



**Diseño y construcción de un prototipo para validación y certificación de la capacidad de filtrado de mascarillas y respiradores según ASTM – F2299**

Iñaguazo Pindo, Erick Javier

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

8 de febrero de 2022

# COPYLEAKS

## Trabajo\_Titulacion\_Inaguazo-Erick\_2.pdf

Scanned on: 23:45 February 7, 2022 UTC



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



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	364
Words with Minor Changes	40
Paraphrased Words	354
Ommited Words	0



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

**Certificación de Autoría**

Certifico que el trabajo de titulación, **“Diseño y construcción de un prototipo para validación y certificación de la capacidad de filtrado de mascarillas y respiradores según ASTM– F2299”** fue realizado por el señor **Iñaguazo Pindo, Erick Javier**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 8 de febrero de 2022

Firma:



**Ing. Hernán Vinicio Lara Padilla, PhD.**

C. C.: 0603247362



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

**Responsabilidad de Autoría**

Yo, **Iñaguazo Pindo Erick Javier**, con cédula de ciudadanía No 1726754995 declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Diseño y construcción de un prototipo para validación y certificación de la capacidad de filtrado de mascarillas y respiradores según ASTM – F2299”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 8 de febrero de 2022

**Iñaguazo Pindo, Erick Javier**

C.C. 1726754995



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

**Autorización de Publicación**

Yo, **Iñaguazo Pindo, Erick Javier**, con cédula de ciudadanía No 1726754995 autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “**Diseño y construcción de un prototipo para validación y certificación de la capacidad de filtrado de mascarillas y respiradores según ASTM – F2299**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 8 de febrero de 2022

**Iñaguazo Pindo, Erick Javier**

C.C. 1726754995

## **DEDICATORIA**

A los que hemos perdido en esta pandemia Covid-19 y no vamos a olvidar.

A la memoria de mi abuelito Manuel, por su infinito amor y guía durante toda mi vida.

A la memoria de mi abuelita Luchita, por su infinita ternura y ayuda durante toda mi carrera universitaria.

A la memoria de mi tía Leonor por su eterno cariño.

**Erick**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mis padres Javier y Matilde que supieron darme las herramientas para culminar mi carrera universitaria, de ellos he obtenido sus mejores capacidades y aptitudes que me han servido para llevar a cabo cada uno de mis proyectos.

A mis amigos y familiares que fueron partícipes de todo el proceso de mi carrera universitaria por creer en mí e impulsarme a culminar tan distinguida ingeniería.

Al grupo de docentes del DECEM, en especial un total agradecimiento al Ing. Hernán Lara por su guía y acompañamiento en el desarrollo del presente trabajo.

Finalmente agradezco a este proyecto de titulación que me permitió reencontrarme con mis aptitudes y saber que mientras se pueda imaginar, se puede hacer.

**Erick**

## Índice de contenido

Resumen.....	18
Abstract.....	19
Capítulo I.....	20
Generalidades.....	20
Antecedentes.....	20
Justificación e Importancia.....	30
Alcance de proyecto .....	32
Objetivos.....	36
Objetivo General .....	36
Objetivos Específicos .....	36
Fundamentación Teórica.....	37
Covid19: Generalidades.....	37
Transmisión aérea .....	38
Materiales de mascarillas.....	39
Normas y legislación.....	42
Mascarillas y respiradores – regulaciones en Ecuador.....	44
ASTM – F2299.....	46
Capítulo III.....	49
Desarrollo del Sistema .....	49
Desarrollo del Hardware mecánico .....	55



Selección del conducto principal de prueba.....	56
Mueble base.....	62
Diseño del sistema para sellado de muestra .....	70
Desarrollo del sistema de transporte y nebulización de partículas de prueba .....	83
Fuente de alimentación .....	84
Nebulización de partículas.....	86
Partículas de prueba .....	89
Filtro HEPA 99.97%.....	92
Acoples para los componentes y ensamble.....	94
Sistema de fotometría láser .....	96
Sensor fotométrico .....	96
Acoples para los componentes y ensamble.....	98
Sistema de monitoreo y control.....	101
Control y monitoreo de temperatura - cámara .....	102
Monitoreo de temperatura y humedad – conducto de prueba.....	115
Monitoreo de presión.....	115
Controlador del sistema.....	118
Ensamble del hardware electrónico.....	119
Etapa de Potencia .....	121
Resumen de conexiones .....	122
Sistema de presentación de resultados .....	125

Acoples para los componentes y ensamble.....	127
Prototipo final.....	128
Capítulo IV .....	139
Pruebas y Análisis de Resultados .....	139
Pruebas .....	139
Pruebas de subsistemas .....	139
Prueba de funcionamiento.....	143
Análisis de Resultados.....	148
Capítulo V .....	152
Conclusiones y Recomendaciones.....	152
Conclusiones .....	152
Recomendaciones .....	153
Trabajos futuros.....	154
Capítulo VI .....	155
Referencias.....	155

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> Términos y secciones de la norma INEN 181 2R .....	44
<b>Tabla 2</b> Requerimientos del sistema .....	51
<b>Tabla 3</b> Requerimientos técnicos del producto.....	51
<b>Tabla 4</b> Peso Relativo para los requerimientos técnicos .....	54
<b>Tabla 5</b> Subsistemas del Proyecto .....	54
<b>Tabla 6</b> Requerimientos de la norma ASTM – F2299 referente al hardware mecánico	55
<b>Tabla 7</b> Requerimientos de la norma ASTM – F2299 referente al conducto de prueba	56
<b>Tabla 8</b> Resultados de la experimentación con 3 disposiciones diferentes de tubería..	58
<b>Tabla 9</b> Análisis de Varianza – ANOVA 1 factor.....	59
<b>Tabla 10</b> Prueba Método Bartlett – Prueba de igualdad de varianzas .....	61
<b>Tabla 11</b> Dimensiones para las variables de los muebles de laboratorio.....	63
<b>Tabla 12</b> Distancia requerida por la norma: aerosol - muestra .....	64
<b>Tabla 13</b> Distancia requerida por la norma: sonda aguas arriba- aerosol.....	65
<b>Tabla 14</b> Distancia requerida por la norma: sonda aguas arriba - muestra.....	66
<b>Tabla 15</b> Distancia requerida por la norma: sonda aguas abajo - muestra .....	67
<b>Tabla 16</b> Distancia requerida por la norma: Longitud total.....	68
<b>Tabla 17</b> Requerimiento de la norma para el sistema de transporte y nebulización .....	83
<b>Tabla 18</b> Selección de Conceptos: Fuente para la Alimentación de Aire del sistema ...	84
<b>Tabla 19</b> Evaluación de Conceptos: Fuente para la Alimentación de Aire del sistema .	85
<b>Tabla 20</b> Fuente para la Alimentación de Aire del sistema .....	85
<b>Tabla 21</b> Selección de Conceptos: Nebulizador .....	86
<b>Tabla 22</b> Evaluación de Conceptos: Nebulizador .....	87
<b>Tabla 23</b> Nebulizador del prototipo.....	88
<b>Tabla 24</b> Accesorios para el nebulizador del prototipo .....	88

<b>Tabla 25</b> Selección de Conceptos: Medicamento de prueba.....	90
<b>Tabla 26</b> Evaluación de Conceptos: Medicamento de prueba.....	91
<b>Tabla 27</b> Selección de conceptos: Filtro HEPA .....	92
<b>Tabla 28</b> Evaluación de Conceptos: Filtro HEPA .....	93
<b>Tabla 29</b> Materiales utilizados en los circuitos neumáticos.....	93
<b>Tabla 30</b> Requerimiento de la norma para el sistema de fotometría láser .....	96
<b>Tabla 31</b> Selección de Conceptos: Sensor Fotométrico .....	97
<b>Tabla 32</b> Evaluación de Conceptos: Sensor Fotométrico .....	97
<b>Tabla 33</b> Materiales utilizados en los circuitos neumáticos.....	98
<b>Tabla 34</b> Requerimiento de la norma para el sistema de monitoreo y control.....	101
<b>Tabla 35</b> Selección de Conceptos: Termostato .....	102
<b>Tabla 36</b> Evaluación de Conceptos: Termostato .....	103
<b>Tabla 37</b> Termostato para el prototipo.....	104
<b>Tabla 38</b> Selección de Conceptos: Calefactor.....	104
<b>Tabla 39</b> Evaluación de Conceptos: Calefactor.....	105
<b>Tabla 40</b> Calefactor para el prototipo .....	106
<b>Tabla 41</b> Tabla para el DOE factorial de 2 factores, 2 niveles y 3 réplicas .....	110
<b>Tabla 42</b> Análisis de varianza – DOE 2 factores, 2 niveles y 3 réplicas.....	111
<b>Tabla 43</b> Parámetros para optimización de la respuesta: Temperatura Salida .....	113
<b>Tabla 44</b> Predicción de respuesta múltiple.....	113
<b>Tabla 45</b> Sensor de humedad y temperatura para el prototipo.....	115
<b>Tabla 46</b> Selección de Conceptos: Sensor de Presión.....	116
<b>Tabla 47</b> Evaluación de Conceptos: Sensor de presión .....	116
<b>Tabla 48</b> Sensor de presión para el prototipo.....	117
<b>Tabla 49</b> Controlador del prototipo .....	118
<b>Tabla 50</b> Módulos relé para el prototipo .....	120

<b>Tabla 51</b> Fuentes de alimentación eléctrica utilizadas en el proyecto .....	122
<b>Tabla 52</b> Fuentes de alimentación del prototipo .....	122
<b>Tabla 53</b> Componentes eléctricos del prototipo.....	123
<b>Tabla 54</b> Selección de Conceptos: Pantalla para presentación de resultados.....	125
<b>Tabla 55</b> Evaluación de Conceptos: Pantalla para presentación de resultados.....	126
<b>Tabla 56</b> Materiales utilizados en los circuitos neumáticos.....	126
<b>Tabla 57</b> Módulo para pantalla Tft utilizado en el prototipo.....	127
<b>Tabla 58</b> Check List del funcionamiento del hardware mecánico .....	139
<b>Tabla 59</b> Check List del funcionamiento del transporte y nebulización de partículas..	141
<b>Tabla 60</b> Check List del funcionamiento del transporte y nebulización de partículas..	141
<b>Tabla 61</b> Check List del funcionamiento del monitoreo y control .....	142
<b>Tabla 62</b> Origen y características de las muestras .....	144
<b>Tabla 63</b> Diseño de experimento para 3 factores con 2 réplicas .....	145
<b>Tabla 64</b> Ejemplo de ejecución de la prueba.....	147
<b>Tabla 65</b> Resultados para diseño de experimentos de la Tabla 63 .....	147
<b>Tabla 66</b> ANOVA Balanceado: Información del factor .....	149
<b>Tabla 67</b> ANOVA Balanceado: Análisis de varianza de Eficiencia (%) .....	149

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> Composición mascarilla quirúrgica y vista microscópica de la fibra Mel Brown .....	21
<b>Figura 2</b> Estructura de un respirador desechable N95 .....	22
<b>Figura 3</b> 3M™ Respirador de Media Cara Reutilizable Serie 7500 .....	23
<b>Figura 4</b> Representación gráfica básica del instrumento de prueba PFE .....	24
<b>Figura 5</b> GB-PF400L Face Mask Particulate Filtration Efficiency Tester .....	25
<b>Figura 6</b> Representación gráfica del instrumento de pruebas para BFE .....	27
<b>Figura 7</b> SJ-X100 filter test bench maskbacterial filtration efficiency (BFE) tester .....	28
<b>Figura 8</b> Esquema de la configuración de filtrado .....	30
<b>Figura 9</b> Estructura general preliminar del sistema mecánico .....	33
<b>Figura 10</b> Estructura general preliminar del sistema eléctrico y electrónico .....	34
<b>Figura 11</b> Estructura de software implementación, análisis y simulación referencial....	35
<b>Figura 12</b> Principio de funcionamiento del sistema referencial.....	35
<b>Figura 13</b> Cómo las máscaras faciales ayudan a reducir la transmisión aérea .....	39
<b>Figura 14</b> Factores que intervienen en la eficiencia de una mascarilla.....	41
<b>Figura 15</b> Estructura de un respirador desechable N95 .....	42
<b>Figura 16</b> Máscaras y respiradores basados en estándares de la UE .....	43
<b>Figura 17</b> Modelo en V .....	49
<b>Figura 18</b> Casa de la Calidad del proyecto .....	53
<b>Figura 19.</b> Materiales aptos para el conducto de prueba.....	57
<b>Figura 20</b> Gráfica de intervalos – Análisis ANOVA 1 factor.....	60
<b>Figura 21</b> Gráfica de residuos – Análisis ANOVA 1 factor.....	61
<b>Figura 22</b> Gráfica para la prueba – Prueba de igualdad de varianzas.....	62
<b>Figura 23</b> Vista Frontal de un mueble de laboratorio.....	63

<b>Figura 24</b> Representación de distancia entre inyección de aerosol y elemento de prueba .....	64
<b>Figura 25</b> Representación de la distancia entre sondas aguas arriba y aerosol.....	65
<b>Figura 26</b> Representación de la distancia entre sonda aguas arriba y elemento de prueba.....	66
<b>Figura 27</b> Representación de la entre sonda aguas abajo y elemento de prueba .....	67
<b>Figura 28</b> Representación de la longitud de la línea de muestreo y longitud de la línea de transporte de muestra total.....	68
<b>Figura 29</b> Estructura exterior del mueble base.....	69
<b>Figura 30</b> Divisiones del mueble base .....	70
<b>Figura 31</b> Acoples para unión tipo pin.....	71
<b>Figura 32</b> Acoples para ajuste tipo Brida .....	71
<b>Figura 33</b> Acoples para unión roscada.....	73
<b>Figura 34</b> Acoples para ajuste roscada.....	73
<b>Figura 35</b> Cilindro neumático TN10-100 .....	75
<b>Figura 36</b> Válvula solenoide NPT de 1/8 pulgadas.....	76
<b>Figura 37</b> Acople para unión del cilindro y conducto de acrílico .....	76
<b>Figura 38</b> Acople para cierre del mecanismo neumático.....	77
<b>Figura 39</b> Acople universal de cierre.....	77
<b>Figura 40</b> Acople tensor de mascarilla o respirador .....	78
<b>Figura 41</b> Acople para unión entre acople universal cierre y mueble base.....	79
<b>Figura 42</b> Ensamble del diseño para sellado de muestra.....	79
<b>Figura 43</b> Ensamble de sistema de sellado de muestras .....	80
<b>Figura 44</b> Diseño de estructura para accionamiento neumático.....	81
<b>Figura 45</b> Ensamble CAD de estructura para accionamiento neumático.....	82
<b>Figura 46</b> Ensamble CAD de estructura para accionamiento neumático.....	82

<b>Figura 47</b> Partículas de látex de poliestireno, farmacéutica Merck.....	89
<b>Figura 48</b> Partículas de látex de poliestireno, Laboratorio CD Bioparticles .....	90
<b>Figura 49</b> Acople para recipiente portapartículas .....	94
<b>Figura 50</b> Ensamble físico del acople para recipiente portapartículas.....	95
<b>Figura 51</b> Ensamble filtros HEPA.....	95
<b>Figura 52</b> Diseño de la sonda de línea central para el sistema fotométrico.....	99
<b>Figura 53</b> Diseño del acople para recolección de partículas por sonda.....	99
<b>Figura 54</b> Diseño del acople para sensor fotométrico .....	100
<b>Figura 55</b> Ensamble sistema fotométrico .....	100
<b>Figura 56</b> Ensamble sistema fotométrico .....	101
<b>Figura 57</b> Diseño de acoples para cámara de temperatura.....	107
<b>Figura 58</b> Instalación de componentes en cámara de temperatura .....	107
<b>Figura 59</b> Instalación Filtro de succión con acople en cámara de temperatura – Mueble base .....	108
<b>Figura 60</b> Instalación del conducto de succión en cámara de temperatura .....	109
<b>Figura 61</b> Acople para unión: conducto - compresor.....	109
<b>Figura 62</b> Gráfica Pareto de los efectos para la temperatura de salida .....	112
<b>Figura 63</b> Gráfica de residuos para la temperatura de salida.....	112
<b>Figura 64</b> Gráfica de optimización para una Presión de 4 PSI .....	114
<b>Figura 65</b> Gráfica de optimización para una Presión de 4 PSI .....	114
<b>Figura 66</b> Esquema del ensamble del hardware electrónico .....	120
<b>Figura 67</b> Diseño de estructura para placa eléctrica del prototipo.....	128
<b>Figura 68</b> Diseño de estructura para presentación de resultados del prototipo. ....	128
<b>Figura 69</b> Prototipo final: Vista frontal I .....	129
<b>Figura 70</b> Prototipo final: Vista lateral I .....	130
<b>Figura 71</b> Prototipo final: Vista posterior .....	130



<b>Figura 72</b> Prototipo final: Vista lateral I .....	131
<b>Figura 73</b> Prototipo final: Vista frontal I .....	131
<b>Figura 74</b> Prototipo final: Vista lateral II .....	132
<b>Figura 75</b> Pantalla de prototipo: Menú principal .....	132
<b>Figura 76</b> Pantalla de prototipo: Paso 1 - Control .....	133
<b>Figura 77</b> Pantalla de prototipo: Paso 1 finiquitado - Control listo .....	134
<b>Figura 78</b> Pantalla de prototipo: Paso 2 - Preparación.....	134
<b>Figura 79</b> Pantalla de prototipo: Paso 2 finiquitado – Preparación listo.....	135
<b>Figura 80</b> Colocación de mascarilla en portamuestras.....	136
<b>Figura 81</b> Mascarilla fijada al portamuestras.....	136
<b>Figura 82</b> Pantalla de prototipo: Paso 3 – Ejecución.....	137
<b>Figura 83</b> Portamuestras cerrado .....	137
<b>Figura 84</b> Pantalla de prototipo: Resultados de prueba .....	138
<b>Figura 85</b> Mascarillas y respiradores utilizados para la prueba de funcionamiento del prototipo .....	143
<b>Figura 86</b> ANOVA Balanceado: Gráfico de residuos.....	151

## Resumen

En la actualidad por la situación que afronta el mundo entero por el SARS-Cov-2, todas las personas usan unas mascarilla o respirador, existe una gran cantidad de estos productos en el mercado con o sin certificaciones que otorgan una protección para la persona que lo utiliza, es por esto que, el presente trabajo consiste en el diseño y construcción de un prototipo para validar y certificar la capacidad de filtrado de mascarillas y respiradores según ASTM– F2299, que ayudará en el proceso de validar la eficiencia indicada por un proveedor de mascarillas. Se realiza el diseño de la parte mecánica, eléctrica y electrónica de acuerdo a los requerimientos de la empresa beneficiaria regidos por los requerimientos técnicos de la norma en uso. El prototipo se divide en 5 sistemas: hardware mecánico, que comprende el espacio para albergar componentes, el transporte y nebulización de partículas, que se encarga de dotar de un aire limpio y generar el aerosol de prueba, el sistema de fotometría láser encargado de contabilizar la cantidad de partículas, el monitoreo y control encargado de mantener un ambiente controlado y regido bajo la norma en uso, finalmente la presentación de resultados que son mostrados en una pantalla táctil. El prototipo opera bajo un rango de flujo de prueba de 0.5 a 20 L/min, la velocidad de aire de prueba es de 0.5 a 25 cm/s, el área de la sección transversal del conducto es de 15cm<sup>2</sup>, el rango de la eficiencia de filtración es de 0 a 99.99% con resolución de 0.01%, detección de partículas con un tamaño mayor a 1µm y un tiempo aproximado de prueba de 15 minutos.

### Palabras clave:

- **EFICIENCIA DE MASCARILLAS**
- **PENETRACIÓN DE PARTÍCULAS**
- **EQUIPOS DE PROTECCIÓN**
- **ASTM F-2299**

## Abstract

Currently, due to the situation that the entire world is facing due to SARS-Cov-2, all people wear a mask or respirator, there are a large number of these products on the market with or without certifications that provide protection for the person who uses it, which is why the present work consists of the design and construction of a prototype to validate and certify the filtering capacity of masks and respirators according to ASTM-F2299, which will help in the process of validating the efficiency indicated by a supplier. of masks. The design of the mechanical, electrical and electronic part is carried out according to the requirements of the beneficiary company governed by the technical requirements of the standard in use. The prototype is divided into 5 systems: mechanical hardware, which includes the space to house components, the transport and nebulization of particles, which is responsible for providing clean air and generating the test aerosol, the laser photometry system responsible for counting the amount of particles, monitoring and control in charge of maintaining a controlled environment governed by the standard in use, finally the presentation of results that are displayed on a touch screen. The prototype operates under a test flow range of 0.5 to 20 L/min, the test air velocity is 0.5 to 25 cm/s, the duct cross-sectional area is 15 cm<sup>2</sup>, the efficiency range filtration is from 0 to 99.99% with a resolution of 0.01%, detection of particles with a size greater than 1µm and an approximate test time of 15 minutes.

KeyWords:

- **MASK EFFICIENCY**
- **PARTICLE PENETRATION**
- **PROTECTIVE EQUIPMENT**
- **ASTM F-2299**

## Capítulo I

### Generalidades

En el presente capítulo se aborda la introducción del trabajo de investigación realizado, en el cual se detallan los antecedentes, justificación e importancia, su alcance y los objetivos planteados.

#### Antecedentes

La pandemia de Covid-19 tiene la atención de todo el mundo, el virus SARS-cov-2 se ha extendido vertiginosamente, afectando a más de 346.8 millones de personas con 5.6 millones de decesos al 21 de enero de 2022 (*COVID-19 - Update, Live, 2022*). El modo principal de propagación del virus es a través de gotas exhaladas de individuos contagiados que son producidos al momento de toser, respirar, estornudar y hablar. Cuando se emiten las gotas, transfieren el virus por tres métodos de contacto (WHO, 2020). Las gotas que se inhalan directamente del aire, gotas que caen sobre la mano o cuerpo de un individuo y luego por contacto son transferidas al rostro, y las gotas que aterrizan sobre una superficie y luego se transfieren denominados fómites. Es por esto que la Organización Mundial de la Salud (OMS) el 30 de enero de 2020 declaró una emergencia sanitaria mundial, y el 19 de marzo del mismo año aconsejaron el uso de mascarillas o cubrebocas para prevenir la propagación de la enfermedad (WHO, 2020).

#### Tipos de mascarillas

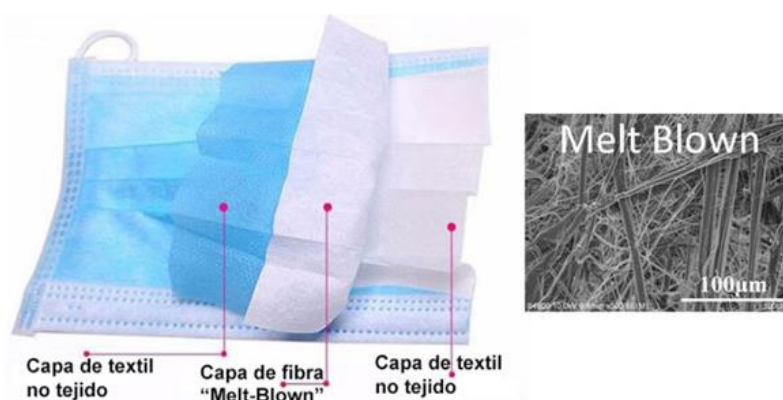
En el mercado existen tres tipos de mascarillas utilizadas en el cuidado de la salud: mascarillas para procedimientos, mascarillas quirúrgicas y respiradores quirúrgicos N95. Las mascarillas para procedimientos y quirúrgicas comparten una elaboración similar, su diferencia radica en el tiempo de uso y la forma de sujeción, de

esta forma las mascarillas de procedimiento están diseñadas para un uso a corto plazo y por lo general se sujetan con orejeras, mientras que las mascarillas quirúrgicas están diseñadas para un uso prolongado de tiempo y se sujetan con ataduras (Berger & Eichfeld, 2020).

Las máscaras quirúrgicas se componen de 3 capas, de las cuales 2 capas que constan de un material textil “no-tejido” y la capa del medio, con un material fibra “Melt-Blown”, capa encargada de proporcionar la capacidad de filtrado de la mascarilla, se puede visualizar en la Figura 1 cómo está dispuesta la mascarilla (Pu et al., 2018).

**Figura 1**

*Composición mascarilla quirúrgica y vista microscópica de la fibra Mel Brown*



*Nota:* Tomado de Preparation of Polypropylene Micro and Nanofibers by Electrostatic-Assisted Melt Blown and Their Application (p.959) por Pu et al., 2018, Polymers.

La fibra “Melt-Blown” es un material que se realiza al fundir plástico y luego soplarlo aleatoriamente en un barril giratorio a alta velocidad. Lo que finalmente otorga una tela compuesta de pequeños filamentos (Pu et al., 2018).

Las mascarillas quirúrgicas están diseñadas con el propósito de bloquear gotitas grandes de partículas, aerosoles o salpicaduras, y evitar que microbios, virus y bacterias, lleguen a la boca o nariz, son usadas principalmente en una dirección, esto

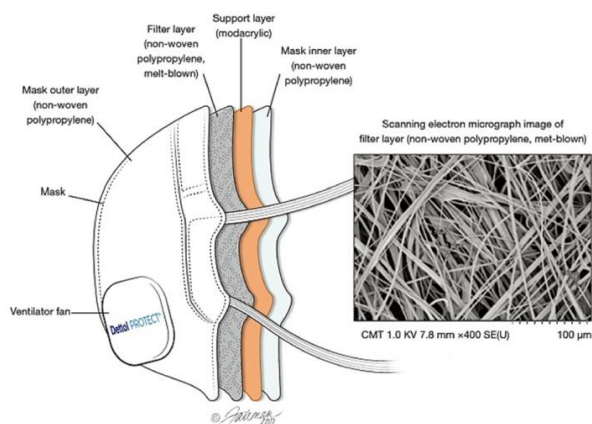
quiere decir proteger a los pacientes de los trabajadores de la salud. Las mascarillas no crean un sello hermético contra la piel, ni están en la capacidad de filtrar patógenos muy pequeños del aire (CDC, 2020).

