html
- Salazar, J. (2021). *Arduino UNO* . Recuperado el 25 de Marzo del 2020 de: Ja Bots: <https://ja-bots.com/producto/arduino-uno-atmega-328p-smd/>
- Sargent, B. (2013). Perfusion Bioreactors. *Cell Culture Dish Inc*, 1-5.
- Schoen, A. (1970). Infinite periodic minimal surfaces without self-intersections. *Electronics Research Center*.
- Veintimilla, R. (2015). Diseño y Construcción de una Bomba Peristáltica. Loja.
- Walker, J. M., Bodamer, E., Kleinfehn, A., & Luo, Y. (2016). Design and mechanical characterization of solid and highly porous 3D printed poly(propylene fumarate) scaffolds.

Zamora Parra, B., & Viedna Robles, A. (2016). *Teoría de máquinas hidráulica*. Cartagena:
Universidad Politécnica de Cartagena.

Anexos