Existen varios tipos de respiradores con diferentes funcionalidades, la principal división abarca respiradores desechables y reutilizables.

Los respiradores desechables están diseñados para proporcionar protección respiratoria y proporcionar un sello hermético del respirador contra la piel, impidiendo que atraviesen partículas que contengan virus o bacterias encontradas en el aire. Generalmente están compuestos de varias capas filtrantes de polipropileno con tecnología electrostática, bandas estirables, laminilla metálica para el ajuste de la nariz, y en algunos casos puede o no contener una válvula para la reducción del calor dentro del respirador. La inscripción o designación N95 muestra al usuario que el respirador filtra al menos el 95% de las partículas que se encuentran en el aire (3M, 2020). En la Figura 2 se puede apreciar la composición de un respirador desechable.

**Figura 2**

*Estructura de un respirador desechable N95*



*Nota:* Tomado de Assessment of a respiratory face mask for capturing air pollutants and pathogens including human influenza and rhinoviruses (p.2059), por Zhou et al., 2018, Journal of Thoracic Disease.

Los respiradores reutilizables tienen una construcción más compleja y voluminosa, pueden estar hechos de materiales como silicona y elastómeros, presentan dos válvulas intercambiables y sujeción por bandas o elásticos que permiten crear un sello hermético contra la piel. Un ejemplo de este tipo de respiradores se puede visualizar en la Figura 3 (3M, 2020).

**Figura 3**

*3M™ Respirador de Media Cara Reutilizable Serie 7500*



*Nota:* Tomado de Respirators and Surgical Masks: A Comparison (p.3), por 3M, 2020, 3M.

## **Pruebas comunes para mascarillas y respiradores**

### **Pruebas para mascarillas quirúrgicas/ de procedimiento**

Las mascarillas quirúrgicas se producen de acuerdo con los estándares de la Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (ASTM) y se clasifican en función de la resistencia a los fluidos, la eficiencia de filtración de bacterias y partículas, la transpirabilidad (caída de presión a través de la máscara) y la resistencia a las llamas (Berger & Eichfeld, 2020).

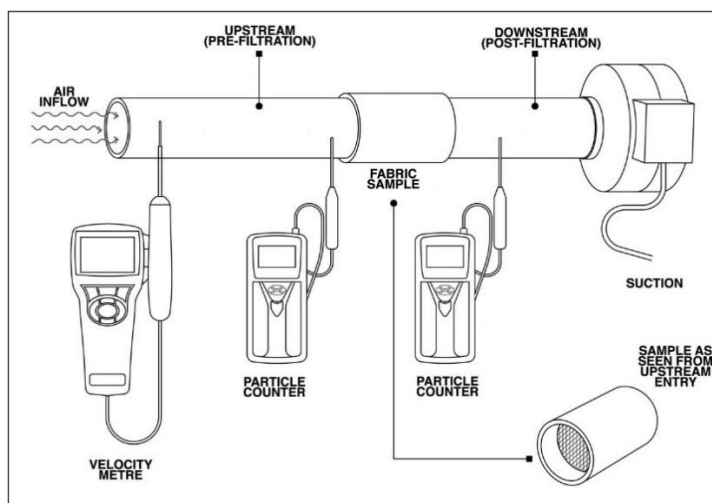
Eficiencia de filtración de partículas (PFE), esta prueba es un indicador de calidad frente a la filtración de partículas para las mascarillas quirúrgicas y de procedimientos sanitarios. Cabe recalcar que la prueba PFE no es un indicador del

desempeño de la protección del respirador. Las condiciones de la prueba PFE incluyen: aerosol de prueba de esfera de látex de poliestireno de aproximadamente  $0,1 \mu\text{m}$  de tamaño, tasa de flujo de aire de 28 litros por minuto (l/min), aerosol de prueba no neutralizado y sin preacondicionamiento. El método de prueba utilizado para evaluar PFE es el método F2299 de la ASTM, “Standard Test Method for Determining the Initial Efficiency of Materials Usen in Medical Face Masks to Penetration by Particulates Using Latex Spheres” (3M,2020).

Un esquema básico de un equipo de PFE se muestra en la Figura 4.

**Figura 4**

*Representación gráfica básica del instrumento de prueba PFE*



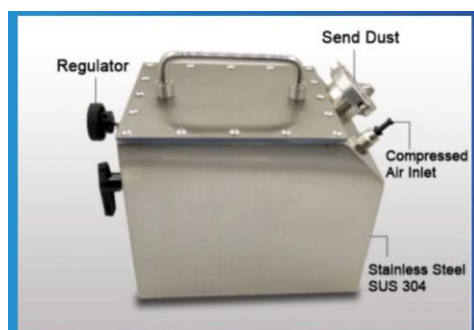
*Nota:* Tomado de Ability of fabric face mask materials to filter ultrafine particles at coughing velocity (p.10), por O'Kelly et al., 2020, BMJ Open

Los equipos para realizar pruebas de eficiencia de partículas con especificaciones como las que se aprecia en la Figura 5 se encuentran en el rango de 10000 a 25000 dólares americanos, el precio varía de acuerdo al cumplimiento de normas de funcionalidad y construcción, y de acuerdo al fabricante.



Figura 5

GB-PF400L Face Mask Particulate Filtration Efficiency Tester



#### Specifications

Item	Specification
Test range	0-99.999%
Filtration Efficiency	(20-100) L/min
Test Resistance Range	0-1000pa
Particle size	0.3, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 10.0µm
Dust source	Salt aerosol (NaCl solution)
Standard test area	100 cm <sup>2</sup> (Mask fixture can be selected)
Dimension	1220*630*1225mm
System power	<1500W
weight	250kg
Power supply	AC 220V, 50Hz

Nota: Tomado de GBPI Testing Instruments (p.1), por GBPI Testing Instruments, 2020, GBPI Testing Instruments.

La eficiencia de filtrado de partículas sigue la ecuación:

$$PFE(\%) = \frac{C_{up} - C_{dw}}{C_{up}}$$

Donde  $C_{up}$  y  $C_{dw}$  son los promedios de los recuentos ascendentes y descendentes, los resultados de PFE están entre 1 y 99,99%. Cuanto mayor sea el porcentaje representa una mejor filtración de la máscara. Para la prueba de PFE, el tamaño de partícula utilizado puede tener un tamaño de 0,1 a 5,0 µm.

Eficiencia de filtración bacteriana (BFE), esta prueba se encarga de evaluar la capacidad de una mascarilla quirúrgica y de procedimiento, para impedir el paso de partículas grandes expulsadas por el usuario. Esta prueba en ningún caso sustituye a una prueba reglamentaria de eficiencia de filtración del respirador y no evalúa la capacidad de la máscara quirúrgica y de procedimiento para proporcionar protección respiratoria al usuario. El método de prueba utilizado para evaluar BFE es el método F2101-01 de la ASTM, "Standard Test Method for Evaluating the Bacterial Filtration Efficiency (BFE) of Medical Face Mask Materials, Using a Biological Aerosol of *Staphylococcus aureus*" (3M,2020).

El método BFE se realiza de acuerdo con el protocolo ASTM F2101 que requiere gotas de aerosol bacteriano acuoso (con un diámetro de 3 µm) (ASTM F2101 - 01), y mide la capacidad de las máscaras para evitar el paso de partículas grandes, con una distribución de tamaño de 0,6 µm hasta miles de micras que son emitidas al toser, hablar y estornudar por la mascarilla del portador o paciente contagiado. Según la norma ASTM F2101, la muestra de material de la máscara se sujeta entre un impactador en cascada de seis etapas y una cámara de aerosol. El aerosol se introduce en la cámara y se extrae a través del material de la máscara utilizando un vacío, que se conecta al impactador en cascada (ASTM F2101 - 01).

La eficiencia de filtrado bacteriano de las máscaras se rige por la ecuación:

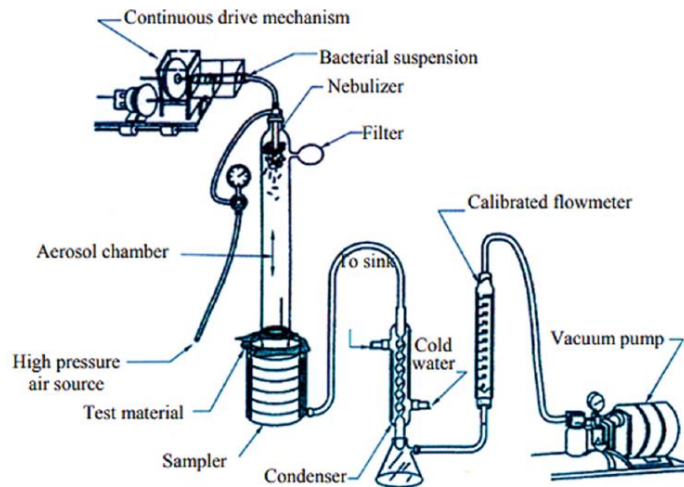
$$BFE(\%) = \frac{CFU_i - CFU_o}{CFU_i}$$

Donde  $CFU_i$  representa el promedio de bacterias que contiene el aerosol sin el filtro o elemento de prueba, y  $CFU_o$  es el promedio de bacterias con los filtros de prueba. El valor porcentual de la prueba varía entre 1 y 99.9%. Además, las mascarillas de protección alta y protección media deben proporcionar una tasa mínima de BFE del 98% y más del 99%.

Un esquema básico de un equipo de BFE se muestra en la Figura 6.

**Figura 6**

*Representación gráfica del instrumento de pruebas para BFE*



*Nota:* Tomado de Standard Test Method for Evaluating the Bacterial Filtration Efficiency (BFE) of Medical Face Mask Materials, Using a Biological Aerosol of *Staphylococcus aureus* (p.3), por ASTM F2101-01, 2014, ASTM.

Los equipos para realizar pruebas de eficiencia bacteriana con especificaciones como las que se aprecia en la Figura 7 se encuentran en el rango de 15000 a 55000 dólares americanos, el precio al igual que los equipos para pruebas de eficiencia de partículas varía de acuerdo al cumplimiento de normas de funcionalidad y construcción, y de acuerdo al fabricante.

Figura 7

*SJ-X100 filter test bench maskbacterial filtration efficiency (BFE) tester*

Main parameter	Range	Resolution	Accuracy
Anode quality control sampling flow	28.3 L/min	0.1 L/min	±2%
Sampling flow	28.3 L/min	0.1 L/min	±2%
Spray flow	0.1 – 10 L/min	0.1 L/min	±5%
Peristaltic pump flow	0.01-3 mL/min	0.01 mL/min	±2%
Operating temperature	0-50 °C		
Biosafety zone negative pressure	90 – 120 Pa		
Data storage capacity	20G		
Data output and interface	USB(3)		
HEPA performance	≥99.995%@0.3µm, ≥99.9995%@0.12µm		
Total number of positive quality control sampler particles	2200±500 cfu		
Aerosol generator mass median diameter	Average particle diameter (3.0±0.3 µm),geometric standard deviation≤1.5		
Six-stage Anderson sampler capture particle size	class I(7-14 µm); class II(4.7-9.4 µm); class III(3.3-6.7 µm); class IV(2.1-4.3 µm); class V(1.1-2.1 µm); class VI(0.6-1.1 µm)		
Aerosol chamber specifications	800 x 800 x 30mm (Length diameter thickness)		
Ventilation flow of negative pressure cabinet	>5m <sup>3</sup> /min		
Host size	Working area: 870*600*1100mm Dimensions: 1250*700*2000mm		
Working noise	< 65db		
Working power	AC220±10%, 50Hz, 1KW		



*Nota:* Tomado de SJ-X100 (p.1), por Suzhou Sujing Automation Instrument Equipment CO., LTD., 2021, SJ-X100.

Resistencia a fluidos, esta prueba se realiza en base al método de prueba ASTM F 1862, “Resistance to Penetration by Synthetic”, que permite determinar la resistencia de la mascarilla a la sangre sintética, que se le arroja de acuerdo a diferentes presiones (3M,2020). Según el protocolo ASTM F 1862, la capacidad de resistencia a la penetración de la mascarilla médica se estima utilizando sangre sintética de alta velocidad, que está en contacto con la superficie de la muestra de prueba (incluido un volumen fijo en un tiempo específico entre 0 s y 2,5 s) (ISO, 2004). Varios factores tienen un fuerte efecto sobre la penetración y la humectación de los fluidos corporales, incluidos la polaridad, la viscosidad y la tensión superficial, la estructura y la hidrofobicidad o hidrofiliidad relativa del material de la mascarilla (ISO, 2004).

Presión diferencial ( $\delta P$ ), prueba que generalmente se realiza según las “Method 1 Military Specifications: Surgical Mask, disposable (June 12, 1975)”, MIL-M-36945C 4.4.1.1.1.  $\delta P$  es la caída de presión que se mide a través del material de la máscara

quirúrgica y de procedimiento, la diferencia está relacionada con la transpirabilidad de la mascarilla (3M,2020).

Resistencia al fuego, prueba que permite determinar la inflamabilidad por clase de las mascarillas destinadas a ser utilizadas en las salas de operaciones. La FDA recomienda que se utilicen materiales de inflamabilidad de clase 1 y clase 2. a Administración de Medicamentos y Alimentos de los EE. UU. (FDA) recomienda diferentes estándares para probar la inflamabilidad, entre los que tenemos: CPSC CS-191-53 Método de prueba de inflamabilidad (16 CFR 1610) norma para la inflamabilidad de prendas textiles y NFPA 702-1980 norma para la clasificación de inflamabilidad de prendas de vestir (3M,2020).

### **Pruebas para respiradores**

Los respiradores en Estados Unidos deben cumplir con los criterios de prueba establecidos en el Código de Regulaciones Federales 42 CFR Parte 84. Los criterios de prueba para la eficiencia del filtro son dictaminados por el Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional de EE.UU. (NIOSH). Las condiciones de pruebas incluyen: aerosol de ensayo de cloruro de sodio con una partícula de diámetro aerodinámico medio de masa (MMAD) de aproximadamente 0,3 micras, tasa de flujo de aire de 85 litros por minuto (l/m), aerosol de prueba con carga neutralizada y preacondicionamiento a 85% de humedad relativa (HR) y 38°C durante 24 horas antes de la prueba (3M, 2020).

Existen varias condiciones y requisitos para la configuración de prueba basada en aerosoles de NaCl, que incluyen:

a) Partículas de aerosol no cargadas, polidispersas no tóxicas (NaCl) que se utilizan como generador de partículas y proporcionan tamaños de partículas entre 10 nm y 10  $\mu\text{m}$ , (el diámetro medio de 300 nm) (Licenciado en Letras Łazy et al., 2006).

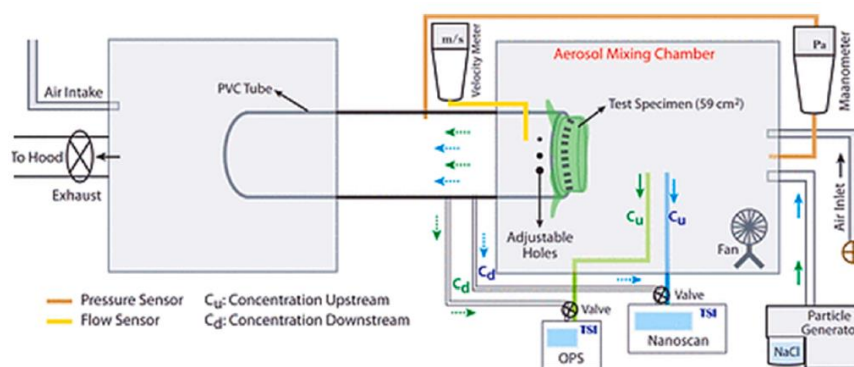
b) Las cámaras de generación, mezcla y recolección, donde el aerosol introducido se mezcló y pasó a través de la cámara de mezcla en contacto con la muestra de prueba, y junto con una entrada de aire,

c) una tasa de flujo de aire de aproximadamente 85 lpm (litros por minuto), que se sostiene en un tubo que une las dos cámaras

La configuración experimental se ilustra en Figura 8. Donde,  $C_u$  y  $C_d$  es el aerosol presente, que se muestrea antes y después de pasar (aguas arriba y aguas abajo) a través de la muestra, respectivamente.

**Figura 8**

*Esquema de la configuración de filtrado*



*Nota:* Tomado de Aerosol Filtration Efficiency of Common Fabrics Used in Respiratory Cloth Masks (p. 14), por Konda et al., 2020, ACS Nano.

## Justificación e Importancia

El brote de COVID-19 ha provocado una escasez de equipo de protección personal (EPP) en todo el mundo. Escasez que ha originado un aumento en la

producción de EPP, con seis veces la cantidad de mascarillas quirúrgicas y tres veces a cantidad de respiradores requeridos para satisfacer la demanda (Vijayakumar, 2020). Como resultado, varios equipos deficientes, inadecuados o que no cumplen con las normas y legislaciones necesarias han ingresado al mercado (Forouzandeh et al., 2021).

En la actualidad el uso de mascarillas y respiradores se ha generalizado en todo el mundo, los estándares y pruebas que se les deben realizar se han convertido en puntos de interés, así también la duración, almacenamiento y desinfección de estos equipos de protección. La eficiencia de filtración de las mascarillas bajo normativas de la ASTM, es una prueba clave que examina la capacidad para filtrar partículas, bacterias y virus, se examina el porcentaje de eficiencia de penetración de cada uno, siendo preferibles resultados más bajos (Forouzandeh et al., 2021).

Debido a la gran demanda de mascarillas y respiradores, al mercado llegaron mascarillas bajo el estándar chino KN95 que según 3M tiene especificaciones equivalentes a los respiradores NIOSH N95 de EE.UU. (3M, 2020). En la práctica, por la inmensa cantidad de fabricantes resulta muy complejo dar por sentado que todos los respiradores KN95 cumplen con el mismo estándar.

La escasez unida a la gran demanda ha originado que existan varias marcas de mascarillas y respiradores en el mercado, por lo que no existe garantía de que todos los respiradores N95 y KN95 realmente cumplan con sus correspondientes estándares de validez y funcionalidad.

El costo de los equipos para comprobar la eficacia de las mascarillas por el método de eficiencia de penetración de partículas están en un rango de \$12000 a \$25000 en el mercado chino (Alibaba, 2020), mientras que los equipos para probar

mascarillas por el método de eficiencia filtración bacteriana están en un rango de \$10000 a \$50000 en el mercado chino (Alibaba, 2020), cabe recalcar que el mercado de Asia es el más bajo en comparación con equipos americanos o europeos, mismos que fácilmente pueden doblar el costo de equipos semejantes. El alto costo para probar la eficiencia de las mascarillas obstaculiza garantizar que las mascarillas y respiradores que se comercializan y se distribuyen para el área médica y sociedad en general del Ecuador cumplan con las normativas y legislaciones necesarias para su uso como equipo de protección personal.

La calidad y eficiencia de los equipos de protección personal en el ámbito médico, juega un papel fundamental en el cuidado del personal frente a virus y bacterias de pacientes contagiados que llegan a las instalaciones de los servicios sanitarios, personal médico que se encuentra en la primera línea frente a una emergencia sanitaria, cumpliendo con la realización de pruebas y tratamiento; por lo tanto, es necesario un método accesible y que se convierta en base para la aplicación de pruebas y ensayos para la certificación de insumos médicos de diferentes proveedores.

Es por tanto que se crea la necesidad de proveer al sistema sanitario, con equipos para verificar la eficiencia de las mascarillas y respiradores, de manera de garantizar la protección de quienes la utilizan.

### **Alcance de proyecto**

#### **Componentes mecánicos**

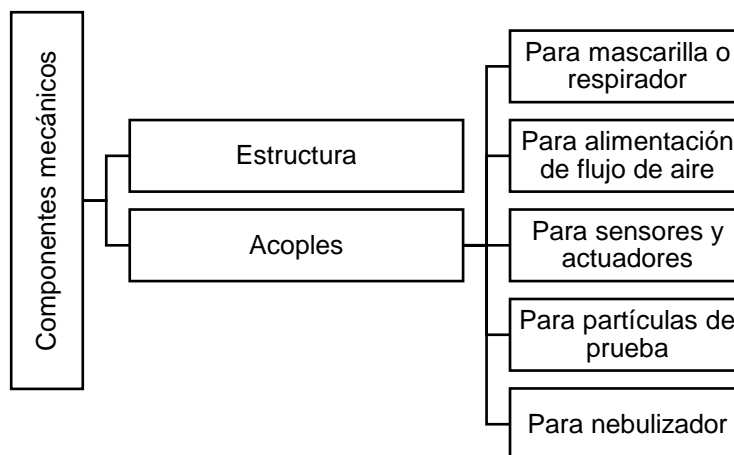
En la Figura 9 se presenta un esquema general de los componentes mecánicos a ser diseñados y/o seleccionados que estarán presentes en el proyecto:

- Estructura: Construido con perfiles de acero y acrílico.
- Acoples (varios): Construidos por impresión 3D



**Figura 9**

*Estructura general preliminar del sistema mecánico*



*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

### **Componentes electrónicos/eléctricos**

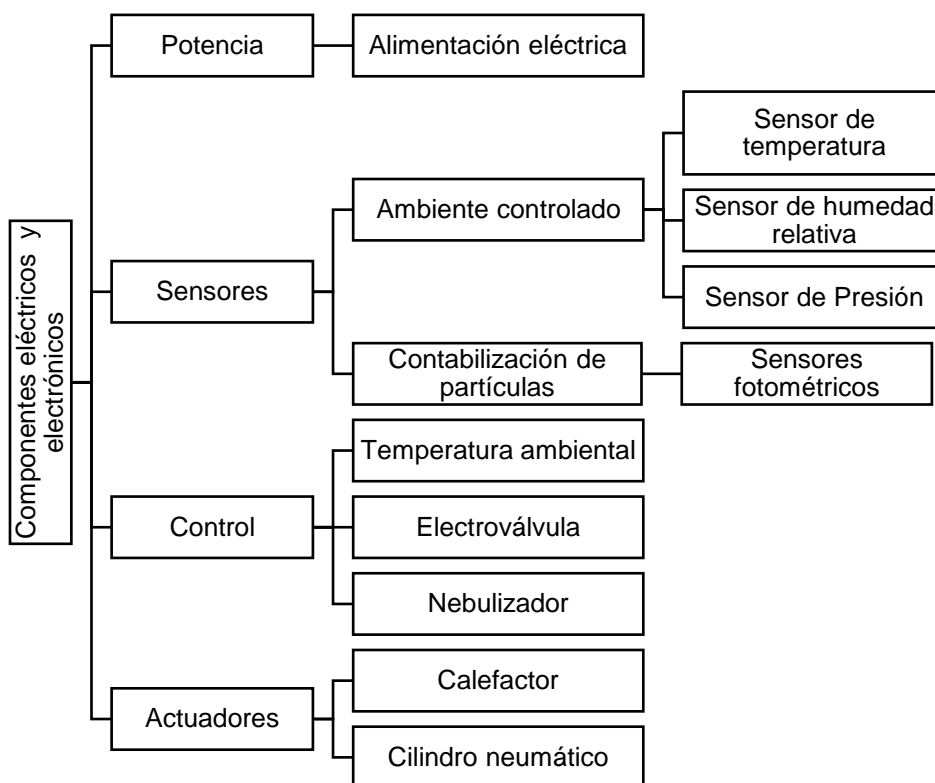
En la Figura 10 se presenta un esquema general de los componentes eléctricos y electrónicos que estarán presentes en el proyecto, y son los siguientes:

- **Potencia:** Fuente de alimentación que suministra la energía necesaria para la aplicación deseada.
- **Sensores:** Para mantener un ambiente controlado dentro de la cámara de pruebas, se utilizarán sensores de temperatura, presión y humedad, que se situarán dentro de la cámara, mientras que para contabilizar la cantidad de partículas (Upstream & Downstream particle counter) se utilizarán contadores láser basados en medidores fotométricos.
- **Control:** Permitirá controlar los parámetros de configuración para el ambiente controlado de la cámara de pruebas, y se podrá visualizar en la pantalla del sistema.

- Actuator: Calefactor, electroválvula y cilindro neumático que cumplan las características técnicas adecuadas

**Figura 10**

*Estructura general preliminar del sistema eléctrico y electrónico*



*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

### **Software para implementación, análisis y presentación de resultados.**

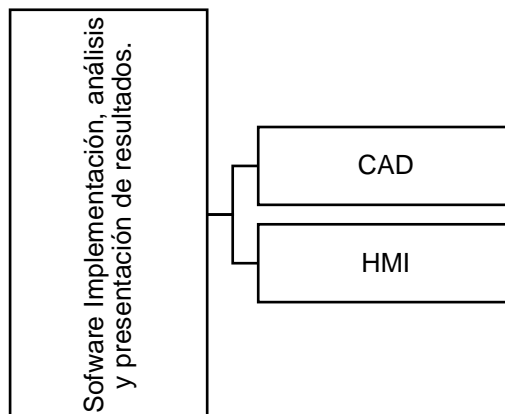
En la Figura 11 se presenta un esquema general de los componentes de software que estarán presentes en el proyecto, y son los siguientes:

- CAD/CAM: Se utilizará software de ingeniería para el diseño CAD del proyecto, para poder diseñar adecuadamente la cámara de pruebas y piezas de acople para sensores, actuadores y elementos de prueba.

- HMI: Se realizará una interfaz gráfica mediante la utilización de software libre que permita controlar las fases de operación de la máquina y que permita mostrar los datos obtenidos de las pruebas.

**Figura 11**

*Estructura de software implementación, análisis y simulación referencial*

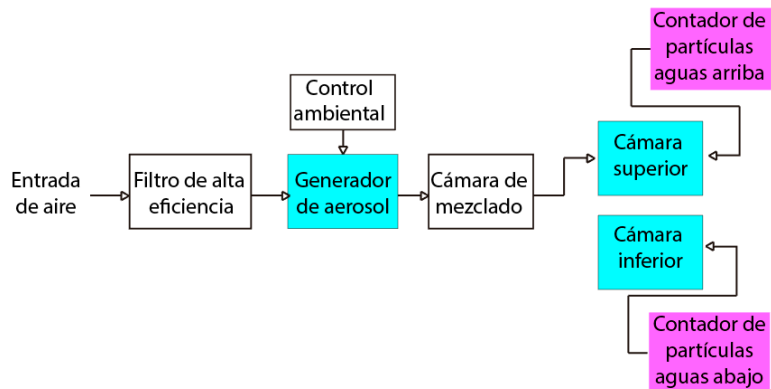


*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

En la Figura 12 se presenta el principio en el que se basará el funcionamiento del sistema de prueba para mascarillas.

**Figura 12**

*Principio de funcionamiento del sistema referencial*



*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

- Diseñar y construir un prototipo para la validación y certificación de la capacidad de filtrado de mascarillas y respiradores según ASTM – F2299.

### **Objetivos Específicos**

- Diseñar y construir una cámara de pruebas que aloje los componentes mecánicos y electrónicos.
- Diseñar e implementar un sistema para el transporte y nebulización de partículas de prueba hacia la cámara de pruebas.
- Diseñar e implementar un sistema de fotometría láser para contabilizar partículas de látex de poliestireno en el rango de 1 - 5 micras.
- Diseñar e implementar un sistema que monitoree y controle las condiciones ambientales de la cámara de pruebas.
- Presentar los resultados de las pruebas de mascarillas mediante una interfaz gráfica.

## **Capítulo II**

### **Fundamentación Teórica**

En el presente capítulo se abordan y muestran los fundamentos teóricos sobre los cuáles se trabajarán en el transcurso de la investigación.

#### **Covid19: Generalidades**

El virus coronavirus-2, el cual se relaciona con el síndrome respiratorio agudo severo (SARS-CoV-2) es el agente causante de la enfermedad llamada enfermedad por coronavirus (COVID -19). El SARS-Cov-2 se transmite entre personas por contacto a través de gotitas respiratorias que son expulsadas al hablar, toser y estornudar, su transmisión también puede ocurrir a través del contacto indirecto con objetos y superficies contaminados, de esta manera el virus penetra a través de las mucosas de la boca, nariz y ojos, actuando principalmente en las vías respiratorias (Garcia et al., 2021).

La Organización Mundial de la salud (OMS) referente al uso de equipos de protección personal (EPP) recomienda que el profesional de salud debe mantener una distancia física de al menos un metro o utilizar estructuras plásticas como barrera frente a la evaluación preliminar del paciente sospechoso, en caso de que no sea posible la distancia física el profesional de la salud deberá utilizar mascarilla quirúrgica y protección ocular, para brindar atención directa a pacientes con COVID-19 es necesario el uso de mascarilla quirúrgica, capa, guantes y protección ocular (gafas o pantalla facial). Durante la atención directa a pacientes con COVID-19 en procedimientos que generen aerosoles, el profesional debe utilizar mascarilla N95 con estándar FFP2 o FFP3, capa, guantes, protección ocular y mandil impermeable (Garcia et al., 2021)

Los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC) recomienda usar una máscara facial en caso de que no hay un respirador disponible, capa, guantes y protección ocular, adicional el profesional debe mantener un lavado de manos antes y después del contacto con el paciente, y antes de ponerse y quitarse los equipos de protección individual, la limpieza se debe realizar con alcohol al 60-95% de concentración o con agua y jabón con un tiempo de lavado de al menos 20 segundos (Garcia et al., 2021).

### **Transmisión aérea**

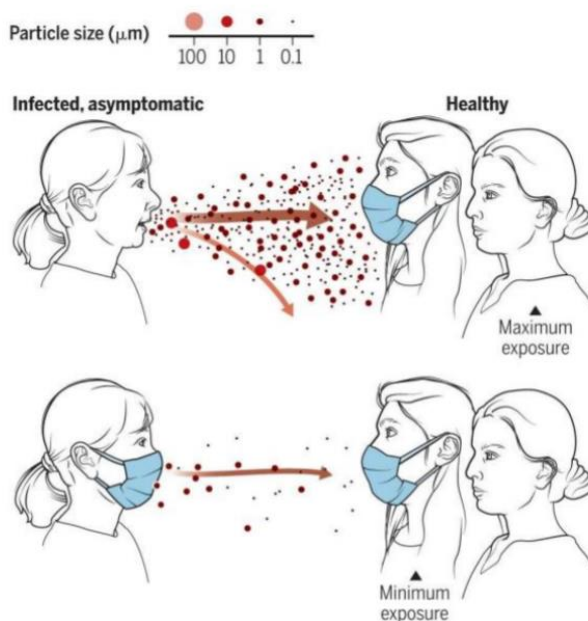
Las gotitas y aerosoles respiratorios son el principal método de contagio del SARS-Cov-2, se puede apreciar su transmisión en la Figura 13, en donde las gotas de líquido que contienen el virus tienen un tamaño entre 5 y 10  $\mu\text{m}$ , y a través de aerosoles que son de menos de 5 $\mu\text{m}$ . La propagación y suspensión de las gotitas comienza cuando una persona infectada transmite hacia el aire las gotitas al hablar o respirar, las gotas más grandes (>20 $\mu\text{m}$ ) caen sobre los objetos o superficies, mientras que las gotas más pequeñas (<5-10 $\mu\text{m}$ ) se evaporarán en el aire. Las gotas de 1 $\mu\text{m}$  de tamaño son capaces de permanecer en el aire por un tiempo mayor a las 12 horas, una persona con tos fuerte o estornudos es capaz de lanzar gotitas hasta una distancia de aproximadamente 6 metros. Un estudio encontró que el 40% y 30% de los aerosoles y las gotas respiratorias de personas infectadas dieron positivas por coronavirus cuando los sujetos no utilizaban mascarillas, mientras que cuando utilizó mascarilla, no se pudo detectar el coronavirus en aerosoles o gotas, esto indica que el uso de la mascarilla ayuda a prevenir la propagación del virus de individuos infectados (Prather et al., 2020).

Figura 13

*Cómo las máscaras faciales ayudan a reducir la transmisión aérea*

### Masks reduce airborne transmission

Infectious aerosol particles can be released during breathing and speaking by asymptomatic infected individuals. No masking maximizes exposure, whereas universal masking results in the least exposure.



*Nota:* Tomado de Reducing transmission of SARS-CoV-2 (p.1423), por Prather et al., 2020, Science.

### Materiales de mascarillas

Los materiales más utilizados en la fabricación de mascarillas contienen sustancias fibrosas no tejidas como propileno, papeles de vidrio, fieltro de lana, entre otros. Se utiliza estos materiales ya que son capaces de soportar altas temperaturas sin cambios en su estructura (O'Dowd et al., 2020).

El método de fabricación de las mascarillas usa la técnica de soplado en fusión, durante la cual las cargas se imparten al material creando un campo eléctrico casi permanente que proporciona una filtración adecuada de partículas por fuerza electrostática. El tamaño de poros, la organización de las fibras, carga de las fibras,

grosor y diámetro de las fibras proporcionan la estructura de las mascarillas, de la cual depende para obtener la eficiencia de filtración del material (O'Dowd et al., 2020).

Un estudio muestra que los filtros electret o fibras no tejidas tienen una alta eficiencia de filtración con baja resistencia al aire y gran capacidad de retención de polvo frente a filtros fibrosos convencionales. La filtración al funcionar con fuerzas electrostáticas depende de la propiedad dieléctrica del material, por lo tanto, los mejores materiales para mascarillas y respiradores son el polipropileno (PP), el polietileno y el poliácritonitrilo (PAN), ya que son materiales con alta resistencia y estabilidad eléctrica (Van Turnhout et al., 1980).

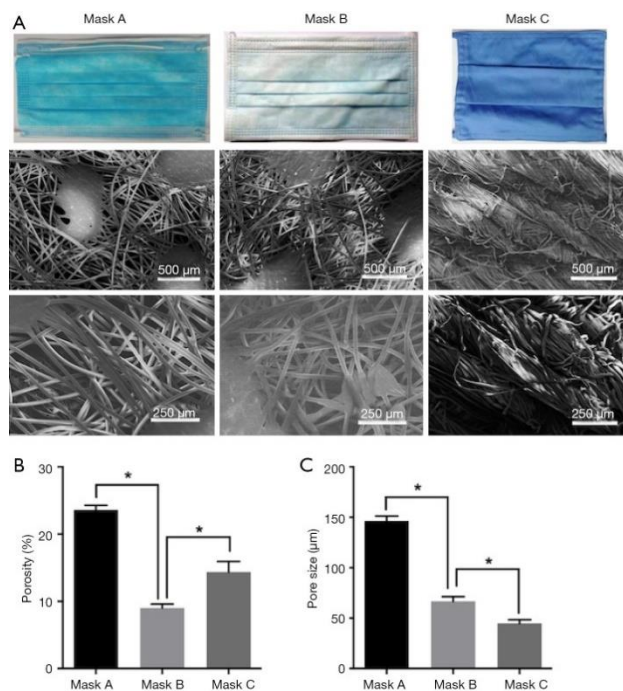
Las mascarillas poseen de 3 a 5 capas, las 3 capas principales y fundamentales incluyen i) tejido de PP hilado, ii) capa intermedia con PP fundido y capa externa con tejido de PP hilado similar a la capa (i), la capa intermedia actúa como filtro, su estructura presenta huecos y es la encargada de evitar que partículas dañinas ingresen a la vía respiratoria del individuo que usa la mascarilla (O'Dowd et al., 2020).

En la Figura 14 se muestran tres mascarillas con diferente eficiencia de filtración, porosidad y resistencia al flujo de aire, la mascarilla A tiene un filtro, la mascarilla B con dos filtros y una mascarilla C de tela lavable, el estudio concluye que la mascarilla B al tener menor porosidad y mayor eficiencia proporcionó la mejor filtración, la mascarilla A al tener grandes vacíos redujo significativamente la eficiencia de filtración, y la mascarilla C provocaba dificultades respiratorias ya que poseía la mayor resistencia al flujo de aire (O'Dowd et al., 2020).



**Figura 14**

*Factores que intervienen en la eficiencia de una mascarilla*

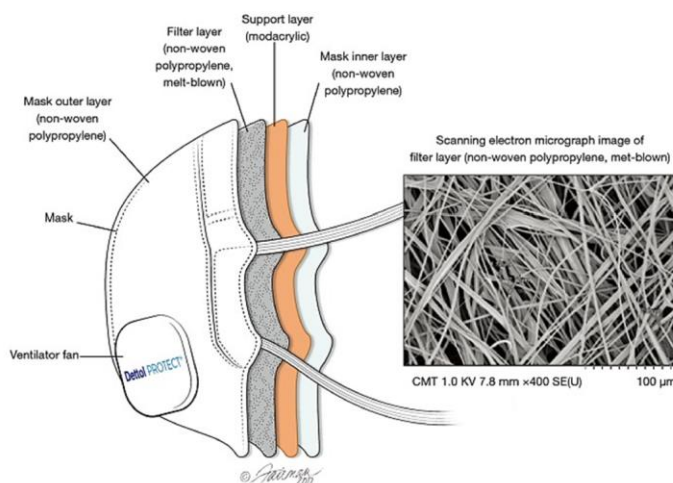


*Nota:* (A) Imágenes microscópicas que muestran la estructura de la fibra de diferentes mascarillas, (B) Porosidad, (C) Distribución del tamaño de los huecos de la mascarilla. Tomado de Understanding the factors involved in determining the bioburdens of surgical masks (p.754), por Liu et al., 2019, Annals of Translational Medicine

Un respirador puede constar de cuatro a cinco capas diferentes de filtros, la capa más interna y la capa exterior consiste en PP no tejido, material predominantemente hidrofóbico, lo que evita que la humedad sea absorbida, las capas intermedias dotan de un soporte modacrílico que otorga la forma y espesor al respirador, la capa de PP no tejido captura partículas no deseadas, en la Figura 15 se muestran las capas de un respirador N95.

**Figura 15**

*Estructura de un respirador desechable N95*



*Nota:* Tomado de Assessment of a respiratory face mask for capturing air pollutants and pathogens including human influenza and rhinoviruses (p.2059), por Zhou et al., 2018, Journal of Thoracic Disease

## Normas y legislación

La efectividad de una mascarilla o un respirador lo determinan dos factores importantes, la eficiencia de filtración y el ajuste que posee al rostro del individuo. La eficiencia de filtración mide qué tan bien la mascarilla o respirador filtra partículas de un rango de tamaño específico, mientras que el ajuste mide que tan bien previene la fuga alrededor de la pieza. De acuerdo a la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) las mascarillas se dividen en los niveles 1, 2 y 3 de ASTM en función de la eficiencia de resistencia a los fluidos, mientras que en Europa las mascarillas médicas cumplen con los requisitos de la norma europea EN 14683:2019 (European Commission, 2020).

Los respiradores son más eficaces en comparación con las mascarillas, en EE.UU., el instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH), es la encargada de determinar la eficiencia de filtración de los respiradores, y los divide en

las series N,R y P, para respiradores no resistentes al aceite, algo resistentes al aceite y muy resistentes, respectivamente, cada una de las series tiene diferentes eficiencias en sus diferentes presentaciones al 95,99 y 99.97%, y en su nomenclatura siempre consta la serie y la eficiencia, a saber, N95, R95, P99, etc. (Code of Federal Regulations,1995).

En Europa, los respiradores pueden clasificarse como medias máscaras filtrantes con piezas faciales filtrantes (FFP), medias máscaras, respirador o purificador de aire motorizado (PAPR) y respirador de suministros de atmósfera (SAR). Los FFP según la norma europea EN 149:2001 se dividen en FFP1, FFP2 y FFP3 con una eficiencia del 80%, 94% y 99% respectivamente. El estándar N95 se cumplen con FFP2 o FFP3 (British Standards Institution, 2001). La Figura 16 muestra las diferentes categorías de equipo de protección respiratoria (EPR) utilizado por personal médico.

**Figura 16**

*Máscaras y respiradores basados en estándares de la UE*



*Nota:* El gráfico se desglosa en: (a) mascarilla médica; (b) respirador; (c) respirador elastomérico; (d) respirador con válvula espiratoria; (e) respirador motorizado y con suministro de aire; (f) respiradores con suministro de atmósfera. Tomado de Medical masks and Respirators for the Protection of Healthcare Workers from SARS-CoV-2 and other viruses (p.207), por Ippolito et al., 2020, Pulmonology.

## Mascarillas y respiradores – regulaciones en Ecuador

Ecuador cuenta con el Reglamento Técnico INEN 181(2R) “Equipos de protección respiratoria”, que reglamenta y norma a los equipos de protección respiratoria, mismo que incluye a las mascarillas y respiradores para el uso general e industrial. El reglamento técnico ecuatoriano implanta los requisitos que tienen que cumplir los equipos de protección respiratoria

En el reglamento se encuentra información referente a las mascarillas y respiradores que se detallan en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Términos y secciones de la norma INEN 181 2R*

<b>Sección</b>	<b>Detalle</b>
Definición	Media Mascara Filtrante. Se refiere a un adaptador que cubre boca, nariz y el mentón, puede o no tener válvulas de inhalación y exhalación. Fabricada principalmente de material filtrante.
Requisitos	Las medias máscaras filtrantes de protección respiratoria, deben cumplir con los requisitos establecidos en la norma EN 149 o normas equivalentes.
Requisitos de marcado, rotulado e instrucciones	Las medias máscaras filtrantes de protección respiratoria, deben cumplir con los requisitos de marcado establecidos en la Norma EN 149 o normas equivalentes.

Sección	Detalle
Ensayos para evaluar la conformidad	Las medias máscaras filtrantes de protección respiratoria, objeto deben cumplir con los ensayos establecidos en la Norma EN 149 o normas equivalentes.

*Nota:* Resumen elaborado por Ñaguazo E., términos y seccionados tomado de la norma INEN 181 2R,

El reglamento establece que las mascarillas deben tener el marcado que se detalla a continuación:

- Nombre de la mascarilla o respirador, marca o identificación de la empresa fabricante.
- Tipo de mascarilla o modelo
- Clasificación: FFP1/2/3
- Número y año de la norma (EN-149:2001+A1=2010)

En caso de que los productos cuenten con un Certificado de Marca de Conformidad CE, se debe mostrar esta marca para la identificación.

Las mascarillas autofiltrantes (respiradores) también pueden cumplir la normativa americana 42CFR84, la norma establece los procedimientos y detalla los requisitos para la aprobación por parte del Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) relacionados con los respiradores o modificaciones de estos productos aprobados. Este tipo de mascarillas cuenta con el siguiente marcado:

- Nombre de la mascarilla o respirador, marca o identificación de la empresa fabricante.
- Tipo de mascarilla o modelo

- Clasificación: N95/99/100, R95/99/100, P95/99/100.
- Número de Aprobación por parte de NIOSH

Las mascarillas autofiltrantes (respiradores) también pueden cumplir la Norma China GB- 2626 – Equipos de protección respiratoria, esta norma especifica los requerimientos técnicos, métodos de ensayo e insignias. Las mascarillas se identifican con el marcado detallado a continuación:

- Nombre de la mascarilla o respirador, marca o identificación de la empresa fabricante.
- Tipo de mascarilla o modelo
- Clasificación: KN90/95/100, KP90/95/100.
- Número y año de la norma (GB-2626:2006)

## **ASTM – F2299**

### **Significado y Uso**

La norma ASTM – F2299 es un método de prueba estándar para determinar la eficiencia inicial de los materiales utilizados en mascarillas médicas para la penetración de partículas utilizando esferas de látex, con respecto al significado y uso tenemos las siguientes generalidades:

- Este método de prueba establece procedimientos para medir la eficiencia de filtración inicial de partículas de los materiales utilizados en mascarillas médicas que utilizan aerosoles monodispersos.
- El procedimiento de prueba mide y cuantifica la eficiencia de filtración al comparar el conteo de partículas de la corriente de alimentación (aguas arriba) con el conteo de partículas de la corriente filtrada (aguas abajo).

- Este método de prueba proporciona técnicas de prueba específicas para tanto los fabricantes como los usuarios para evaluar los materiales cuando son expuestos a tamaños de partículas de aerosol entre 0,1 y 5,0  $\mu\text{m}$ .
- Este método de prueba establece una base de eficiencia para la comparación entre materiales de mascarillas médicas
- Este método de prueba no evalúa la efectividad general de mascarillas médicas para prevenir la fuga hacia el interior de partículas nocivas.
- El diseño de la mascarilla médica y el ajuste de la mascarilla médica al rostro del usuario no son evaluados en esta prueba.
- Este método de prueba no es adecuado para evaluar materiales utilizados en ropa de protección para determinar su eficacia contra los peligros de las partículas (ASTM,2017).

### **Equipo**

El equipo que se utiliza en la prueba ASTM – F2299 son los siguientes:

- Suministro de aire comprimido limpio y seco
- Filtros HEPA
- Generador de aerosoles
- Soporte de filtro de prueba y conjunto de conductos
- Dispositivo de medición de caída de presión
- Detectores de temperatura y humedad
- Contadores ópticos de partículas (ASTM,2017).

### **Desarrollo de la prueba**

El desarrollo de la prueba consiste en los siguientes pasos:

*Sin muestra (mascarilla o respirador)*

- i. Limpieza del conducto con aire, limpio, seco con temperatura constante a una velocidad de aire de 0.5-25 cm/s.
- ii. Generar un aerosol de partículas de látex.
- iii. Calibrar el sistema, calculando la penetración de las partículas, usando los sensores contadores de partículas (este paso nos otorga el número de intervalos de muestreo de la prueba).

*Con muestra (mascarilla o respirador)*

- iv. Suministrar al conducto con aire, limpio, seco con temperatura constante a una velocidad de aire de 0.5-25 cm/s.
- v. Contabilizar las partículas con los sensores fotométricos aguas arriba (antes de la muestra) y aguas abajo (después de la muestra)
- vi. Calcula la eficiencia a través de la fórmula:

$$eficiencia = 1 - penetración = 1 - \frac{\text{promedio partículas aguas bajo}}{\text{promedio partículas aguas arriba}}$$

*Presentación de resultados*

- vii. Una vez concluya todas las iteraciones y se obtenga el resultado de la eficiencia, este dato debe ir acompañado de los siguientes datos: temperatura, humedad y presión del conducto de prueba (ASTM,2017).



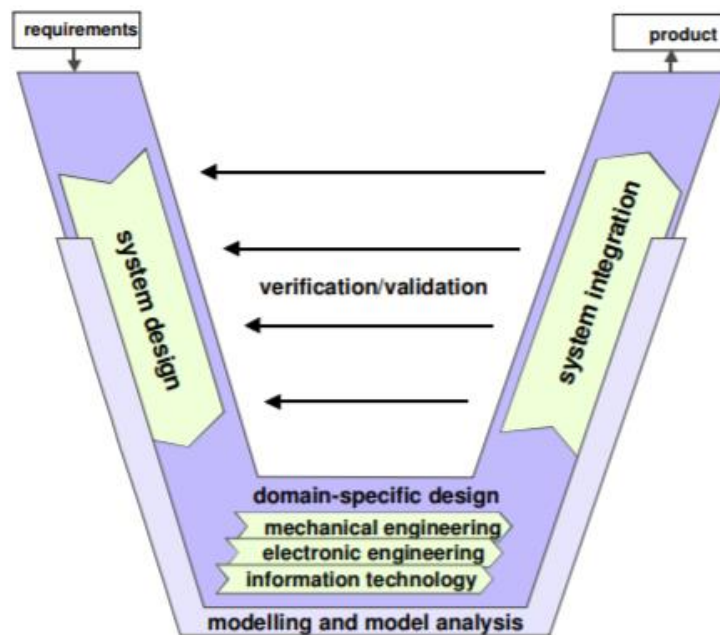
## Capítulo III

### Desarrollo del Sistema

En el presente trabajo se seguirá la metodología de la norma VDI 2206 que se muestra en la Figura 17, la metodología permite mejorar procesos y la planificación de proyectos orientados a la mecatrónica, por lo cual, se procedió a determinar los requerimientos del proyecto, se dividió en subsistemas y finalmente estos subsistemas se integran para otorgar el prototipo final.

**Figura 17**

*Modelo en V*



*Nota:* Obtenido de V-MODELS FOR INTERDISCIPLINARY SYSTEMS ENGINEERING (p.748), por Graessler et al., (2018), 15th International Design Conference.

### Requerimientos

Los requerimientos fueron definidos mediante encuesta por un grupo de 10 funcionarios en el área de salud del Hospital Gineco Obstétrico Nuevo Aurora, Hospital

Pablo Arturo Suárez y Hospital Carlos Andrade Marín. El análisis de requerimientos se acompañó con la herramienta Casa de Calidad o House of Quality, la cual permite analizar requerimientos del cliente y técnicos, estos últimos se encuentran en la Norma ASTM-F2299, "Standard Test Method for Determining the Initial Efficiency of Materials".

### **Diseño del sistema**

En esta etapa se conceptualizó opciones para cada subsistema, acompañada de una selección y evaluación de conceptos basado en el diseño y desarrollo de conceptos de Ulrich & Eppinger.

### **Diseño Específico**

Los conceptos analizados para cada subsistema se diseñaron mediante el uso de herramientas de modelamiento CAD/CAM.

### **Integración del sistema**

La integración del sistema se realizó mediante el mueble base como estructura física y en cuanto a software el encargado es el microcontrolador Arduino.

### **Verificación de las propiedades**

La verificación de las propiedades del sistema se detalla en el capítulo 4, para lo cual se ha utilizado el Diseño de experimentos (DOE) acompañados de análisis ANOVA.

### **Modelado y análisis de modelos**

El modelado y análisis de modelos se abordó en la etapa del diseño específico y la integración del sistema, en los cuales se tomó en cuenta los modelos para el comportamiento de los subsistemas para su control.

## Producto

El producto que se obtuvo es un prototipo capaz de probar la capacidad de filtración de mascarillas y respiradores.

A continuación, se presenta la Tabla 2 que resume todos los requerimientos del sistema.

**Tabla 2**

*Requerimientos del sistema*

No	Importancia	Requerimientos del Sistema
1	10	Facilidad de Uso
2	5	Adaptable para mascarillas y respiradores
3	4	Compacta
4	7	Bajo costo de mantenimiento
5	9	Fiable
6	6	Larga vida útil
7	1	Facilidad de instalación
8	8	Costo accesible
9	2	Replicable
10	3	Fácil lectura de resultados

*Nota:* Los requerimientos antes mencionados fueron obtenidos por personal de salud, elaborado por Iñaguazo E.

La tabla 3 resume los requerimientos técnicos del producto.

**Tabla 3**

*Requerimientos técnicos del producto*

No	Requerimientos Técnicos
1	Reporte de resultados solicitados por la norma
2	Repetibilidad en las pruebas
3	Recipiente continuo de paredes rectas, ininterrumpido.
4	Nebulización de partículas

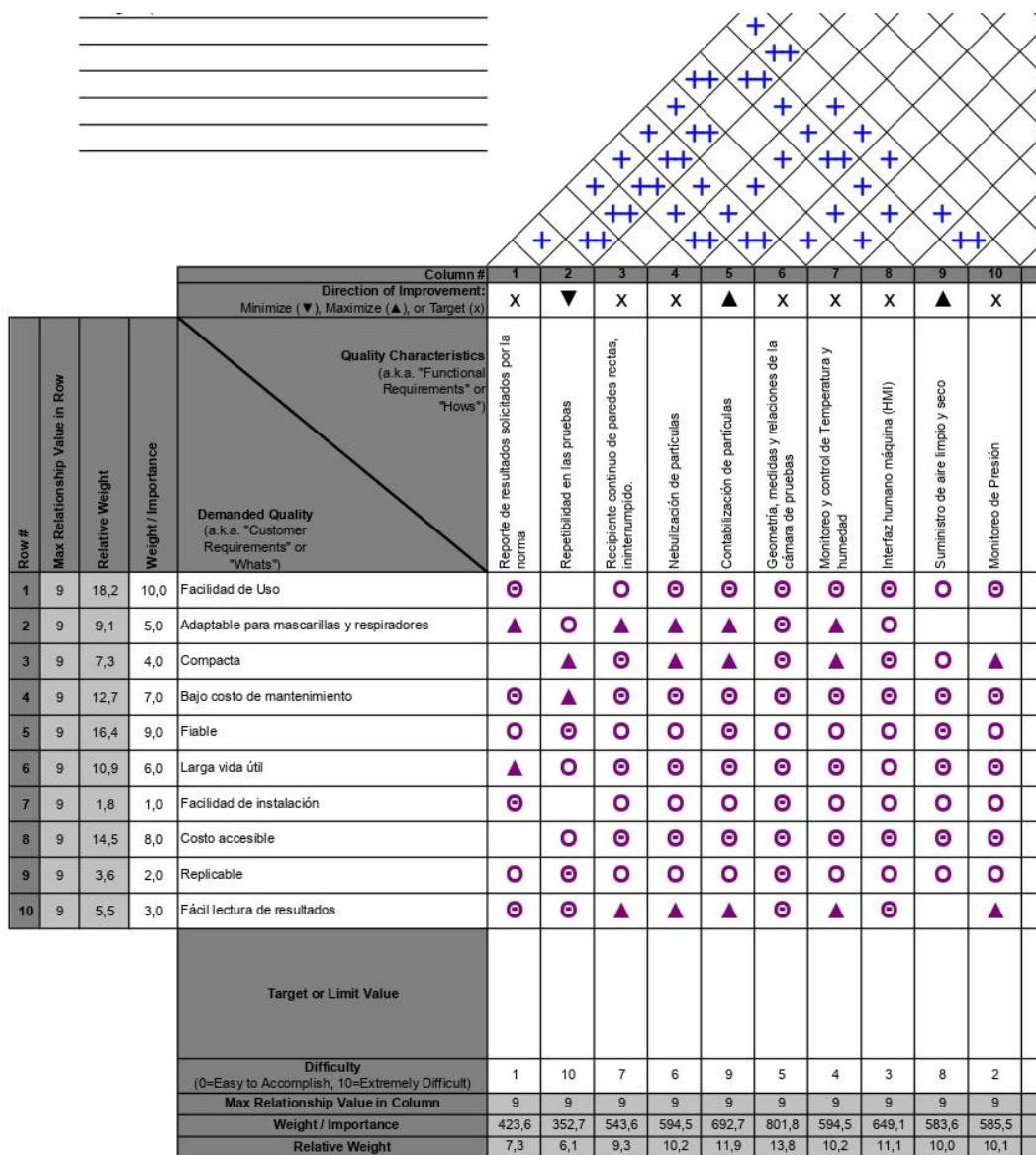
<b>No</b>	<b>Requerimientos Técnicos</b>
5	Contabilización de partículas
6	Geometría, medidas y relaciones de la cámara de pruebas
7	Monitoreo y control de Temperatura y humedad
8	Interfaz humano máquina (HMI)
9	Suministro de aire limpio y seco
10	Monitoreo de Presión

*Nota:* Los requerimientos técnicos fueron obtenidos de la norma ASTM-F2299, elaborado por Iñaguazo E.

Una vez que se establece los requerimientos del sistema, se utiliza la herramienta Casa de la Calidad, para obtener el porcentaje de importancia de los requerimientos técnicos, su desarrollo se muestra en la Figura 18.

Figura 18

Casa de la Calidad del proyecto



Nota: Elaborado por Iñaguazo E.

La Casa de Calidad otorga los resultados presentados en la Tabla 4 cuya organización se muestra de acuerdo a su peso relativo en el prototipo.

**Tabla 4***Peso Relativo para los requerimientos técnicos*

<b>No</b>	<b>Requerimientos Técnicos</b>	<b>Peso Relativo</b>
6	Geometría, medidas y relaciones de la cámara de pruebas	13.8
5	Contabilización de partículas	11.9
8	Interfaz humano máquina (HMI)	11.1
7	Monitoreo y control de Temperatura y humedad	10.2
4	Nebulización de partículas	10.2
10	Monitoreo de Presión	10.1
9	Suministro de aire limpio y seco	10.0
3	Recipiente continuo de paredes rectas, ininterrumpido.	9.3
1	Reporte de resultados solicitados por la norma	7.3
2	Sistema de Control de Presión	6.1

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Apoyados en la norma VDI 2206, el prototipo se ha dividido en subsistemas, en la Tabla 5 se presentan cada uno de ellos junto a su requerimiento técnico que debe cumplir.

**Tabla 5***Subsistemas del Proyecto*

<b>No</b>	<b>Subsistema</b>	<b>Requerimiento técnico</b>
1	Hardware Mecánico	6,5,8,7,4,10,9,3,2
2	Sistema de transporte y nebulización de partículas de prueba	7,4,10,9,3
3	Sistema de fotometría láser	6,5,4,9,3
4	Sistema de monitoreo y control	8,7,10
5	Sistema de presentación de resultados	8,2

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Adicional en el desarrollo se utilizará la metodología de dos etapas para la selección de conceptos presente en el libro “Diseño y Desarrollo de Productos”. La primera etapa consta del filtrado de conceptos y la segunda etapa la evaluación de conceptos (Ulrich & Flores Valentín, 2013).

### Desarrollo del Hardware mecánico

El subsistema de hardware mecánico detalla los requerimientos mecánicos del prototipo, medidas, geometría y relaciones establecidas por la norma ASTM – F2299, este subsistema posee el requerimiento técnico con mayor peso, ya que la estructura que se construye en este sistema sirve de soporte o acondicionamiento para los otros subsistemas del prototipo. Los requerimientos se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6**

*Requerimientos de la norma ASTM – F2299 referente al hardware mecánico*

Requerimiento	Valor o relación
Conducto continuo de paredes rectas	-
Conducto sin fugas de aire	-
Sección transversal de la tubería	2 a 6 pulgadas
Distancia entre inyección de aerosol y elemento de prueba	Mínimo de $10 \phi_p$
Medidores de presión	$1 \phi_p$ arriba y abajo del medio filtrante
Sondas para extracción de aerosol	Área transversal <10% del $\phi_p$
Distancia entre sonda aguas arriba y aerosol	Mínimo de $8\phi_p$
Distancia entre sonda aguas arriba y elemento de prueba	$2\phi_p$
Distancia entre sonda aguas abajo y elemento de prueba	$3\phi_p$
Longitud línea de muestreo	<100 cm

Requerimiento	Valor o relación
Línea de transporte de muestra total	<200 cm
Sellado de muestra no distorsione su integridad	-

*Nota:*  $\varnothing_p$  es el diámetro del conducto principal del prototipo, tabla elaborada por Iñaguazo E.

Este subsistema se ha dividido en conducto principal de prueba, mueble base y sellado de muestra.

### Selección del conducto principal de prueba

El tipo de material se escoge de acuerdo a las necesidades que requiere el conducto, que se muestran en la Tabla 7.

**Tabla 7**

*Requerimientos de la norma ASTM – F2299 referente al conducto de prueba*

Requerimiento	Aplicación
Buen aislante térmico	Almacene calor
Buen aislante eléctrico	Sin afectarse de entorno eléctrico
Transparencia	Visualizar elementos internos
Buena Moldeabilidad	Material en forma tubular
Buena Mecanizabilidad	Permita cortes o perforaciones
Durabilidad para agua salada y dulce	En contacto con agua oxigenada y medicamentos
No tóxico	Contacto con elementos de prueba médicos
Reciclable	Reutilización

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

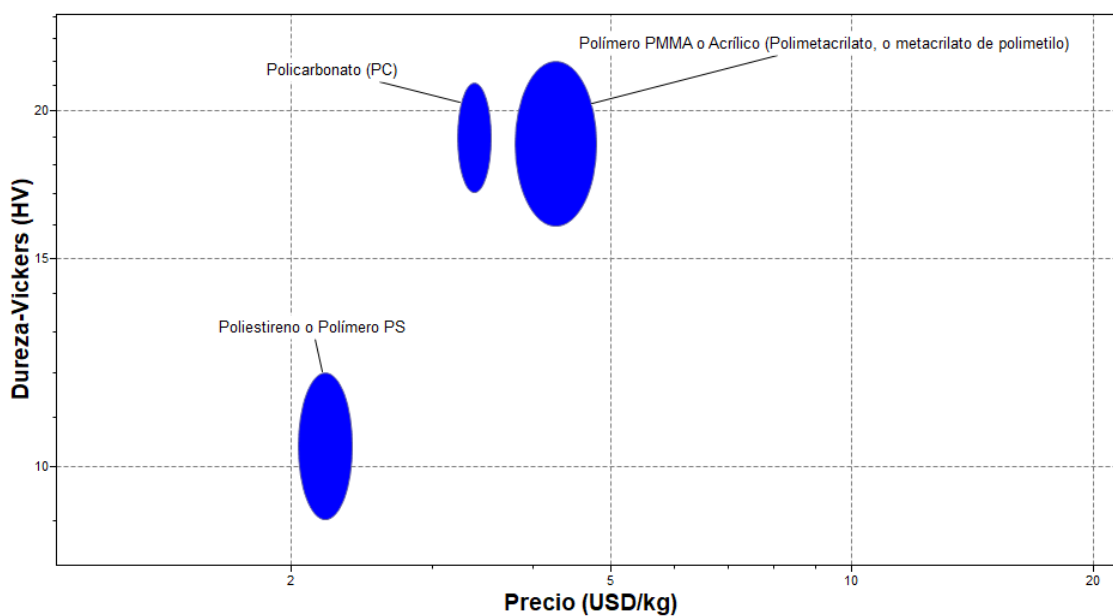


De acuerdo a estos requerimientos se utilizó la herramienta de selección de materiales a través del método Ashby, colocando los requerimientos previamente detallados y se obtuvieron 3 materiales que se muestran en la Figura 19, la cual relaciona el precio frente a la dureza, siendo los más óptimos, los siguientes:

- Policarbonato
- Acrílico
- Poliestireno

**Figura 19.**

*Materiales aptos para el conducto de prueba*



*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E. Método Ashby para selección de materiales.

Por la disponibilidad en el mercado se descarta el poliestireno ya que no se encuentra en forma tubular, y de acuerdo a la disponibilidad de tubos de policarbonato y acrílico con diámetro entre 2 a 6 pulgadas de acuerdo a la disposición de la norma, se descarta el policarbonato ya que en el mercado resulta difícil conseguir entre ese rango

de medidas, concluyendo que el material óptimo para la aplicación de este prototipo es el acrílico o polímero Polimetilmetacrilato (PMMA).

Una vez definido que se trabajará con el acrílico como material, se realizó pruebas con un acrílico de  $\frac{3}{4}$ " de diámetro exterior y 2mm de espesor, el mismo que sirvió de prueba para definir la orientación y disposición de la tubería de prueba, se eligió este diámetro ya que la disponibilidad del material y el costo lo hacían favorable para una etapa de experimentación.

En la Tabla 8 se muestran los datos de las diferencias entre la lectura de aguas arriba y aguas debajo de los sensores fotométricos para las diferentes orientaciones de la tubería.

**Tabla 8**

*Resultados de la experimentación con 3 disposiciones diferentes de tubería*

	<b>Disposición de tubería y dirección de aire</b>		
	<b>Horizontal</b>	<b>Vertical (arriba hacia arriba)</b>	<b>Vertical (abajo hacia arriba)</b>
	14739	14371	11389
	14834	12654	14592
	12237	13989	12514
<b>Diferencia</b>	11030	12736	12663
<b>entre</b>	14744	11116	10974
<b>lectura</b>	14580	14166	12169
<b>aguas</b>	11114	13187	11070
<b>arriba vs</b>	14953	10952	12181
<b>agua abajo</b>	12441	12167	14898
	10943	11870	11174
	12815	13567	13727
	13598	14628	10948

<b>Disposición de tubería y dirección de aire</b>		
<b>Horizontal</b>	<b>Vertical (arriba hacia arriba)</b>	<b>Vertical (abajo hacia arriba)</b>
11578	14903	14118
10961	11129	11359
14805	11078	13604
13839	13554	12287
11324	13002	13582
11966	13405	12349
13913	11257	13469
11515	12057	13820

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Con los datos se elabora un análisis ANOVA de 1 factor y 3 niveles, asumiendo varianzas iguales para verificar si todas las medias son iguales o no todas las medias son iguales, obteniendo los resultados de la Tabla 9.

**Tabla 9**

*Análisis de Varianza – ANOVA 1 factor*

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>Factor</b>	2	640357	320179	0,17	0,844
<b>Error</b>	57	107282420	1882148		
<b>Total</b>	59	107922778			

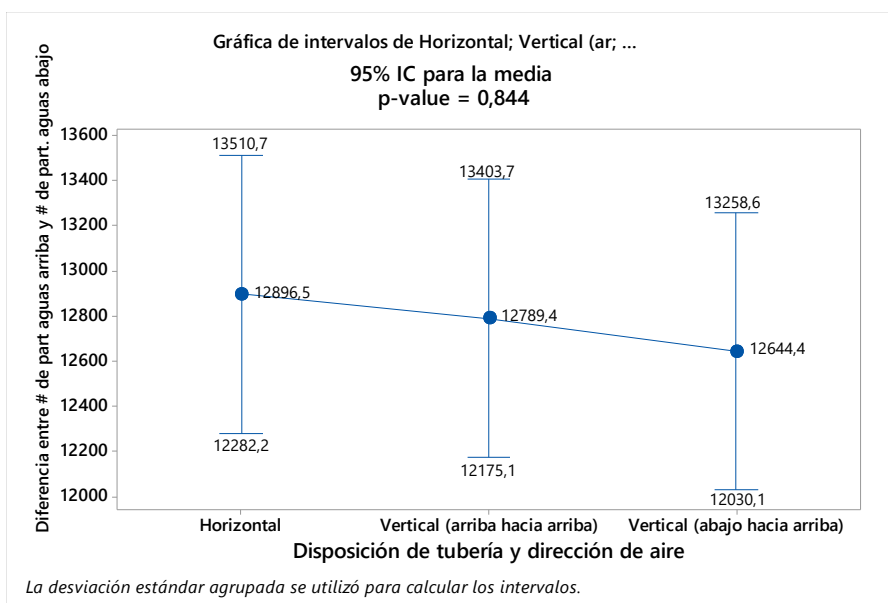
*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

El P-value es mayor que 0.05 (valor de alpha) por lo que se acepta la hipótesis nula (todas las medias son iguales), y se concluye que la orientación de la tubería no tiene influencia en las mediciones de partículas para los sensores fotométricos aguas arriba y aguas abajo.

En base a la Figura 20 de intervalos, la disposición vertical de tubería y dirección de aire de abajo hacia arriba es con la que obtenemos menor diferencia entre las medidas de los sensores, tomando en cuenta este análisis, y que la disposición de esta tubería requerirá menor tamaño del mueble base, se elige para los posteriores diseños.

**Figura 20**

*Gráfica de intervalos – Análisis ANOVA 1 factor*

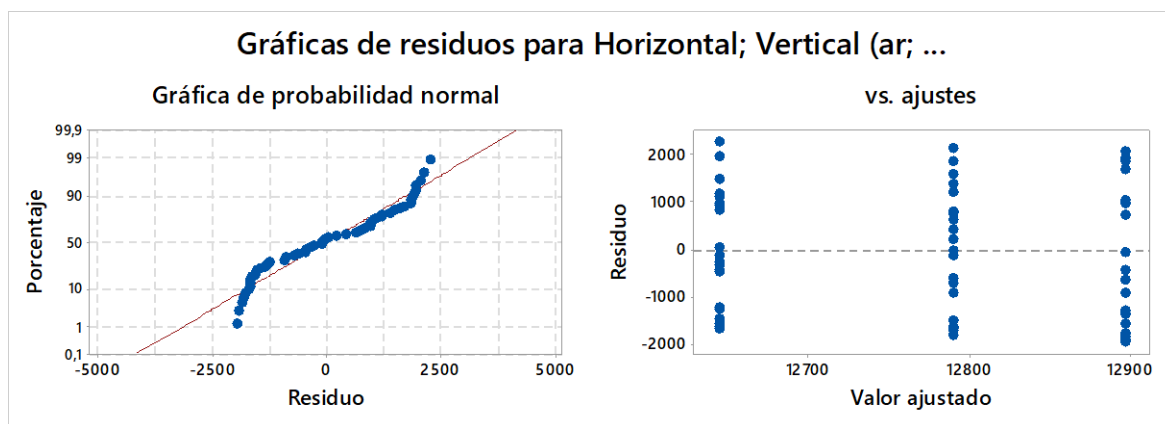


*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

La Figura 21 muestra normalidad de los datos e independencia de los datos.

Figura 21

Gráfica de residuos – Análisis ANOVA 1 factor



Nota: Elaborado por Iñaguazo E.

La Tabla 10 junto a la Figura 22 basados en una normalidad que se obtuvo del análisis ANOVA 1 factor 3 niveles, respalda el asumir las varianzas iguales ya que se obtiene un P-value mayor a 0.05, y se acepta la hipótesis nula que nos indica que todas las varianzas son iguales.

Tabla 10

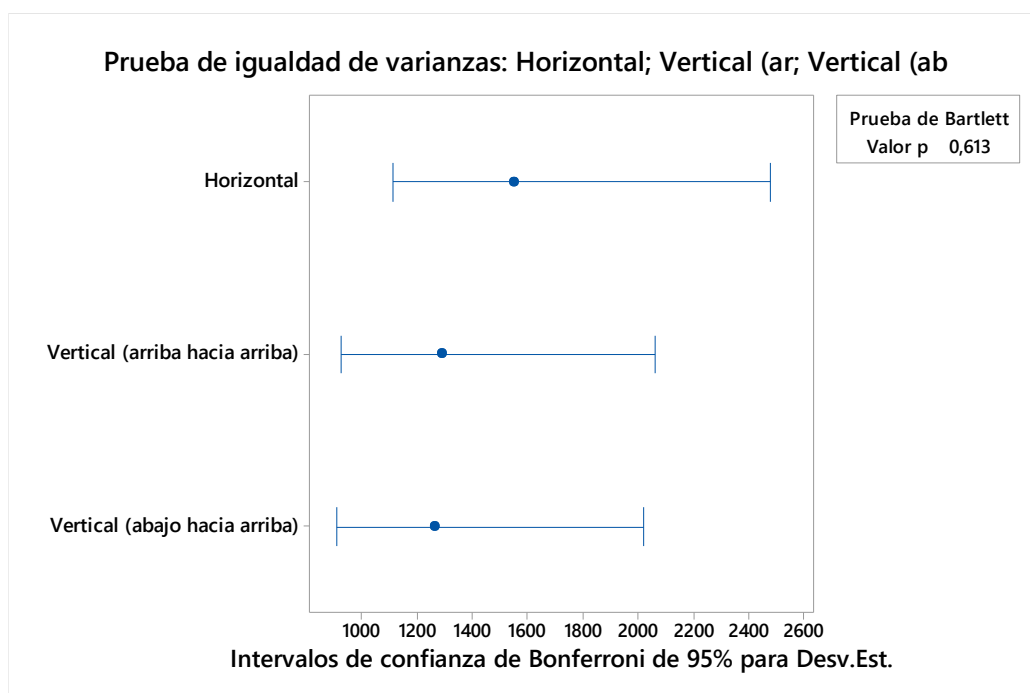
Prueba Método Bartlett – Prueba de igualdad de varianzas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Bartlett	0,98	0,613

Nota: Elaborado por Iñaguazo E.

Figura 22

Gráfica para la prueba – Prueba de igualdad de varianzas



Nota: Elaborado por Iñaguazo E.

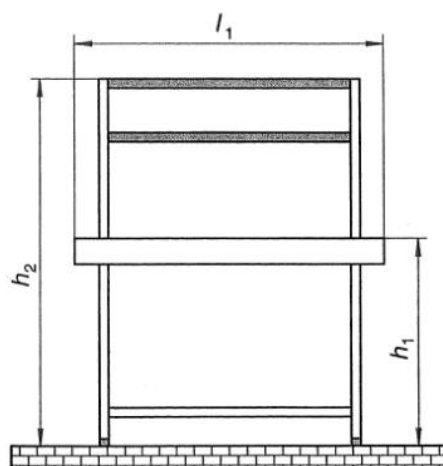
De acuerdo a la norma se puede trabajar con conductos de 2 a 6 pulgadas, por motivo de cumplir con los requerimientos de bajo costo y compacto se optó por adquirir 2 tubos de acrílico de 2 pulgadas de diámetro y 24 pulgadas de largo.

### Mueble base

Para el diseño del mueble base se tomó en cuenta la norma NTE INEN 1641, Muebles de Oficina. Escritorios y Mesas. Requisitos, junto con la norma EN\_13150\_2001, Workbenches for laboratories – Dimensions, safety requirements and the methods, esta última es exclusivamente destinada a equipos de laboratorios. Una representación de las mesas de laboratorios se muestra en la Figura 23.

**Figura 23**

Vista Frontal de un mueble de laboratorio



*Nota:* Tomado de Workbenches for laboratories: Dimensions, safety requirements and test methods (p.5), por British Standards Institution, 2001, BSI.

La mesa de trabajo se diseña para que la operación sea llevada a cabo por el operario de pie o sentado y se toma en cuenta las distancias para los diferentes componentes del prototipo, las medidas a destacar se presentan en la Tabla 11.

**Tabla 11**

*Dimensiones para las variables de los muebles de laboratorio*

	<b>Parte</b>	<b>Dimensión en mm</b>
$h_1$	Altura de la superficie de trabajo, solo de pie	650 a 1250
$l_1$	Largo	Múltiplos de 300

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Se dispone fabricar el mueble base y toda estructura con planchas de aglomerado de 15mm de espesor.

Se toma en cuenta los valores y relaciones establecidos por la norma ASTM – F229 en la Tabla 6 y los datos del conducto para el dibujo en software CAD.

**Tabla 12**

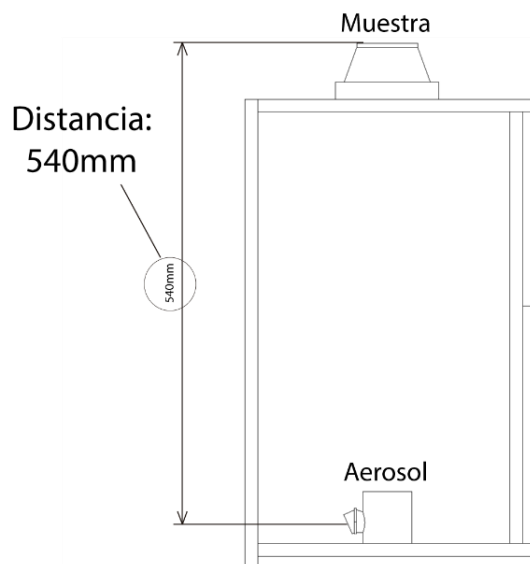
*Distancia requerida por la norma: aerosol - muestra*

<b>Requerimiento de la norma ASTM – F2299</b>	<b>Valor o relación</b>	<b>Valor en mm</b>
Distancia entre inyección de aerosol y elemento de prueba	Mínimo de $10 \phi_p$	508

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

**Figura 24**

*Representación de distancia entre inyección de aerosol y elemento de prueba*



*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.



Tabla 13

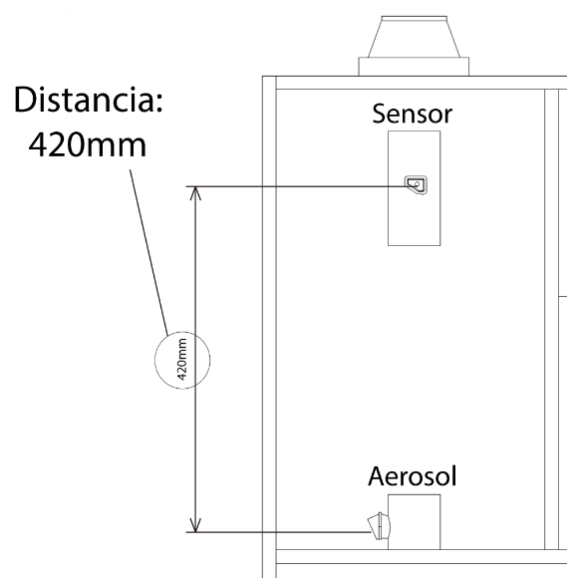
Distancia requerida por la norma: sonda aguas arriba- aerosol

Requerimiento de la norma ASTM – F2299	Valor o relación	Valor en mm
Distancia entre sonda aguas arriba y aerosol	Mínimo de $8\phi_p$	406.40

Nota: Elaborado por Iñaguazo E.

Figura 25

Representación de la distancia entre sondas aguas arriba y aerosol



Nota: Elaborado por Iñaguazo E.

Tabla 14

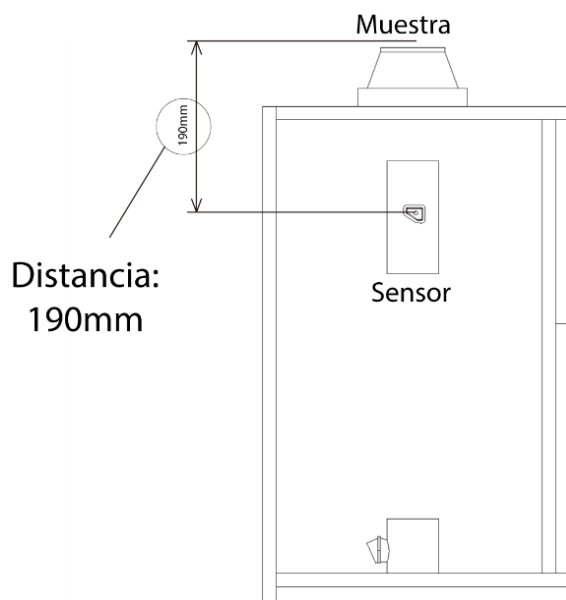
Distancia requerida por la norma: sonda aguas arriba - muestra

Requerimiento de la norma ASTM – F2299	Valor o relación	Valor en mm
Distancia entre sonda aguas arriba y elemento de prueba	$2\phi_p$	101.60

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Figura 26

*Representación de la distancia entre sonda aguas arriba y elemento de prueba*



*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Tabla 15

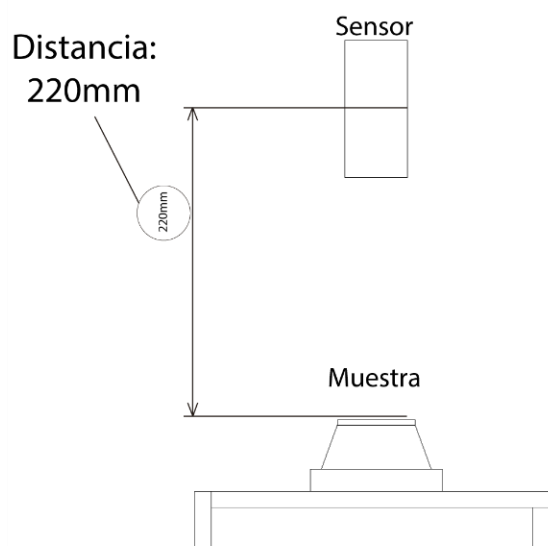
*Distancia requerida por la norma: sonda aguas abajo - muestra*

Requerimiento de la norma ASTM – F2299	Valor o relación	Valor en mm
Distancia entre sonda aguas abajo y elemento de prueba	$3\phi_p$	152.40

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Figura 27

*Representación de la entre sonda aguas abajo y elemento de prueba*



*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Tabla 16

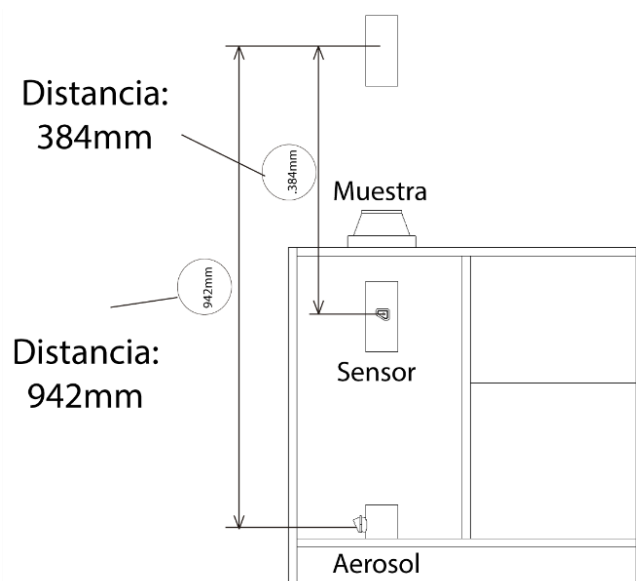
Distancia requerida por la norma: Longitud total

Requerimiento de la norma ASTM – F2299	Valor o relación	Valor en mm
Longitud línea de muestreo	<100 cm	<1000
Línea de transporte de muestra total	<200 cm	<2000

Nota: Elaborado por Iñaguazo E.

Figura 28

Representación de la longitud de la línea de muestreo y longitud de la línea de transporte de muestra total

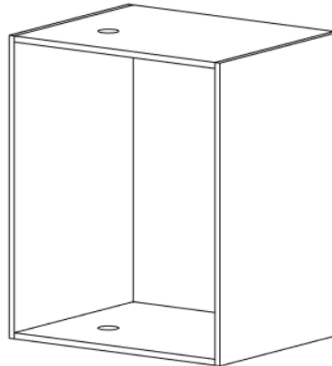


Nota: Elaborado por Iñaguazo E.

Se toma en cuenta todas las consideraciones para diseñar la estructura exterior en aglomerado de 15mm de espesor, con dimensiones 600x500x750 (largo x ancho x alto), se muestra en la figura 29.

**Figura 29**

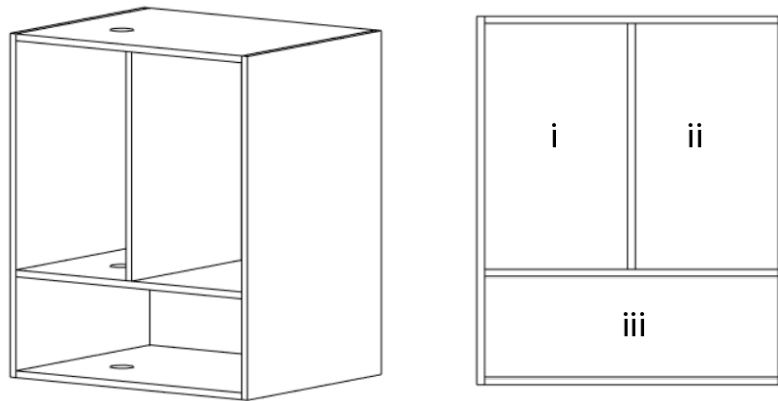
*Estructura exterior del mueble base*



*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Adicional se dejaron espacios para albergar la parte eléctrica y diferentes equipos que serán necesarios para la nebulización y control de temperatura, tomando en cuenta las medidas anteriores. La división vertical se encuentra a 292.50 mm de una tapa lateral y la división horizontal se encuentra a 500 mm de la tapa superior, estos 3 espacios se muestran en la Figura 30 y se describen a continuación:

- i. Espacio para la tubería y conductos de prueba
- ii. Espacio para el control de temperatura
- iii. Espacio para la nebulización.

**Figura 30***Divisiones del mueble base**Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Modificaciones con respecto a agujeros u optimizaciones del mueble base fueron llevadas a cabo en los otros subsistemas de acuerdo a las necesidades de acoplamiento.

### **Diseño del sistema para sellado de muestra**

En esta etapa es necesario que la mascarilla o respirador, como elemento de prueba se encuentre en una superficie tal que permita un agarre firme para que la mascarilla se encuentre templada y totalmente plana, y se experimentó con 2 tipos de agarres: unión tipo pin y unión roscada hasta llegar al diseño final – unión por accionamiento neumático, todo el proceso se describe a continuación.

#### **Unión tipo pin**

Este tipo de unión usa agujeros en los cuales se inserta un pin o pasador, es una unión simple, que utiliza un tipo de ajuste fijo para unir las piezas a presión, basado en esto se diseñaron 2 piezas que se muestran en la Figura 31(A) y su implementación se muestra en la Figura 31(B), fabricada por impresión 3D en material PLA.

**Figura 31**

*Acoples para unión tipo pin*

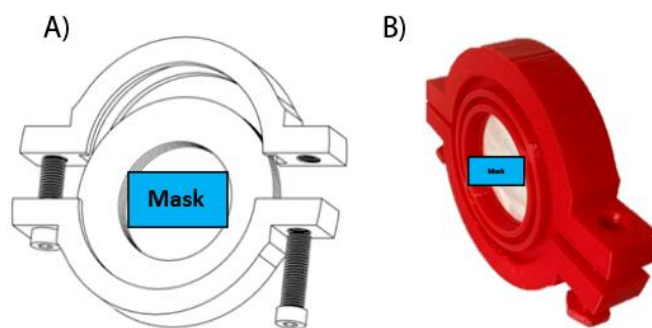


*Nota:* (A) Diseño del acople, (B) Acople físico

Posteriormente se diseña un tipo de ajuste tipo brida para alojar la unión tipo pin como se muestra en la Figura 32(A) y su implementación se muestra en la Figura 32(B), fabricadas por impresión 3D en material PLA.

**Figura 32**

*Acoples para ajuste tipo Brida*



*Nota:* (A) Diseño del acople, (B) Acople físico

Después de probar este ajuste y unión se obtienen ventajas y desventajas que se describen a continuación:

*Ventajas:*

- Diseño sencillo
- Fácil impresión
- Fácil tipo de unión y ajuste del elemento de prueba

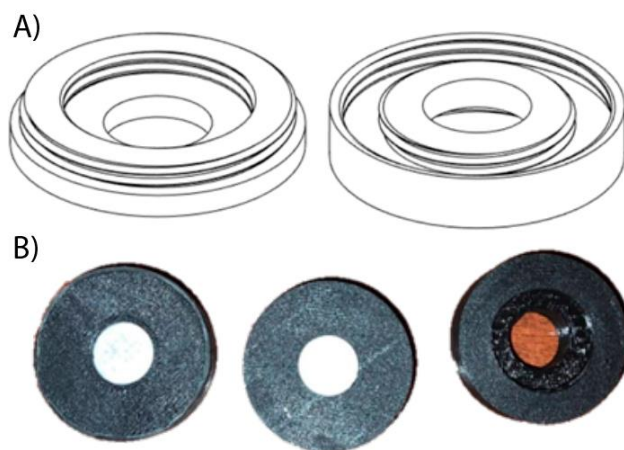
*Desventajas:*

- Operación manual con posibles fallos
- Gran cantidad de piezas (6)
- Requiere empaques para garantizar hermeticidad
- Pines de la unión propensa a romperse
- Se requiere cortar una muestra de la mascarilla o respirador para ser colocado en la unión
- Podría incurrir en un cambio de sección durante la unión con el conducto principal

**Unión roscada**

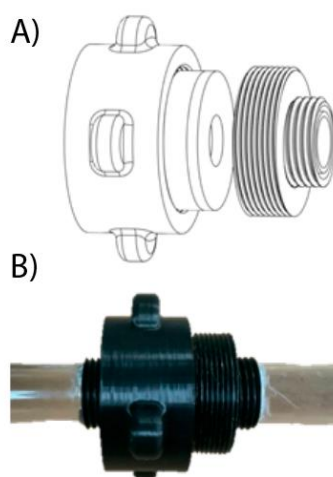
Es un tipo de unión que se puede desmontar y se basa en la combinación de dos piezas, con dos componentes: perno que tiene una rosca por el exterior y la tuerca que tiene una rosca por el interior, basado en esto se diseñaron 2 piezas que se muestran en la Figura 33 (A) y su implementación se muestra en la Figura 33(B), fabricadas por impresión 3D en material PLA.



**Figura 33***Acoples para unión roscada*

*Nota:* (A) Diseño del acople, (B) Acople físico

Posteriormente se diseña un tipo de ajuste roscado para alojar la unión tipo pin como se muestra en la Figura 34(A) y su implementación se muestra en la Figura 34(B), fabricadas por impresión 3D en material PLA.

**Figura 34***Acoples para ajuste roscado*

*Nota:* (A) Diseño del acople, (B) Acople físico

*Ventajas:*

- Diseño con dificultad media
- Fácil impresión
- Fácil tipo de unión y ajuste del elemento de prueba

*Desventajas:*

- Operación manual con posibles fallos
- Gran cantidad de piezas (7)
- Requiere empaques para garantizar hermeticidad
- Se requiere cortar una muestra de la mascarilla o respirador para ser colocado en la unión

**Diseño final – unión por accionamiento neumático**

Posterior a las pruebas con los tipos de uniones y ajustes descritos anteriormente se diseña un sistema que tenga la menor cantidad de piezas móviles, la operación manual se reduzca y que no sea necesaria cortar muestras de la mascarilla o respirador para su colocación como elemento de prueba. Para lo cual se escoge trabajar con un cilindro neumático de doble efecto, una electroválvula 5/2 y una fuente de alimentación neumática.

*Cilindro neumático*

Entre las opciones disponibles en el mercado y de acuerdo a su uso, se utilizó un cilindro neumático de doble efecto de 10 mm de recorrido construido de aluminio, para facilitar su fijación se escoge un modelo rectangular ya que al poseer lados planos se adhiere perfectamente a estructuras planas. En la Figura 35 se muestra el cilindro.

**Figura 35**

*Cilindro neumático TN10-100*



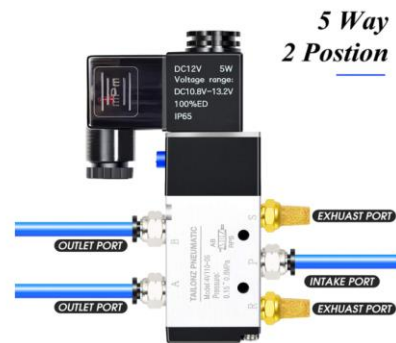
*Nota:* Tomado de Amazon Store (p.1), por Amazon, (2021), Amazon.

#### *Electroválvula*

Se eligió una electroválvula que pueda ser controlada mediante un accionamiento externo y el funcionamiento manual del cilindro neumático sea automatizado. Entre las opciones disponibles en el mercado se elige una que trabaje bajo presión normal de un compresor convencional (entre 0 y 145 psi), con voltaje DC < 12V y tenga 2 posiciones que permita accionar al cilindro neumático, por lo que se elige la electroválvula 5 vías 2 posiciones, 12V, la válvula se muestra en la Figura 36.

**Figura 36**

Válvula solenoide NPT de 1/8 pulgadas



*Nota:* Tomado de Amazon Store (p.1), por Amazon, (2021), Amazon.

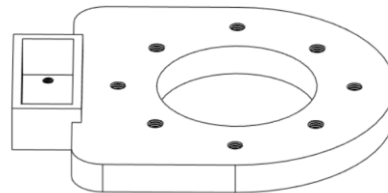
El cilindro neumático se ha de fijar en una estructura que conecte con el mueble base, de modo que se diseñan los acoples para tubería de 2 pulgadas, mismos que se describen a continuación:

*Acoples para la funcionalidad de la unión por accionamiento neumático*

Se diseñó el acople móvil que conectará el cilindro neumático con el conducto de prueba, la unión se realizó a través de 2 tornillos Allen M3x0.5, su diseño se muestra en la Figura 37.

**Figura 37**

*Acople para unión del cilindro y conducto de acrílico*

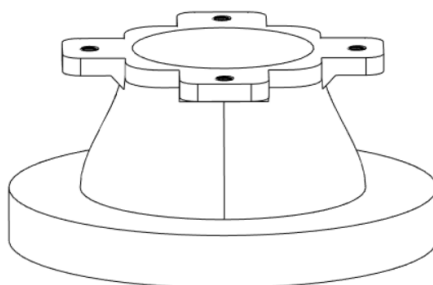


*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Se diseñó el acople móvil que se muestra en la Figura 38, mismo que conecta a la parte anteriormente descrita mediante 4 tornillos tipo Allen cabeza plana M5x0.8 y que permitirá el sellado o cierre del mecanismo junto con el conducto de acrílico.

**Figura 38**

*Acople para cierre del mecanismo neumático*

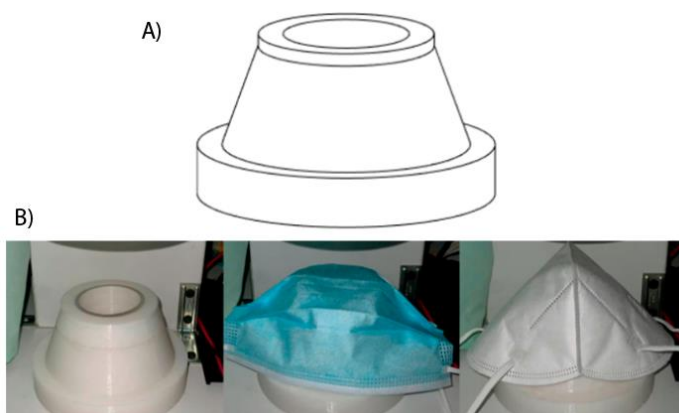


*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

El acople fijo que se muestra en la Figura 39(A) conecta con la parte anterior y cierra el sistema, esta parte se fijará contra el mueble base, la parte fue impresa en PLA y permite ubicar la mascarilla o respirador, su aplicación se muestra en la Figura 39(B).

**Figura 39**

*Acople universal de cierre*

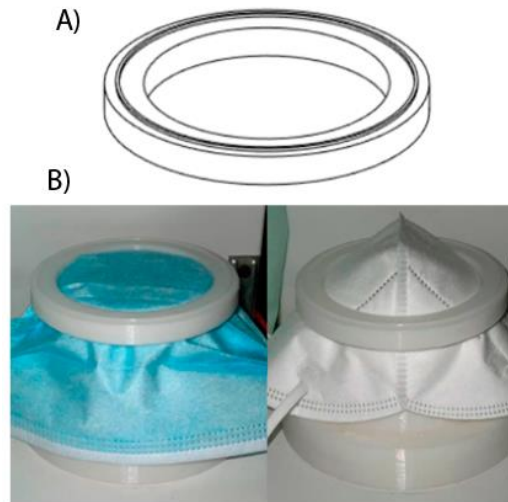


*Nota:* (A) Diseño del acople, (B) Acople físico

Para fijar la mascarilla y templar la mascarilla se utiliza el acople que se muestra en la Figura 40(A), la parte fue impresa en PLA y su aplicación se muestra en la Figura 40(B).

**Figura 40**

*Acople tensor de mascarilla o respirador*

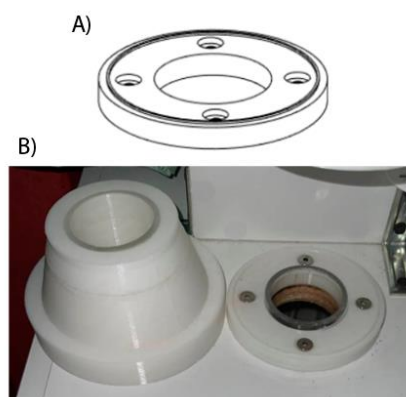


*Nota: (A) Diseño del acople, (B) Acople físico*

El acople fijo se junta con el mueble base mediante la pieza de la Figura 41(A) para lo cual se utiliza 4 tornillos tipo Allen cabeza plana M5x0.8, la pieza fue impresa en PLA y su aplicación se muestra en la Figura 41(B).

**Figura 41**

*Acople para unión entre acople universal cierre y mueble base*

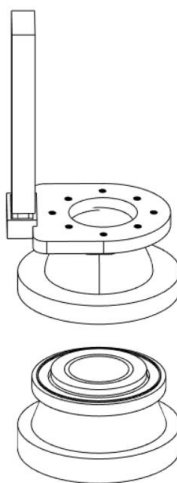


*Nota: (A) Diseño del acople, (B) Acople físico*

Todo el diseño del sistema se muestra en la Figura 42.

**Figura 42**

*Ensamble del diseño para sellado de muestra*

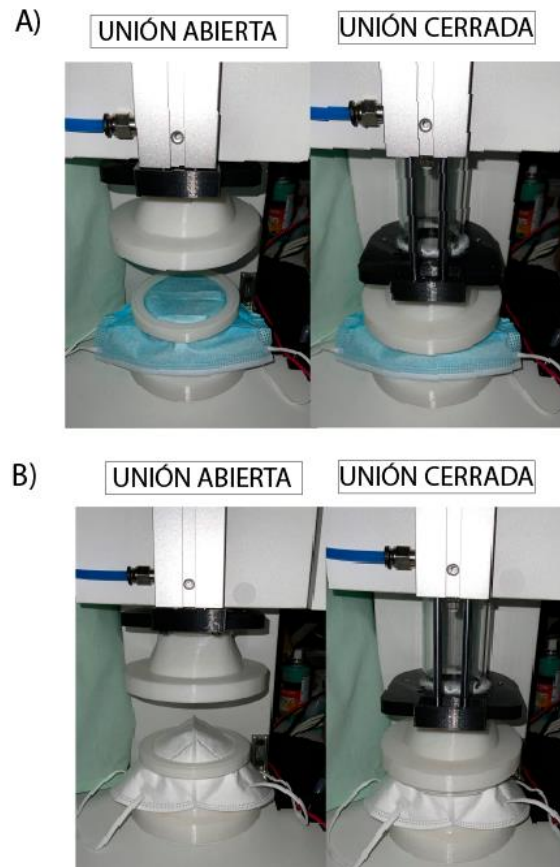


*Nota: Elaborado por Iñaguazo E.*

Las piezas fueron impresas en material PLA y su aplicación se muestra en la figura Figura 43(A) para mascarillas y en la figura Figura 43(B) para respiradores.

Figura 43

*Ensamble de sistema de sellado de muestras*



*Nota:* (A) Unión para mascarillas, (B) Unión para respiradores

Posterior a la fabricación de los acoples en impresión 3D, fue necesario una estructura sobre el mueble base que soporte todo el accionamiento neumático.

#### *Estructura para la funcionalidad de la unión por accionamiento neumático*

La estructura que abarcará todos los acoples y partes para el sistema final se construye en aglomerado de 15mm de espesor, material que fue utilizado en el mueble base, esta estructura fue dividida en dos partes, su diseño se muestra en la Figura 44, la parte uno realiza la función de base la cual va fija al mueble base con unas dimensiones de 150x150x200 (largo x ancho x alto), su sistema de fijación con el

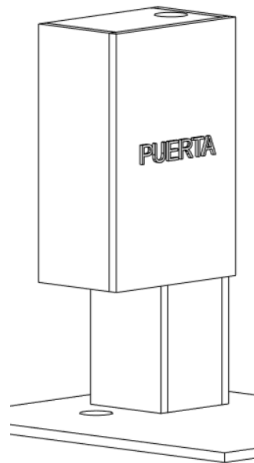


mueble base se realizó con tornillos para madera autoperforantes. Para la parte dos, la superior se necesita un voladizo con respecto a la base, ya que el espacio que no está en contacto con la base se utilizará para el deslizamiento de la tubería junto con el accionamiento neumático, para lo cual se fija unas dimensiones de 265x165x400 (largo x ancho x alto) con una puerta para facilitar el armado y mantenimiento de sus componentes internos, se cuenta con un voladizo 115x165, superficie necesaria para el deslizamiento de la tubería, su ensamble con los componentes se muestra en la

**Figura 45.**

**Figura 44**

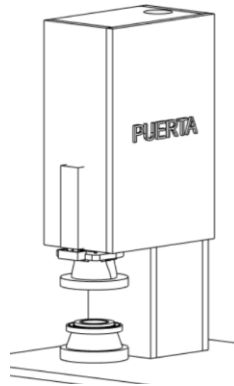
*Diseño de estructura para accionamiento neumático*



*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

**Figura 45**

*Ensamble CAD de estructura para accionamiento neumático*



*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Finalmente, el ensamble físico del aglomerado se realizó con tornillos de madera autoperforantes, y el cilindro neumático se fijó con pernos M3x0.5 como se muestra en la Figura 46.

**Figura 46**

*Ensamble CAD de estructura para accionamiento neumático*



*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Las conexiones neumáticas entre la electroválvula y el cilindro neumático fueron realizadas con manguera de poliuretano sintético de 6mm de diámetro exterior y 4mm de diámetro interior. Adicional las perforaciones en madera fueron realizadas con juego de cortacírculos para taladro.

### **Desarrollo del sistema de transporte y nebulización de partículas de prueba**

En el desarrollo del subsistema de transporte y nebulización se toman en cuenta los requerimientos de la norma y se muestra en la Tabla 17.

**Tabla 17**

*Requerimiento de la norma para el sistema de transporte y nebulización*

<b>Requerimiento de la norma ASTM – F2299</b>	<b>Valor o relación</b>
Velocidad de aire	0.5 a 25 cm/s
Tamaño de partículas de prueba	0.1 a 5.0 $\mu\text{m}$
Aire filtrado con filtro HEPA	99,97% eficiencia

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

### **Cálculos**

De acuerdo al rango de aire necesario se calcula el caudal requerido para la tubería de 2" de diámetro ( $\emptyset$ ) y espesor (e) de 3 mm.

$$Q = V \cdot A$$

$$V_1: 0.5 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$V_2: 25 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$A = \frac{\pi}{4} \emptyset_{\text{interno}}^2$$

$$\emptyset_{\text{interno}} = \emptyset - e$$

$$Q_1 = 0.47 \frac{L}{min}, Q_2 = 23.64 \frac{L}{min}$$

En base a este cálculo se escogerá la fuente de alimentación neumática que garantice permita manejar un caudal mayor al caudal calculado  $Q_2$ .

### Selección de Componentes

Los componentes más influyentes dentro del sistema de esta sección, son la fuente de alimentación para el transporte, el nebulizador para la nebulización de las partículas, las partículas de prueba y el filtro HEPA 99%.

### Fuente de alimentación

En base a la Tabla 17 se procede a la selección y evaluación de conceptos para la fuente de alimentación que se muestran en la Tabla 18 y Tabla 19.

**Tabla 18**

*Selección de Conceptos: Fuente para la Alimentación de Aire del sistema*

<b>Criterios para la Selección</b>	<b>Compresor de Aire</b>	<b>Soplador de Aire</b>
Presión	+	0
Caudal	+	0
Durabilidad	+	+
Facilidad de uso	+	+
Suma +	4	2
Suma 0	0	2
Suma -	0	0
Evaluación Neta	4	2
Lugar 1	1	2
¿Continuar?	Si	No

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Tabla 19

*Evaluación de Conceptos: Fuente para la Alimentación de Aire del sistema*


Criterios para Selección	Peso	Compresor de Aire		Micro bomba de aire	
		Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada
Presión	40%	5	2	2	0.8
Caudal	20%	4	0.8	1	0.2
Durabilidad	30%	5	1.5	5	1.5
Facilidad de uso	10%	5	0.5	5	0.5
Total Puntos			4.8		3.0
Lugar			1		2
¿Continuar?			Desarrollar		No

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Con los resultados obtenidos por la Tabla 18 y Tabla 19 se decidió emplear como puente de alimentación de aire al compresor de aire y sus características se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20

*Fuente para la Alimentación de Aire del sistema*

Denominación	Especificaciones	Ilustración
<b>Compresor de Aire</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuente de alimentación: 120 V AC</li> <li>• Caudal: 110 L/min</li> <li>• Revoluciones: 3450 rpm</li> <li>• Presión: 116PSI</li> </ul>	

*Nota:* Gráfico tomado de Pycca Tienda Online (p.1), por Pycca, 2021, Pycca.

## Nebulización de partículas

Para la nebulización de partículas se utiliza un nebulizador de liberación adaptada de aerosol, se escoge 2 del mercado y se realiza el análisis de conceptos que se muestran en la Tabla 21 y Tabla 22.

**Tabla 21**

*Selección de Conceptos: Nebulizador*

<b>Criterios de Selección</b>	<b>INGO-MFJH103</b>	<b>Nebulizador Scain NB-222C</b>
Disponibilidad inmediata	+	+
Bajo Costo	+	0
Dispone de accesorios y admite cambio de filtro	+	+
Facilidad de uso	+	+
Información técnica	+	0
Suma +	5	3
Suma 0	0	2
Suma -	0	0
Evaluación Neta	5	3
Lugar 1	1	2
¿Continuar?	Si	No

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Tabla 22

Evaluación de Conceptos: Nebulizador


Criterios de Selección	INGO-MFJH103			Nebulizador Scain NB-222C	
	Peso	Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada
Disponibilidad inmediata	20%	5	1.0	5	1.0
Bajo Costo	10%	4	0.4	3	0.3
Dispone de accesorios y admite cambio de filtro	30%	5	1.5	4	1.2
Facilidad de uso	10%	5	0.5	5	0.5
Información técnica	30%	5	1.5	2	0.6
Total Puntos			4.9		3.6
Lugar			1		2
¿Continuar?			Desarrollar		No

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

De acuerdo a los resultados dados en la Tabla 21 y Tabla 22 se decidió trabajar con el nebulizador modelo INGO-MFJH103 y sus características se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23

*Nebulizador del prototipo*


Denominación	Especificaciones	Ilustración
<b>Nebulizador INGO-MFJH103</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuente de alimentación: 110 V AC</li> <li>• Presión de trabajo del compresor &gt; 10PSI, Max &gt; 40PSI</li> <li>• Flujo de aire libre del compresor &gt; 10L-min</li> <li>• Tasa máxima de nebulización: 0,5 - 8 <math>\mu</math>m</li> </ul>	

*Nota:* Gráfico tomado de Mercado Libre Tienda Online (p.1), por MercadoLibre, 2021, MercadoLibre.

Adicional el nebulizador cuenta con accesorios que se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24

*Accesorios para el nebulizador del prototipo*

Denominación	Especificaciones	Ilustración
<b>Accesorios nebulizador INGO-MFJH103</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtros 5 filtros de aire</li> <li>• 2 boquillas</li> <li>• Tubo de aire</li> <li>• Máscara de adulto</li> <li>• Mascarilla pediátrica</li> <li>• Manual</li> </ul>	

*Nota:* Gráfico tomado de Mercado Libre Tienda Online (p.1), por MercadoLibre, 2021, MercadoLibre.

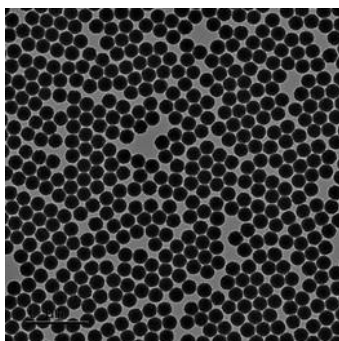


## Partículas de prueba

La norma ASTM – F2299 establece partículas de prueba de 0.1 a 5.0  $\mu\text{m}$ , para lo cual se levantó información y las partículas que se encuentran en este rango de tamaño son las partículas de látex de poliestireno, se pueden encontrar disueltas en frascos de 1mL en adelante y no disueltas en presentaciones desde 0.5 g, laboratorios y farmacéuticas son las encargadas de producir y comercializar este tipo de partículas, en la Figura 47 se muestran los tamaños ofertados por la farmacéutica Merck.

**Figura 47**

*Partículas de látex de poliestireno, farmacéutica Merck*



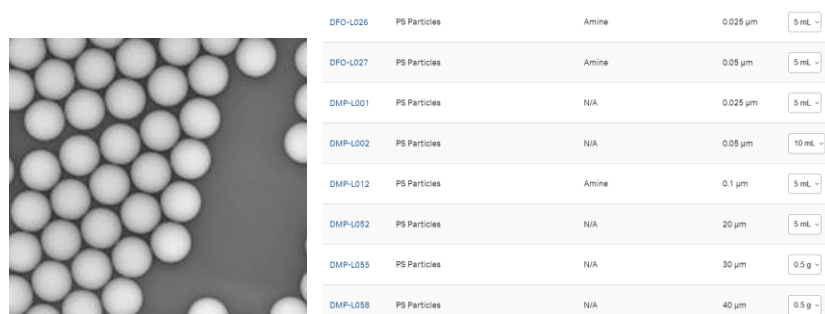
Product Number	Product Description
<a href="#">LB1</a>	Latex beads, polystyrene, 0.1 $\mu\text{m}$ mean particle size
<a href="#">LB3</a>	Latex beads, polystyrene, 0.3 $\mu\text{m}$ mean particle size
<a href="#">LB5</a>	Latex beads, polystyrene, 0.46 $\mu\text{m}$ mean particle size
<a href="#">LB6</a>	Latex beads, polystyrene, 0.6 $\mu\text{m}$ mean particle size
<a href="#">LB8</a>	Latex beads, polystyrene, 0.8 $\mu\text{m}$ mean particle size, without azide
<a href="#">LB11</a>	Latex beads, polystyrene, 1.1 $\mu\text{m}$ mean particle size
<a href="#">LB30</a>	Latex beads, polystyrene, 3.0 $\mu\text{m}$ mean particle size

*Nota:* Tomado de sigmaaldrich (p.1), por Merck KGaA, 2021, Merck KGaA

En la Figura 48 se muestran algunos de los tamaños y presentaciones de partículas de látex de poliestireno que ofrece el laboratorio CD Bioparticles, en su catálogo se menciona que dispone un rango de tamaños de 15 nm hasta los 750  $\mu\text{m}$ .

**Figura 48**

*Partículas de látex de poliestireno, Laboratorio CD Bioparticles*



*Nota:* Tomado de cd-bioparticles (p.1), por CD Bioparticles, 2021, CD Bioparticles

Una contra de las partículas de látex de poliestireno es su precio, rondando entre 75 y 100 dólares americanos en el mercado de Estados Unidos en presentaciones de 10mL, la empresa 5imple realizó la adquisición de 10mL en tamaño promedio de 1.1 µm y de 10mL en tamaño promedio de 3.0 µm, frente a la poca cantidad de partículas para pruebas y experimentos se busca una alternativa para experimentación, para lo cual se elige entre 2 medicamentos que son absorbidos por nebulización y que no sean utilizados para una enfermedad o afección particular, ya que se debe contar con la menor cantidad de efectos secundarios y efectos nocivos para el operador de los experimentos, sus criterios de selección se muestran en la Tabla 25 y Tabla 26.

**Tabla 25**

*Selección de Conceptos: Medicamento de prueba*

<b>Criterios de Selección</b>	<b>Bromuro de Ipratropio</b>	<b>Ventolin</b>
Disponibilidad	+	+
Menor efectos secundarios	+	0
Menor costo	0	+
Facilidad de uso	+	+

<b>Criterios de Selección</b>	<b>Bromuro de Ipratropio</b>	<b>Ventolin</b>
Suma +	3	3
Suma 0	1	1
Suma -	0	0
Evaluación Neta	3	3
Lugar 1	1	1
¿Continuar?	Si	Si

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

**Tabla 26**

*Evaluación de Conceptos: Medicamento de prueba*

<b>Criterios de Selección</b>	<b>Bromuro de Ipratropio</b>			<b>Ventolin</b>	
	<b>Peso</b>	<b>Calificación</b>	<b>Evaluación Ponderada</b>	<b>Calificación</b>	<b>Evaluación Ponderada</b>
Disponibilidad	30%	5	1.5	5	1.5
Menor efectos secundarios	40%	5	2.0	3	1.2
Menor costo	20%	4	0.8	5	1.0
Facilidad de uso	10%	5	0.5	5	0.5
Total Puntos			4.8		4.2
Lugar			1		2
¿Continuar?			Desarrollar		No

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

De acuerdo a los resultados dados por las Tabla 25 y Tabla 26 se decidió que en alternativa para experimentos se trabajará con Bromuro de Ipratropio como las

partículas a detectarse, sus características se muestran en el anexo: prospecto bromuro de ipratropio

### **Filtro HEPA 99.97%**

La norma ASTM – F2299 establece que se debe garantizar un aire limpio para lo cual se requiere un filtro HEPA de alta eficiencia (99.97% de eficiencia en partículas de 3 µm) para hacer el análisis de selección se escogen 2 del mercado y se realiza el análisis de conceptos que se muestran en la Tabla 27 y Tabla 28.

**Tabla 27**

*Selección de conceptos: Filtro HEPA*

<b>Criterios de Selección</b>	<b>Hepa Filtro cleanroomffu</b>	<b>Hepa FILTRO DE H13 - Xiamen</b>
Disponibilidad	0	0
Medidas adaptables al mueble base	0	+
Menor costo	0	+
Facilidad de uso	+	+
Suma +	1	3
Suma 0	3	1
Suma -	0	0
Evaluación Neta	1	3
Lugar 1	2	1
¿Continuar?	No	Si

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Tabla 28

Evaluación de Conceptos: Filtro HEPA


Criterios de Selección	Hepa Filtro cleanroomffu			Hepa FILTRO DE H13 - Xiamen	
	Peso	Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada
Disponibilidad	30%	2	0.6	2	0.6
Medidas adaptables al mueble base	30%	3	0.9	5	1.5
Menor costo	30%	3	0.9	4	1.2
Facilidad de uso	10%	5	0.5	5	0.5
Total Puntos			2.9		3.8
Lugar			2		1
¿Continuar?			No		Desarrollar

Nota: Elaborado por Iñaguazo E.

Con el análisis realizado en la Tabla 27 y Tabla 28 se establece que el filtro a usarse será el filtro H13 - Xiamen y sus características se presentan en la Tabla 29.

Tabla 29

Materiales utilizados en los circuitos neumáticos

Denominación	Especificaciones	Ilustración
Filtro H13- Xiamen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modelo: HD-12</li> <li>Eficiencia: 99.97% y 99.99%</li> <li>Porosidad: 0.3u</li> <li>Certificación: ISO9001</li> </ul>	

Denominación	Especificaciones	Ilustración
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dimensiones: 305x610x70 (largo x ancho x espesor)</li> </ul>	

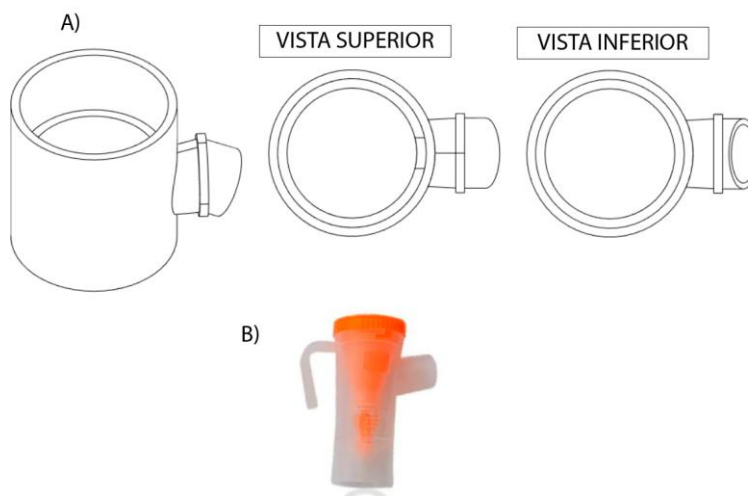
*Nota:* Gráfico Tomado de Alibaba (p.1), por CD Xiamen R&J Filtration Co., Ltd., 2021, Alibaba.

### Acoples para los componentes y ensamble

Para la cámara de nebulización y no alterar nuestra tubería de acrílico, se diseñó un acople como el que se muestra en la Figura 49(A) permite 3 uniones, dos uniones superior e inferior destinadas para que se introduzca a presión el conducto de acrílico de acrílico y en medio una unión que conecta con el recipiente de nebulización Figura 49 (B).

**Figura 49**

*Acople para recipiente portapartículas*



*Nota:* (A) Diseño de acople, (B) recipiente de nebulización (portapartículas)

La pieza fue impresa en material PLA y su aplicación se muestra en la Figura 50.

**Figura 50**

*Ensamble físico del acople para recipiente portapartículas*



*Nota:* La parte blanca que se puede apreciar en las uniones de las piezas es silicona, material con el cual se selló toda posible fuga de aire, foto realizada por Iñaguazo E.

La colocación del filtro se realizó en la parte posterior del mueble base como se ve en la Figura 51.

**Figura 51**

*Ensamble filtros HEPA*



*Nota:* Foto realizada por Iñaguazo E.

## Sistema de fotometría láser

En el desarrollo del subsistema fotometría láser se toman en cuenta los requerimientos de la norma y se muestra en la Tabla 30.

**Tabla 30**

*Requerimiento de la norma para el sistema de fotometría láser*

<b>Requerimiento de la norma ASTM – F2299</b>	<b>Valor o relación</b>
Sondas para extracción de aerosol	Área transversal <10% del $\phi_p$
Distancia entre sonda aguas arriba y aerosol	Mínimo de $8\phi_p$
Distancia entre sonda aguas arriba y elemento de prueba	$2\phi_p$
Distancia entre sonda aguas abajo y elemento de prueba	$3\phi_p$
Tamaño de partículas de prueba	0.1 a 5.0 $\mu\text{m}$

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

## Selección de Componentes

En la sección Partículas de prueba, se mencionó que para la etapa de experimentación y pruebas se contará con 10 mL de partículas de tamaño promedio de 1.1  $\mu\text{m}$  y 10mL en tamaño promedio de 3.0  $\mu\text{m}$ , para lo cual se realiza la elección del sensor que contabilizará las partículas de prueba.

## Sensor fotométrico

En base a la Tabla 30 se procede a la selección y evaluación de conceptos del sensor fotométrico con el que se trabajará, su desarrollo se muestra en la Tabla 31 y Tabla 32.



Tabla 31

Selección de Conceptos: Sensor Fotométrico

Criterios de Selección	Sensor	
	DSM501A	Sensor GP2Y1010AU0F
Disponibilidad	+	+
Costo	+	+
Medición cuantitativa de partículas	+	-
Facilidad de uso	+	+
Sensor con salida digital	+	-
Suma +	5	3
Suma 0	0	0
Suma -	0	2
Evaluación Neta	4	1
Lugar 1	1	2
¿Continuar?	Si	No

Nota: Elaborado por Iñaguazo E.

Tabla 32

Evaluación de Conceptos: Sensor Fotométrico

Criterios de Selección	Peso	Sensor DSM501A		Sensor GP2Y1010AU0F	
		Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada
Disponibilidad	10%	5	0.5	5	0.5
Costo	10%	5	0.5	5	0.5
Medición cuantitativa de partículas	40%	5	2.0	0	0.0
Facilidad de uso	10%	5	0.5	5	0.5
Sensor con salida digital	30%	5	1.5	0	0

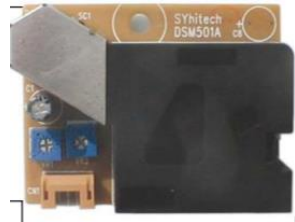
Criterios de Selección	Peso	Sensor DSM501A		Sensor GP2Y1010AU0F	
		Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada
Total Puntos			5.0		1.5
Lugar			1		2
¿Continuar?			Desarrollar		No

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

De acuerdo a los resultados dados por las Tabla 31 y Tabla 32 se decidió que se va a trabajar con el sensor fotométrico DSM501A y sus características se presentan en la Tabla 33.

**Tabla 33**

*Materiales utilizados en los circuitos neumáticos*

Denominación	Especificaciones	Ilustración
<b>Sensor Fotométrico DSM501a</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje alimentación: <math>5 \pm 0.5</math> V</li> <li>• Sensibilidad: <math>&gt; 1 \mu\text{m}</math></li> <li>• Partes: LED, Circuito amplificador, calentador, salidas.</li> <li>• Aplicaciones: aire acondicionado, purificadores y limpiadores de aire, monitoreo calidad del aire, ventilación, etc.</li> </ul>	

*Nota:* Gráfico tomado de Mercado Libre Tienda Online (p.1), por MercadoLibre, 2021, MercadoLibre.

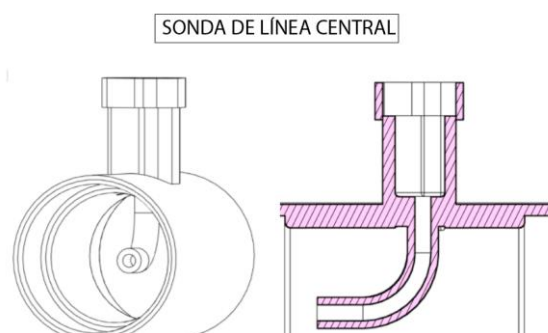
### Acoples para los componentes y ensamble

Para la cámara de lectura fotométrica y con el propósito de no alterar la tubería de acrílico, se establece diseñar un acople que permita 3 uniones, dos uniones superior

e inferior destinadas para que se introduzca a presión el conducto de acrílico y en medio la sonda de extracción de aerosol. Se hace énfasis en la sonda de extracción ya que debe tener un área transversal del 10% del diámetro utilizado y tiene que estar ubicada en la línea central del conducto, para lo cual se realiza el diseño y su análisis de sección se muestra en la Figura 52.

**Figura 52**

*Diseño de la sonda de línea central para el sistema fotométrico*

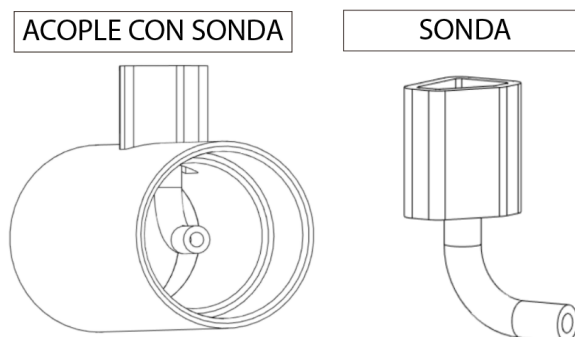


*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

En la Figura 53 se muestra el acople con la respectiva sonda, esta pieza será impresa como un todo y con un relleno del 100% para evitar fugas de aire.

**Figura 53**

*Diseño del acople para recolección de partículas por sonda*

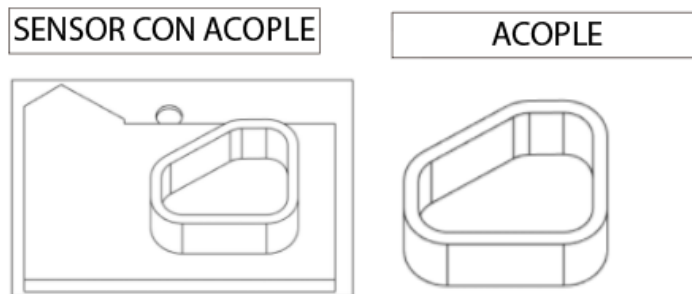


*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Se obtienen las medidas del sensor y se le realiza un acople con el propósito de que pueda ser fijado o unido a la pieza anteriormente descrita, el diseño se muestra en la Figura 54.

**Figura 54**

*Diseño del acople para sensor fotométrico*

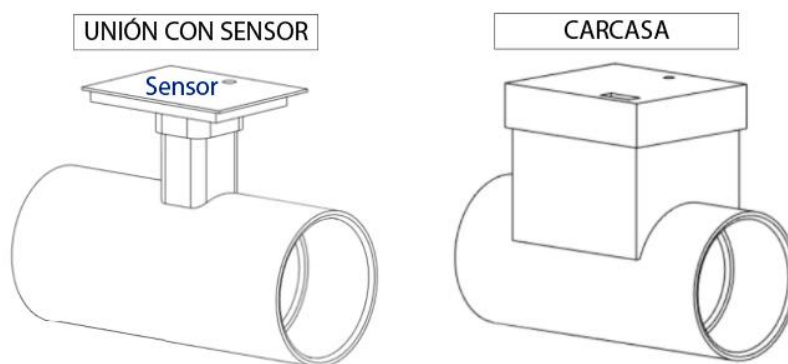


*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Finalmente se une todo el sistema y se coloca una carcasa y tapa, su armado final se muestra en la Figura 55.

**Figura 55**

*Ensamble sistema fotométrico*



*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Todas las piezas descritas fueron impresas en material PLA con un relleno del 100% y su aplicación se muestra en la Figura 56.

**Figura 56***Ensamble sistema fotométrico*

*Nota:* La parte blanca que se puede apreciar en las uniones de las piezas es silicona, material con el cual se selló toda posible fuga de aire, foto realizada por Iñaguazo E.

### **Sistema de monitoreo y control**

En el desarrollo del subsistema de monitoreo y control se toman en cuenta los requerimientos de la norma y se muestra en la Tabla 34.

**Tabla 34**

*Requerimiento de la norma para el sistema de monitoreo y control*

<b>Requerimiento de la norma ASTM – F2299</b>	<b>Valor o relación</b>
Porcentaje humedad relativa	30 a 50%
Monitorear caída presión	-
Temperatura del conducto	21±3°C
Medidores de presión	1 $\phi_p$ arriba y abajo del medio filtrante

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

## Selección de Componentes

Entre los componentes más influyentes dentro del sistema de esta sección tenemos el controlador de temperatura, los sensores para el monitoreo de presión y el controlador del sistema.

### Control y monitoreo de temperatura - cámara

Para realizar el control de temperatura se propuso usar un termostato y un calefactor para calentar la cámara destinada a la temperatura en el mueble base (sección Mueble base), acoplarlos a nuestra fuente de alimentación (sección Fuente de alimentación) y fijar la temperatura de la cámara de temperatura para obtener como resultado una temperatura de salida de la fuente de alimentación de  $21\pm 3^{\circ}\text{C}$ , obtener los datos de construcción y caracterización de los componentes internos del compresor para el cálculo de la temperatura de la entrada de aire resulta inviable, por lo que se realizó un diseño de experimentos junto con un factorial de 2 factores (presión y temperatura) y 2 niveles para caracterizar el comportamiento de nuestro sistema.

En base a la Tabla 34 se procede a la selección y evaluación de conceptos del termostato con el que se trabajará, su desarrollo se muestra en la Tabla 35 y Tabla 36.

**Tabla 35**

*Selección de Conceptos: Termostato*

Criterios de Selección	Termostato	
	Stc1000	Termostato ITC-1000
Disponibilidad	+	0
Costo	+	+
Resolución	+	+
Facilidad de uso	+	+
Precisión	+	+
Suma +	5	4

Criterios de Selección	Termostato	
	Stc1000	Termostato ITC-1000
Suma 0	0	1
Suma -	0	0
Evaluación Neta	5	4
Lugar 1	1	2
¿Continuar?	Si	No

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

**Tabla 36**

*Evaluación de Conceptos: Termostato*


Criterios de Selección	Peso	Termostato Stc1000		Termostato ITC-1000	
		Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada
Disponibilidad	20%	5	1.0	3	0.6
Costo	10%	5	0.5	4	0.4
Resolución	30%	5	1.5	5	1.5
Facilidad de uso	10%	5	0.5	5	0.5
Precisión	30%	5	1.5	5	1.5
Total Puntos			5.0		4.5
Lugar			1		2
¿Continuar?			Desarrollar		No

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

De acuerdo a los resultados dados por las Tabla 35 y Tabla 36 se decidió trabajar con el termostato Stc1000 y sus características se presentan en la Tabla 37.

Tabla 37

*Termostato para el prototipo*

Denominación	Especificaciones	Ilustración
<b>Termostato Stc1000</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje alimentación: 110V AC</li> <li>• Rango de temperatura de control: -50~99°C</li> <li>• Precisión: <math>\pm 1^{\circ}\text{C}</math> (-50°C~99°C)</li> <li>• Resolución: 0.1°C</li> <li>• Capacidad del contacto del relé: 10A/250VAC</li> <li>• Consumo potencia: <math>\leq 3\text{W}</math></li> </ul>	

*Nota:* Gráfico tomado de Mercado Libre Tienda Online (p.1), por MercadoLibre, 2021, MercadoLibre.

En base a la Tabla 34 se procede a la selección y evaluación de conceptos del calefactor con el que se trabajará, su desarrollo se muestra en la Tabla 38 y Tabla 39.

Tabla 38

*Selección de Conceptos: Calefactor*

Criterios de Selección	Mini Calefactor	Portable Heater ULP
Disponibilidad	+	+
Costo	+	+
Bajo consumo	+	0
Facilidad de uso	+	+
Medidas y geometría ajustable al mueble base	+	+
Suma +	5	4
Suma 0	0	1
Suma -	0	0



<b>Criterios de Selección</b>	<b>Mini Calefactor</b>	<b>Portable Heater ULP</b>
Evaluación Neta	5	4
Lugar 1	1	2
¿Continuar?	Si	No

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

**Tabla 39**

*Evaluación de Conceptos: Calefactor*


<b>Criterios de Selección</b>	<b>Peso</b>	<b>Mini Calefactor</b>		<b>Portable Heater ULP</b>	
		<b>Calificación</b>	<b>Evaluación Ponderada</b>	<b>Calificación</b>	<b>Evaluación Ponderada</b>
Disponibilidad	20%	5	1.0	5	1.0
Costo	10%	5	0.5	5	0.5
Bajo consumo	30%	3	0.9	2	0.6
Facilidad de uso	10%	5	0.5	5	0.5
Medidas y geometría ajustable al mueble base	30%	5	1.5	5	1.5
Total Puntos			4.4		4.1
Lugar			1		2
¿Continuar?			Desarrollar		No

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

De acuerdo a los resultados dados por las Tabla 38 y Tabla 39 se decidió que se va a trabajar con el mini calefactor y sus características se presentan en la Tabla 40.

Tabla 40

*Calefactor para el prototipo*

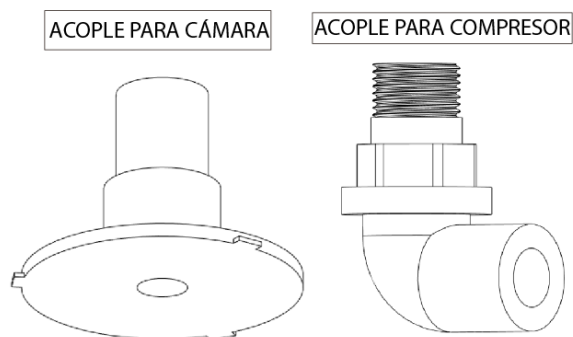
Denominación	Especificaciones	Ilustración
<b>Mini Calefactor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje alimentación: 110V AC</li> <li>• Material de estructura: ABS resistente al fuego + PC</li> <li>• Cobertura de calefacción: 249ft<sup>2</sup></li> <li>• Consumo potencia: 350W</li> <li>• Tamaño del producto: 13,9x11,3x14 cm</li> <li>• Peso: 0,4 Kg</li> </ul>	

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Para unir y poner en marcha el control de temperatura se diseñaron los acoples que se muestran en la Figura 57, el acople para la cámara de temperatura pasa a través de una pared de la mueble base, dejando un lado para colocar el filtro del compresor y en el otro lado colocar la manguera de succión, en el acople para compresor un lado ingresa en la tuerca 3/8" del compresor y el otro lado permite colocar la manguera de succión, de esta forma se conectan la cámara de temperatura con la fuente de alimentación.

**Figura 57**

*Diseño de acoples para cámara de temperatura*

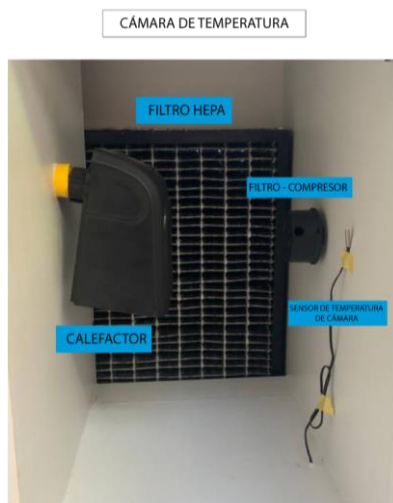


*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Las piezas fueron impresas en PLA y posteriormente los componentes se instalaron como se muestran en la Figura 58.

**Figura 58**

*Instalación de componentes en cámara de temperatura*



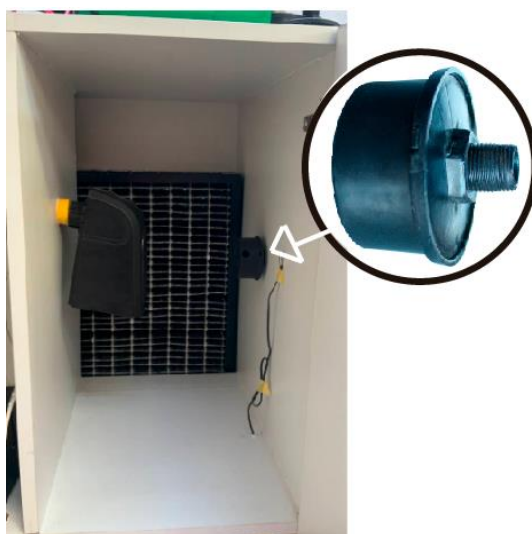
*Nota:* Foto por Iñaguazo E.

El calefactor se empotró a la pared de la cámara con su alimentación eléctrica conectada al termostato, el filtro HEPA anclado al mueble base, el filtro del compresor y el sensor del termostato.

En la Figura 59 se muestra la instalación del filtro de succión del compresor mediante el acople para cámara.

**Figura 59**

*Instalación Filtro de succión con acople en cámara de temperatura – Mueble base*



*Nota:* Foto por Iñaguazo E.

En la Figura 60 se muestra la instalación de la manguera de succión al acople de cámara, la unión se sella con silicona para eliminar fugas de aire.

**Figura 60**

*Instalación del conducto de succión en cámara de temperatura*



*Nota:* Foto por Iñaguazo E.

En la Figura 61 se muestra la instalación de la manguera de succión al acople del compresor.

**Figura 61**

*Acople para unión: conducto - compresor*



*Nota:* Foto por Iñaguazo E.

Una vez instalado todo el sistema se realiza un diseño de experimentos junto con un análisis factorial de 2 factores (presión y temperatura) y 2 niveles para

caracterizar el comportamiento del sistema y conocer la temperatura a la que configurarse la cámara para tener una temperatura de salida del compresor de  $21 \pm 3^\circ\text{C}$ .

La tabla de experimentos con 3 réplicas se muestra en la Tabla 41.

**Tabla 41**

*Tabla para el DOE factorial de 2 factores, 2 niveles y 3 réplicas*

Orden	Temperatura	Presión (PSI)	Temperatura salida ( $^\circ\text{C}$ )
Réplica: 1			
1	25	4	16
2	40	4	33
3	25	14	13
4	40	14	27
Réplica: 2			
5	25	4	20
6	40	4	32
7	25	14	13
8	40	14	28
Réplica: 3			
9	25	4	18
10	40	4	31
11	25	14	18
12	40	14	26

*Nota:* El experimento se realizó de manera aleatoria, para la presentación de resultados se ha ordenado los factores y niveles.

La ejecución del análisis otorga los resultados de varianza presente en la Tabla 42.

Tabla 42

Análisis de varianza – DOE 2 factores, 2 niveles y 3 réplicas

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>Modelo</b>	3	574,250	191,417	53,42	0,000
<b>Lineal</b>	2	572,167	286,083	79,84	0,000
<b>TEMPERATURA</b>	1	520,083	520,083	145,14	0,000
<b>PRESIÓN</b>	1	52,083	52,083	14,53	0,005
<b>Interacciones de 2 términos</b>	1	2,083	2,083	0,58	0,468
<b>TEMPERATURA*PRESIÓN</b>	1	2,083	2,083	0,58	0,468
<b>Error</b>	8	28,667	3,583		
<b>Total</b>	11	602,917			

Nota: Realizado por Iñaguazo E.

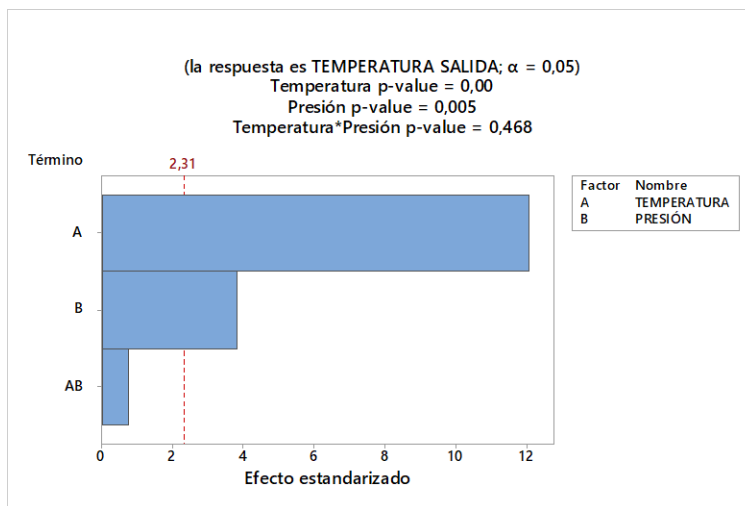
Se compara el P-value de cada factor y su interacción con el valor de Alpha (0.05), obteniendo como resultado que:

- La temperatura es un factor significativo para la obtención de la temperatura de salida del compresor
- La presión es un factor significativo para la obtención de la temperatura de salida del compresor
- La interacción entre presión y temperatura no es un factor significativo para la obtención de la temperatura de salida del compresor

En la gráfica de Pareto presente en la Figura 62 podemos corroborar este análisis, y acotar que el factor temperatura es el factor más significativo de esta prueba

**Figura 62**

Gráfica Pareto de los efectos para la temperatura de salida

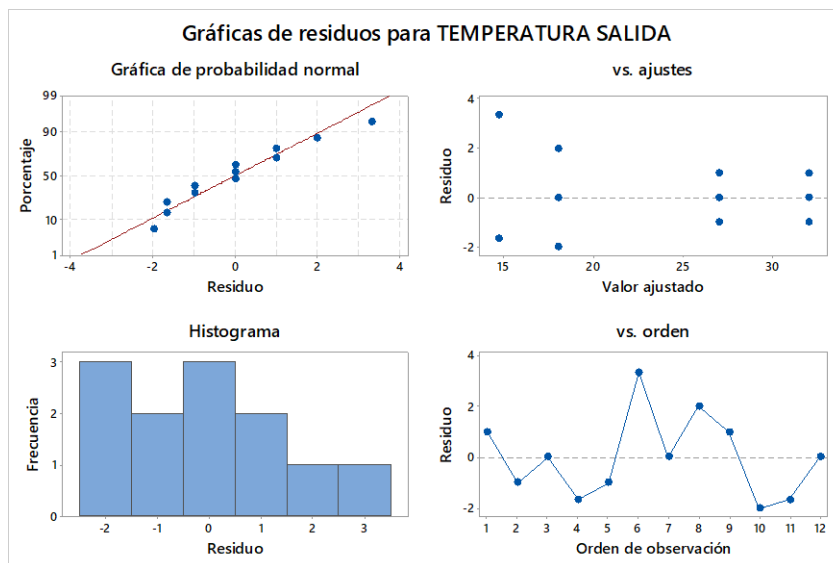


*Nota:* En la gráfica se indica los valores de p-value de los factores del experimento.

La Figura 63 corresponde a la gráfica de residuos de los que se concluye que los datos siguen una distribución normal e independencia entre ellos

**Figura 63**

Gráfica de residuos para la temperatura de salida



*Nota:* Los gráficos muestran el resultado para una cantidad de 12 datos.



Con todos estos resultados se realiza una optimización de respuesta con intervalo de confianza del 95%, para obtener el valor de temperatura de la cámara, tomando en cuenta que la presión del sistema oscilará entre 4 y 7 PSI, estos parámetros se muestran en la Tabla 43

**Tabla 43**

*Parámetros para optimización de la respuesta: Temperatura Salida*

<b>Respuesta</b>	<b>Meta</b>	<b>Inferior (°C)</b>	<b>Objetivo (°C)</b>	<b>Superior (°C)</b>
TEMPERATURA SALIDA	Objetivo	18	21	24

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

La predicción indica que se debe colocar una temperatura de 28.21°C en la cámara, los resultados se muestran en la Tabla 44.

**Tabla 44**

*Predicción de respuesta múltiple*

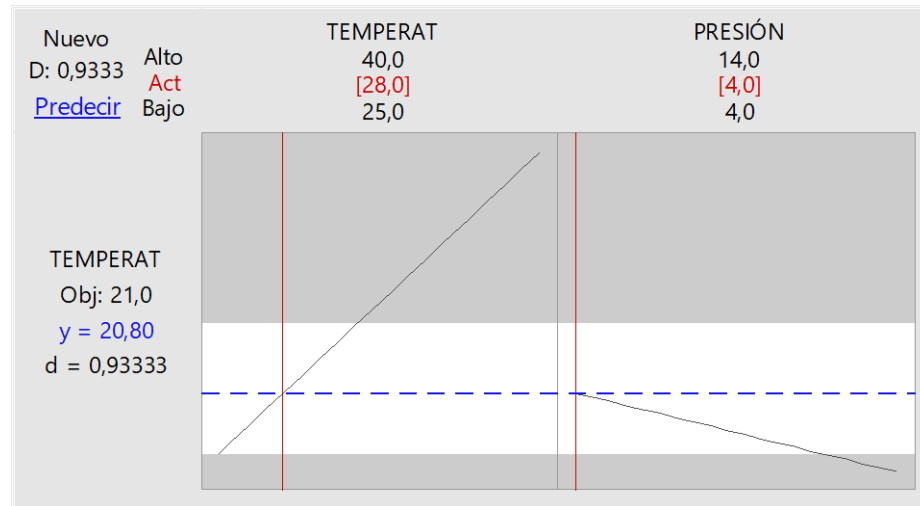
<b>Variable</b>	<b>Valor de configuración</b>	<b>Respuesta</b>	<b>Ajuste</b>	<b>EE de ajuste</b>	<b>IC de 95%</b>	<b>IP de 95%</b>
<b>Temperatura (°C)</b>	28,2143	Temperatura salida	21	0,890	(18,94	(16,17
<b>Presión (psi)</b>	4				23,05)	25,82)

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

La temperatura de configuración se redondea a la entera más próxima, en este caso 28°C y su resultado de predicción se muestra en la Figura 64.

**Figura 64**

Gráfica de optimización para una Presión de 4 PSI

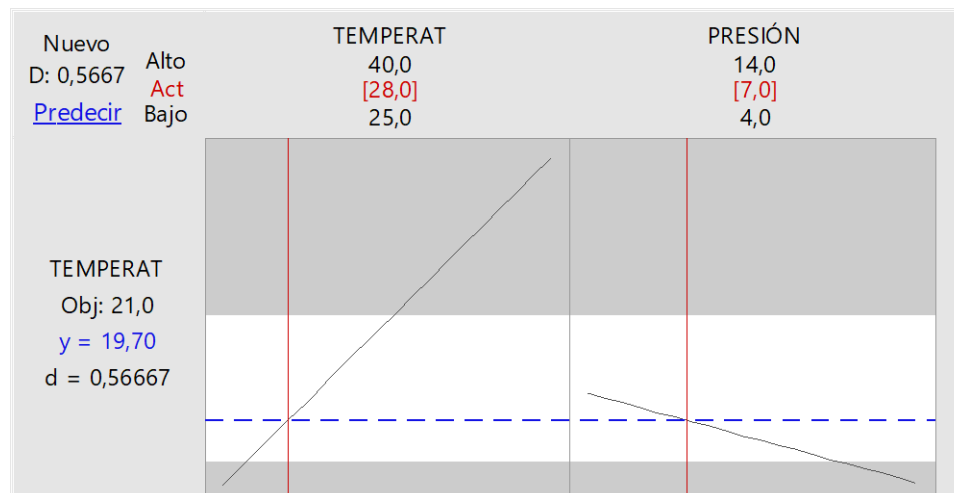


Nota: La gráfica muestra los resultados para una Presión de 4 PSI y una temperatura de 28°C.

Se observa en la Figura 65 que para el valor de 7 PSI el resultado es de 19.70 que aún se encuentra en el margen de la temperatura de trabajo establecida por la norma ASTM – F2299.

**Figura 65**

Gráfica de optimización para una Presión de 4 PSI




Nota: La gráfica muestra los resultados para una Presión de 7 PSI y una temperatura de 28°C.

## Monitoreo de temperatura y humedad – conducto de prueba

Para monitorear la temperatura y humedad dentro del conducto de prueba se utilizará el sensor DHT11 por su tamaño compacto y porque otorga la medida de las 2 variables sin accesorios o módulos extras. Sus características se muestran en la Tabla 45.

**Tabla 45**

*Sensor de humedad y temperatura para el prototipo*

Denominación	Especificaciones	Ilustración
<b>Modulo</b> <b>Sensor De</b> <b>Temperatura</b> <b>Y Humedad</b> <b>Dht11 Arduino</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tamaño reducido.</li> <li>• Voltaje de alimentación: 3V-5.5V</li> <li>• Rango Humedad relativa: 20-90%</li> <li>• Rango temperatura: 0-50°C.</li> <li>• Resolución de humedad: 1RH</li> <li>• Resolución de temperatura: 1°C</li> </ul>	

*Nota:* Gráfico tomado de Mercado Libre Tienda Online (p.1), por MercadoLibre, 2021, MercadoLibre.

La instalación del sensor se la realiza al final del conducto de prueba por lo que no necesita ningún acople para su fijación.

## Monitoreo de presión

La norma ASTM – F2299 establece que se debe colocar medidores de presión a una distancia de un diámetro arriba y abajo del medio filtrante, sin alterar el flujo de aire, usando medidores que estén al ras del conducto. Este requerimiento por la limitación de componentes se abordó con una modificación de acuerdo a la distancia que se

encuentra del medio filtrante con el propósito de no alterar el conducto principal de prueba y mantener anteriores subsistemas sin modificaciones. Basado en esto se realiza la selección del sensor de presión.

**Tabla 46**

*Selección de Conceptos: Sensor de Presión*

<b>Criterios de Selección</b>	<b>Transductor de presión 1MPa</b>	<b>MPX5010</b>
Instalación en línea	+	-
Máxima presión: 145 PSI	+	0
Costo	-	+
Facilidad de uso	+	0
Sin uso de acondicionador	+	0
Suma +	4	1
Suma 0	0	3
Suma -	1	1
Evaluación Neta	3	0
Lugar 1	1	2
¿Continuar?	Si	No

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

**Tabla 47**

*Evaluación de Conceptos: Sensor de presión*

<b>Criterios de Selección</b>	<b>Transductor de presión 1MPa</b>			<b>MPX5010</b>	
	<b>Peso</b>	<b>Calificación</b>	<b>Evaluación Ponderada</b>	<b>Calificación</b>	<b>Evaluación Ponderada</b>
Instalación en línea	30%	5	1.5	1	0.3
Máxima presión: 145 PSI	30%	5	1.5	1	0.3


Criterios de Selección	Transductor de presión 1MPa			MPX5010	
	Peso	Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada
Costo	20%	2	0.4	5	1.0
Sin uso de acondicionador	10%	5	0.5	3	0.3
Precisión	10%	5	0.5	5	0.5
Total Puntos			4.4		2.4
Lugar			1		2
¿Continuar?			Desarrollar		No

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

De acuerdo a los resultados dados por las Tabla 46 y Tabla 47 se decidió que se va a trabajar con un transductor de presión 1MPa y sus características se presentan en la Tabla 48.

**Tabla 48**

*Sensor de presión para el prototipo*

Denominación	Especificaciones	Ilustración
<b>Transductor de presión 1MPa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje de alimentación: 5.0 VDC</li> <li>• Voltaje de salida – señal analógica: 0.5 - 4.5 VDC</li> <li>• Corriente de funcionamiento: <math>\leq 10</math> mA</li> <li>• Rango de presión de trabajo: 0 - 1 MPa (0-145psi)</li> <li>• Presión máx: 1.5 MPa</li> <li>• Presión de ruptura del sensor: 3.5 MPa</li> </ul>	

Denominación	Especificaciones	Ilustración
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo de respuesta de lectura: <math>\leq 2.0</math> ms</li> <li>• Fluido con los que trabaja: Agua, aceite, aire comprimido o gas</li> <li>• Rosca de conexión: Macho <math>\frac{1}{4}</math> BSP</li> </ul>	

*Nota:* Gráfico tomado de Mercado Libre Tienda Online (p.1), por MercadoLibre, 2021, MercadoLibre.


La ventaja del sensor es que con un acople en T se puede colocar en línea con la fuente de alimentación y conocer la presión del sistema a través de una lectura analógica por parte del microcontrolador.

### Controlador del sistema

Para controlar todo el sistema se utiliza una placa Arduino MEGA 2560, esta placa basada en un microcontrolador ATmega2560 junto a su software de código abierto serán los encargados de leer los sensores y controlar los actuadores. Las características del Arduino MEGA 2560 se muestran en la Tabla 49.

**Tabla 49**

*Controlador del prototipo*

Denominación	Especificaciones	Ilustración
<b>Arduino MEGA 2560</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microcontrolador basado en ATmega2560</li> <li>• Voltaje de operación recomendado: 7-12V</li> </ul>	

Denominación	Especificaciones	Ilustración
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 54 pines de Entrada/salida digital, 15 de los cuales son PWM.</li> <li>• 16 pines de entrada analógica</li> </ul>	

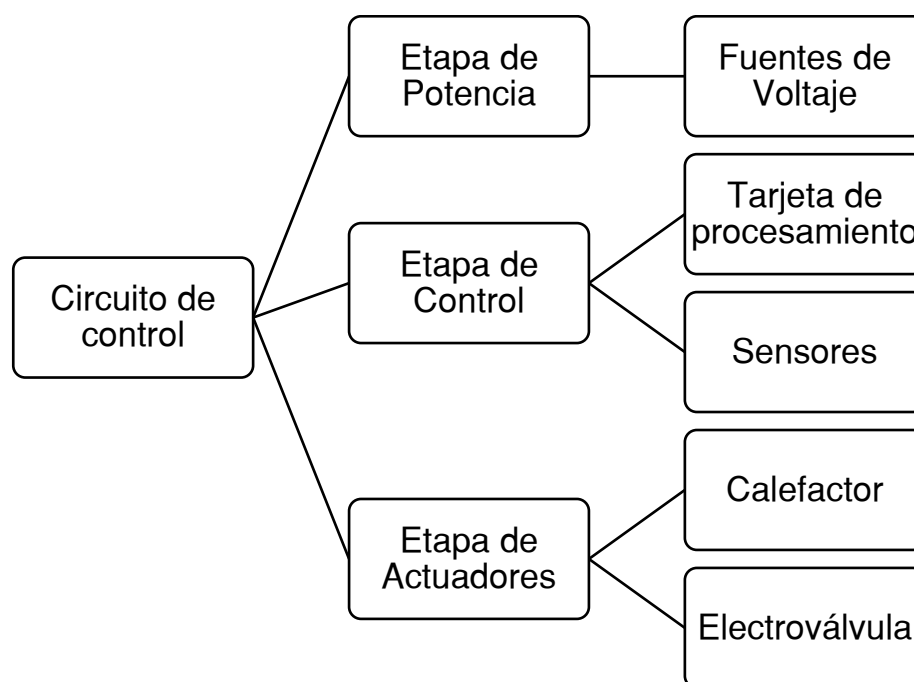
*Nota:* Gráfico tomado de Mercado Libre Tienda Online (p.1), por MercadoLibre, 2021, MercadoLibre.

### **Ensamble del hardware electrónico**

El diseño del circuito electrónico de control consta de las etapas que se muestra en la Figura 66, la etapa de potencia abarca a fuente de alimentación de los diferentes componentes eléctricos, la etapa de control abarca los componentes que permiten la adquisición y procesamiento de datos, y la etapa de actuadores abarca los componentes eléctricos encargados de responder y actuar frente al procesamiento de datos.

Figura 66

Esquema del ensamble del hardware electrónico




Nota: Elaborado por Iñaguazo E.



Adicional a los componentes descritos anteriormente, serán utilizados 3 módulos relé: 2 de estado sólido para manejar cargas de corriente alterna y un módulo relé para controlar la electroválvula de la etapa del sellado de la muestra, también se necesita un regulador de voltaje para la alimentación de las cargas AC, sus características se presentan en la Tabla 50.

Tabla 50

Módulos relé para el prototipo

Denominación	Especificaciones	Ilustración
<b>Módulo Relé 2 canales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Voltaje de alimentación: 5V DC</li> <li>Señal de control del relé: TTL (3.3V o 5V)</li> <li>2 Relés incorporados</li> </ul>	



Denominación	Especificaciones	Ilustración
<b>Módulo de relé de estado sólido 2 canales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad máx: 10A/250VAC, 10A/30VDC</li> <li>• Corriente máx: 10A (NO), 5A (NC)</li> <li>• Tiempo de acción: 10ms/5 ms</li> <li>• Para activar salida NO: 0 Voltios</li> <li>• Entradas Optoacopladas</li> <li>• Indicadores LED de activación</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relé (Relay) de 2 canales de estado sólido.</li> <li>• Marca: OMRON.</li> <li>• Referencia: G3MB-202P.</li> <li>• Reles limites 240Vac 2Amp</li> <li>• Energía de entrada: 5V DC</li> <li>• Entrada de voltaje de la señal de control: 0-1.5V estado ON / 2.5-5V estado OFF.</li> </ul>	
<b>Regulador De Voltaje Forza 1000va 500w 4 Tomas 110v</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corriente de trabajo: 12.5mA.</li> <li>• Capacidad: 1000VA/500W</li> <li>• - Tipo de entrada: NEMA 5-15P</li> <li>• - Tipos de salida: 4 x NEMA 5-15R</li> <li>• Sistema de enfriamiento para disipar el exceso de Calor</li> </ul>	


*Nota:* Gráficos tomados de Mercado Libre Tienda Online (p.1), por MercadoLibre, 2021, MercadoLibre.

### **Etapas de Potencia**

Después de seleccionar todos los componentes eléctricos, y sus voltajes necesarios se opta por trabajar con la fuente descrita en la Tabla 51.

Tabla 51

Fuentes de alimentación eléctrica utilizadas en el proyecto

Denominación	Especificaciones	Ilustración
ATX-750	<ul style="list-style-type: none"> <li>Voltaje de Entrada: 110/220 VAC</li> <li>Voltaje de Salida: 3.3V, 5V, 12 VDC</li> <li>Corriente Máxima de funcionamiento: 30A</li> </ul>	

Nota: Gráfico tomado de Mercado Libre Tienda Online (p.1), por MercadoLibre, 2021, MercadoLibre.

### Resumen de conexiones

En esta sección mediante la Tabla 53 se resume la conexión de todos los componentes, en la Tabla 52 se muestran las fuentes de alimentación que se utilizó en el prototipo.

Tabla 52

Fuentes de alimentación del prototipo

FUENTE	COLOR	Voltaje suministrado
AC	Negro	110V
	Blanco	0V
DC	Rojo	5V
	Amarillo	12V
	Negro	GND

Nota: Elaborado por Iñaguazo E.

Tabla 53

Componentes eléctricos del prototipo

COMPONENTE	TERMINAL / CABLE - COLOR	CONEXIÓN A:
SENSOR FOTOMÉTRICO	GND	GND – DC
	VCC	5V – DC
AGUAS ARRIBA	PM1.0	PIN 11 PWM ARDUINO
SENSOR FOTOMÉTRICO	GND	GND – DC
	VCC	5V – DC
AGUAS ARRIBA	PM1.0	PIN 12 PWM ARDUINO
	VCC	5V – DC
SENSOR DHT11	GND	GND – DC
	DATA	PIN 13 PWM ARDUINO
SENSOR DE PRESIÓN AGUAS ARRIBA	VCC	5V – DC
	GND	GND – DC
	SIGNAL	PIN A0 - ARDUINO
SENSOR DE PRESIÓN AGUAS ABAJO	VCC	5V – DC
	GND	GND – DC
	SIGNAL	PIN A1 - ARDUINO
	DC+	5V – DC
	DC-	GND - DC
MÓDULO RELÉ ESTADO SÓLIDO 2 CANALES	CH1	PIN DIGITAL 8 ARDUINO
	C <sub>1</sub>	110V - AC
	NO <sub>1</sub>	L1 – NEBULIZADOR
	CH2	PIN DIGITAL 9 ARDUINO
	C <sub>2</sub>	110V - AC
	NO <sub>2</sub>	L1 – TERMOSTATO
NEBULIZADOR	L1	NO <sub>1</sub> – MÓDULO RELÉ
	N	0V - AC
	L1	NO <sub>2</sub> – MÓDULO RELÉ
TERMOSTATO	N	0V - AC
	NO	110 V – AC
	COM	L1 – CALEFACTOR

COMPONENTE	TERMINAL / CABLE - COLOR	CONEXIÓN A:
CALEFACTOR	L1	COM – TERMOSTATO
	N	0V - AC
	VCC	5V – DC
MÓDULO RELÉ 2 CANALES	GND	GND -DC
	IN1	PIN DIGITAL 10 ARDUINO
	COM1	VCC – ELECTROVÁLVULA
ELECTROVÁLVULA 5/2	NO1	12V - DC
	VCC	COM 1 – MÓDULO RELÉ
	GND	GND – DC
	GND	GND - DC
ARDUINO MEGA 2560	PIN DIGITAL 8 ARDUINO	CH1- RELÉ ESTADO SÓLIDO
	PIN DIGITAL 9 ARDUINO	CH2- RELÉ ESTADO SÓLIDO
	PIN DIGITAL 10 ARDUINO	IN1 - MÓDULO RELÉ
	PIN 11 PWM ARDUINO	PM1.0 – SENSOR AGUAS ARRIBA
MÓDULO MEGA TFT	PIN 12 PWM ARDUINO	PM1.0 – SENSOR AGUAS ABAJO
	PIN 13 PWM ARDUINO	DATA – DHT11
	Vin	JACK alimentación 7V / 2A
	GND	JACK alimentación 7V / 2A
	CONEXIÓN A MÓDULO MEGA TFT	
	CONEXIÓN A PANTALLA TFT TOUCH 3.2”	

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

## Sistema de presentación de resultados

En la presentación de resultados se requiere una pantalla que tenga compatibilidad con Arduino Mega 2560, adicional la pantalla tiene que ser táctil para no usar botones externos a la pantalla, y de esta manera la interfaz gráfica permita controlar el sistema. Con estos requerimientos se procede a la selección y evaluación de conceptos de la pantalla con la que se trabajará, su desarrollo se muestra en la Tabla 54 y Tabla 55.

**Tabla 54**

*Selección de Conceptos: Pantalla para presentación de resultados*

<b>Criterios de Selección</b>	<b>Tft 3.2 pulgadas</b>	<b>Nextion Enhanced</b>
Disponibilidad	+	+
Costo	+	-
Resolución	0	+
Facilidad de uso	+	+
Tamaño	+	+
Suma +	4	4
Suma 0	1	1
Suma -	0	0
Evaluación Neta	4	3
Lugar 1	1	2
¿Continuar?	Si	No

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Tabla 55

*Evaluación de Conceptos: Pantalla para presentación de resultados*


Criterios de Selección	Peso	Tft 3.2 pulgadas		Nextion Enhanced	
		Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada
Disponibilidad	20%	5	1.0	5	1.0
Costo	30%	4	1.2	1	0.3
Resolución	20%	3	0.6	5	1.0
Facilidad de uso	20%	4	0.8	5	1.0
Tamaño	10%	4	0.4	5	0.5
Total Puntos			4.0		3.8
Lugar			1		2
¿Continuar?			Desarrollar		No

*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

De acuerdo a los resultados dados por la Tabla 54 y Tabla 55 se decidió que se va a trabajar con la pantalla Tft 3.2 pulgadas y sus características se presentan en la Tabla 56.

Tabla 56

Materiales utilizados en los circuitos neumáticos

Denominación	Especificaciones	Ilustración
<b>Pantalla Tft Tactil Touch 3.2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tamaño: 320 x 240 pixeles, 3.2".</li> <li>Colores: 65000</li> <li>Amplio ángulo de visión</li> <li>Controlador del LCD: ILI9341</li> <li>Dispone de conector para tarjetas de memoria SD.</li> </ul>	


Denominación	Especificaciones	Ilustración
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje de alimentación (Pin VCC): 5 V.</li> <li>• Tamaño total: 94 x 65 x 16 mm</li> </ul>	

*Nota:* Gráfico tomado de Mercado Libre Tienda Online (p.1), por MercadoLibre, 2021, MercadoLibre.

Para conectar la pantalla es necesario un módulo que se conecta al Arduino Mega, sus características se muestran en la Tabla 57.

**Tabla 57**

*Módulo para pantalla Tft utilizado en el prototipo*

Denominación	Especificaciones	Ilustración
<b>Módulo Mega para pantalla Tft Tactil Touch 3.2</b>	Proporciona el voltaje y las conexiones necesarias para que funcione la pantalla Tft 3.2	

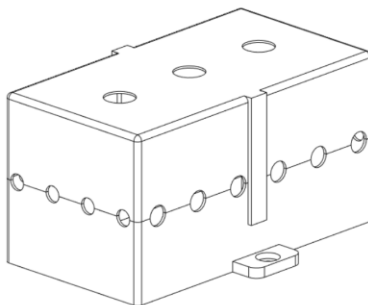
*Nota:* Gráfico tomado de Mercado Libre Tienda Online (p.1), por MercadoLibre, 2021, MercadoLibre.

### Acoples para los componentes y ensamble

Se diseñó una estructura que albergue la placa de las conexiones eléctricas, su estructura se muestra en la Figura 67, la estructura consta de 2 partes, una parte inferior que se fija al mueble base, y la parte superior que sirve como tapa para proteger la placa. Su fabricación fue realizada por impresión 3D en material PLA.

**Figura 67**

*Diseño de estructura para placa eléctrica del prototipo*

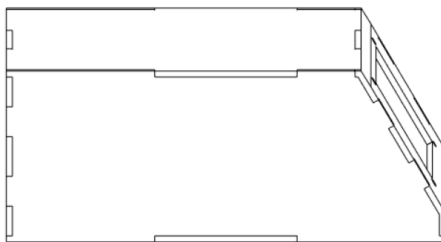


*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Posterior se diseñó una estructura que albergue la placa Arduino, y la pantalla Tft para la presentación de resultados, se situará sobre el mueble base en una parte visible para que el operador pueda realizar la prueba, el diseño se muestra en la Figura 68, su fabricación fue realizada por impresión 3D en material PLA.

**Figura 68**

*Diseño de estructura para presentación de resultados del prototipo.*



*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

### **Prototipo final**

En esta etapa se realiza la integración de todos los componentes, para esto fue necesario acoples neumáticos para alimentar el sistema de sellado de muestra y para la fuente de alimentación de aire del conducto principal de prueba, adicional cableado eléctrico para las conexiones AC y DC, finalmente todo se conectó al regular de voltaje,



el prototipo final y sus partes se muestran a detalle en la Figura 69, Figura 70, Figura 71, Figura 72, Figura 73 y Figura 74.

### Figura 69

*Prototipo final: Vista frontal I*



*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Figura 70

Prototipo final: Vista lateral I



Nota: Elaborado por Iñaguazo E.

Figura 71

Prototipo final: Vista posterior



Nota: Elaborado por Iñaguazo E.

Figura 72

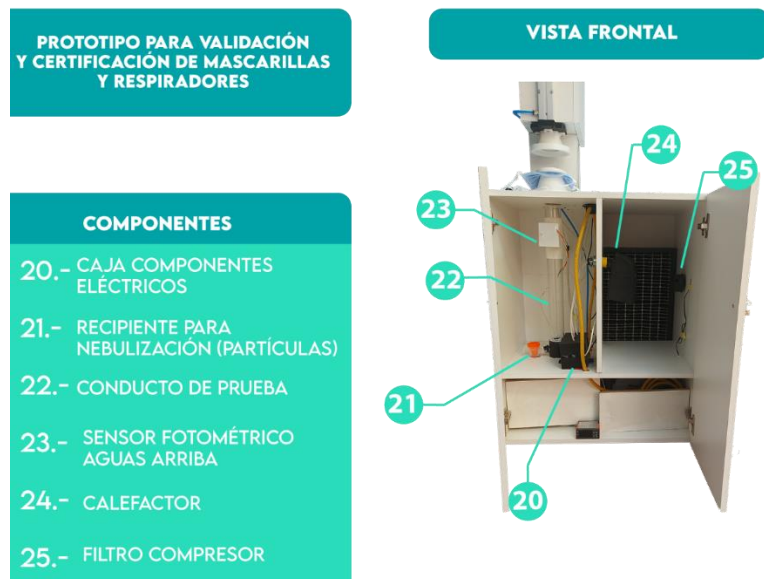
Prototipo final: Vista lateral I



Nota: Elaborado por Iñaguazo E.

Figura 73

Prototipo final: Vista frontal I



Nota: Elaborado por Iñaguazo E.

Figura 74

Prototipo final: Vista lateral II

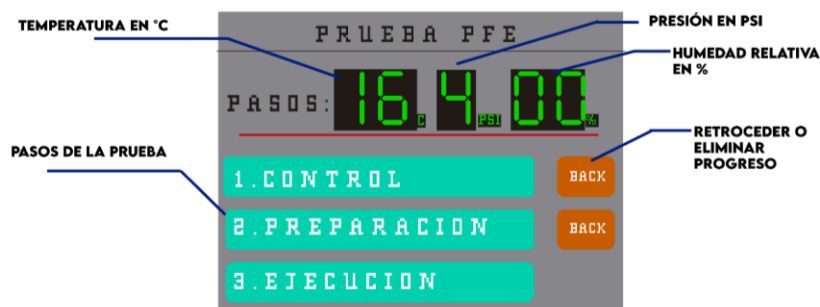


Nota: Elaborado por Iñaguazo E.

A continuación, se detalla el funcionamiento de la pantalla de control. En la Figura 75 se muestra el menú principal de la interfaz, en el cual se debe seguir el proceso secuencial con los botones: 1, 2 y 3, adicional se muestra la temperatura, presión y humedad del conducto de prueba, la pantalla dispone de 2 botones que nos permiten retroceder o eliminar el progreso de la etapa en la que se encuentre.

Figura 75

Pantalla de prototipo: Menú principal

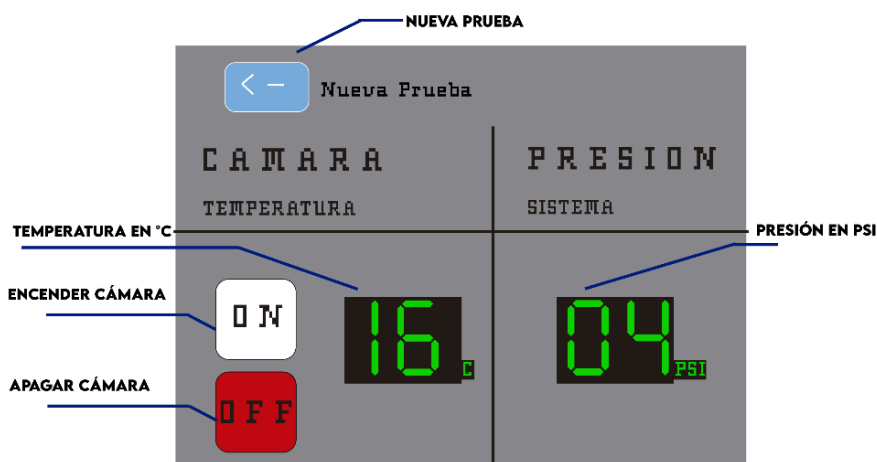


*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Para comenzar la prueba nos dirigimos a la parte 1. CONTROL y accedemos, en donde se nos despliega una pantalla como se muestra en la Figura 76 que nos indica la temperatura y presión del sistema, así también consta de dos botones para encender o apagar la cámara de temperatura, para iniciar la prueba es necesario encender la cámara.

**Figura 76**

*Pantalla de prototipo: Paso 1 - Control*



*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Una vez que la cámara haya alcanzado la temperatura necesaria para la prueba, nos dirigirá nuevamente al menú principal y visualizaremos que el paso uno ahora ha cambiado a "1. CONTROL -> LISTO" con un color verde claro como se muestra en la Figura 77.

**Figura 77**

Pantalla de prototipo: Paso 1 finiquitado - Control listo

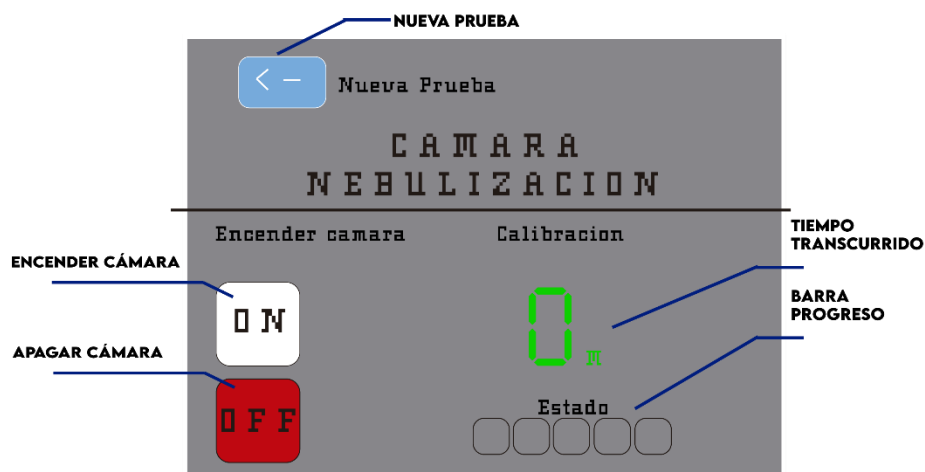


*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Posteriormente nos dirigimos a la parte 2. PREPARACIÓN y accedemos, en donde se despliega una pantalla que se muestra en la Figura 78, que tiene una barra de progreso o estado, un indicador del tiempo en minutos del proceso, y dos botones para encender o apagar la cámara de nebulización, para continuar la prueba es necesario encender la cámara.

**Figura 78**

*Pantalla de prototipo: Paso 2 - Preparación*

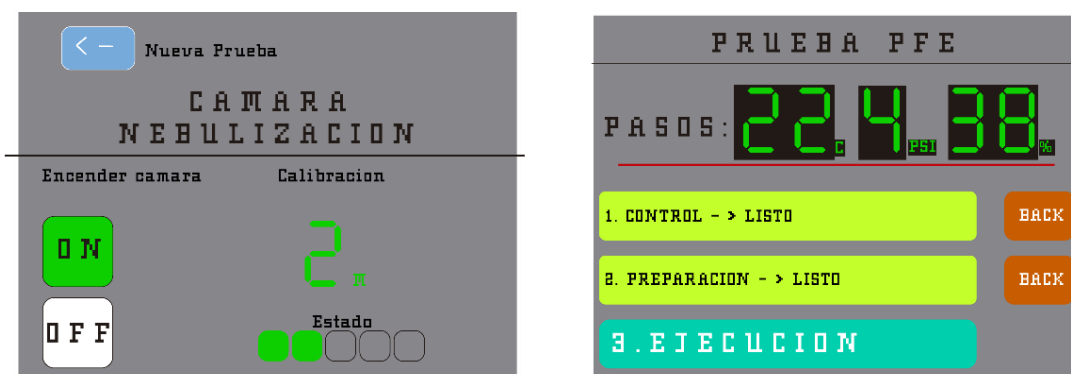


*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

En esta etapa no hay un tiempo fijo, ya que el sistema se encuentra calibrando y calculando la cantidad de intervalos de muestreo de la siguiente etapa, por lo que la barra de progreso será un indicador solamente. Generalmente esta etapa tiene una duración de 3 a 5 minutos. Una vez que la cámara haya calibrado, nos dirigirá nuevamente al menú principal y visualizaremos que el paso 2 ahora ha cambiado a “2. PREPARACIÓN -> LISTO” con un color verde claro como se muestra en la Figura 79.

**Figura 79**

*Pantalla de prototipo: Paso 2 finiquitado – Preparación listo*



*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

Una vez culminada esta etapa es necesario ubicar la mascarilla o respirador sobre el portamuestras su proceso se muestra en la Figura 80.

**Figura 80**

*Colocación de mascarilla en portamuestras*



*Nota:* La imagen muestra la colocación de la mascarilla y su ajuste con la pieza de fijación.

Al finalizar la colocación tenemos como resultado la mascarilla dispuesta como se muestra en Figura 81.

**Figura 81**

*Mascarilla fijada al portamuestras*



*Nota:* La imagen muestra el resultado de la fijación de la mascarilla

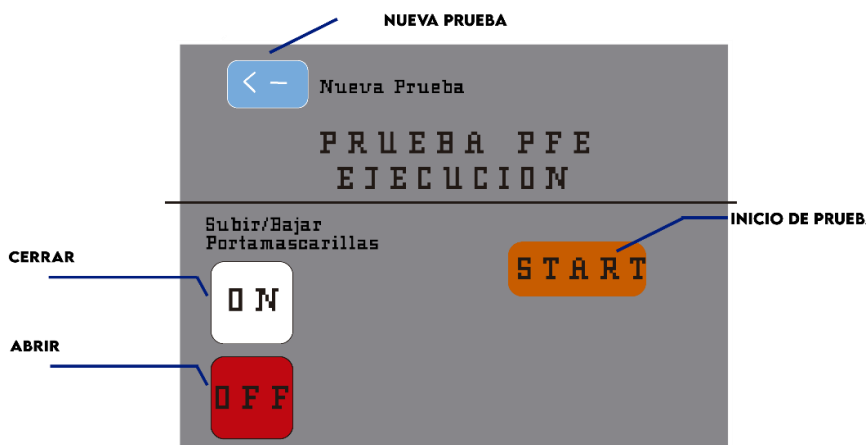
Una vez colocada la mascarilla, en el menú nos dirigimos a la parte 3. EJECUCIÓN y accedemos, en donde se despliega una pantalla que se muestra en la Figura 82, la cual tiene dos botones para abrir o cerrar el portamuestras y un botón de inicio de prueba, para continuar la prueba es necesario aplastar el botón de encendido



(cerrar el portamuestras) y seguidamente el botón de inicio (START). Hay que tener en cuenta que no se podrá iniciar la prueba si el portamuestras está abierto (OFF).

**Figura 82**

*Pantalla de prototipo: Paso 3 – Ejecución*

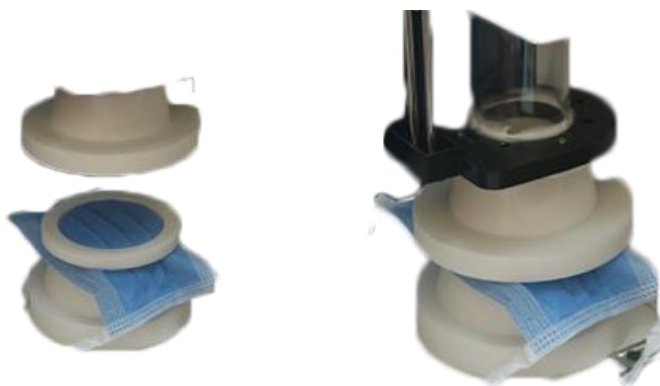


*Nota: Elaborado por Iñaguazo E.*

En la Figura 83 se muestra cuando el portamuestras está completamente cerrado.

**Figura 83**

*Portamuestras cerrado*



*Nota: Foto realizada por Iñaguazo E.*

En esta etapa no hay un tiempo fijo, ya que el sistema realiza la cantidad intervalos de muestreo de la anterior etapa, los resultados se muestran en la Figura 84, la barra de progreso será un indicador del progreso de la prueba. Generalmente esta etapa tiene una duración de 6 a 12 minutos. Una vez haya finalizado se mostrará un mensaje sobre la barra de progreso con la palabra “Finalizado” y se mostrará la cantidad de partículas antes de la mascarilla, la cantidad de partículas después de la mascarilla, la eficiencia de la mascarilla y las variables temperatura, presión y humedad.

**Figura 84**

*Pantalla de prototipo: Resultados de prueba*



*Nota:* Elaborado por Iñaguazo E.

## Capítulo IV

### Pruebas y Análisis de Resultados

Una vez culminada la construcción y ensamble del prototipo, como paso siguiente se verifica el correcto funcionamiento de los subsistemas del prototipo. Para la verificación de la capacidad de filtración de mascarillas y respiradores, se propone realizar pruebas de funcionamiento con mascarillas y respiradores recolectadas de la dotación que recibe el personal médico de un establecimiento de salud del que se obtuvo esta donación. También se utilizará un respirador con certificación NIOSH adquirido con su debida documentación de fabricación.

#### Pruebas

##### Pruebas de subsistemas

Para asegurar el funcionamiento de todo el sistema es importante realizar pruebas independientes a cada subsistema.

##### Pruebas del Hardware Mecánico

En esta prueba se desea verificar que toda la configuración y disposiciones de construcción y ensamble que rige la norma sean cumplidas, para lo cual un integrante de la empresa 5imple 3D será el encargado de verificar.

**Tabla 58**

*Check List del funcionamiento del hardware mecánico*

<b>Requerimiento de la norma ASTM</b>	<b>Valor o relación</b>	<b>Cumplimiento</b>
<b>F-2299</b>		
Conducto continuo de paredes rectas	-	Cumple
Conducto sin fugas de aire	-	Cumple

<b>Requerimiento de la norma ASTM F-2299</b>	<b>Valor o relación</b>	<b>Cumplimiento</b>
Sección transversal de la tubería	2 a 6 pulgadas	Cumple
Distancia entre inyección de aerosol y elemento de prueba	Mínimo de $10 \phi_p$	Cumple
Medidores de presión	$1 \phi_p$ arriba y abajo del medio filtrante	Cumple
Sondas para extracción de aerosol	Área transversal <10% del $\phi_p$	Cumple
Distancia entre sonda aguas arriba y aerosol	Mínimo de $8\phi_p$	Cumple
Distancia entre sonda aguas arriba y elemento de prueba	$2\phi_p$	Cumple
Distancia entre sonda aguas abajo y elemento de prueba	$3\phi_p$	Cumple
Longitud línea de muestreo	<100 cm	Cumple
Línea de transporte de muestra total	<200 cm	Cumple
Sellado de muestra no distorsione su integridad	-	cumple

*Nota:* Realizado por Iñaguazo E.

Después la verificación se obtienen las siguientes observaciones:

- El armado presenta robustez, sin elementos móviles y muy estable
- Toda la construcción es hermética, huecos o canales han sido tapados con silicona para garantizar hermeticidad.

### **Pruebas del Sistema de transporte y nebulización de partículas de prueba**

En esta prueba se desea verificar los requerimientos en cuanto al transporte y nebulización de partículas de prueba, para lo cual un integrante de la empresa 5imple 3D será el encargado de verificar.

Tabla 59

Check List del funcionamiento del transporte y nebulización de partículas

Requerimiento de la norma ASTM – F2299	Valor o relación	Cumplimiento
Velocidad de aire	0.5 a 25 cm/s	Cumple
Aire filtrado con filtro HEPA	99,97% eficiencia	Cumple

Nota: Realizado por Iñaguazo

Después de la verificación no existen observaciones.

### Pruebas del Sistema del sistema de fotometría láser

En esta prueba se desea verificar los requerimientos en cuanto al sistema contabilizador de partículas, para lo cual un integrante de la empresa 5imple 3D será el encargado de verificar.

Tabla 60

Check List del funcionamiento del transporte y nebulización de partículas

Requerimiento de la norma ASTM – F2299	Valor o relación	Cumplimiento
Sondas para extracción de aerosol	Área transversal <10% del $\phi_p$	Cumple
Distancia entre sonda aguas arriba y aerosol	Mínimo de $8\phi_p$	Cumple
Distancia entre sonda aguas arriba y elemento de prueba	$2\phi_p$	Cumple
Distancia entre sonda aguas abajo y elemento de prueba	$3\phi_p$	Cumple

Nota: Realizado por Iñaguazo E.

Después de la verificación se obtienen las siguientes verificaciones:

- Toda la construcción es hermética, huecos o canales han sido tapados con silicona para garantizar hermeticidad.

### Pruebas del Sistema de monitoreo y control

En esta prueba se desea verificar los requerimientos en cuanto al sistema de monitoreo y control de las variables, para lo cual un integrante de la empresa 5imple 3D será el encargado de verificar.

**Tabla 61**

*Check List del funcionamiento del monitoreo y control*

<b>Requerimiento de la norma ASTM – F2299</b>	<b>Valor o relación</b>	<b>Cumplimiento</b>
Conducto con porcentaje humedad relativa	30 a 50%	Cumple
Monitorear caída presión	-	Cumple
Temperatura del conducto	21±3°C	Cumple
Medidores de presión	1 $\emptyset_p$ arriba y abajo del medio filtrante	No cumple

*Nota:* Realizado por Iñaguazo E.

Después de la verificación se obtienen las siguientes verificaciones:

- La distancia a la que se encuentran los medidores de presión no son los indicados en la norma.

Frente a la observación se sustentó que debido a la limitación de componentes para medir la presión como indica la norma este requerimiento no fue llevado a cabo con las medidas exactas.

## Prueba de funcionamiento

Se diseña un experimento utilizando 6 diferentes muestras (3 mascarillas y 3 respiradores), 2 tipos de concentraciones (partículas de poliestireno de 1µm de diámetro y una concentración de Bromuro de Ipratropio) y 2 velocidades de aire (25 y 50 ft/min). Las muestras utilizadas en las pruebas se muestran en la Figura 85.

**Figura 85**

*Mascarillas y respiradores utilizados para la prueba de funcionamiento del prototipo*



*Nota:* Fotografía por Iñaguazo E.



En la Tabla 62 se muestran las características de las muestras utilizadas en la etapa de pruebas.

Tabla 62

Origen y características de las muestras

Origen	N°	Ilustración	Características
personal médico - Mascarilla	1		Tipo: desechable de procedimiento Capas: 5 capas Marca: DHISVE Certificación: se desconoce
personal médico - Mascarilla	2		Tipo: desechable Capas: 3 capas Marca: Mayfield Certificación: se desconoce
personal médico - Mascarilla	3		Tipo: desechable Capas: 3 capas Marca: Se desconoce Certificación: se desconoce
personal médico - Respirador no reutilizable (KN95)	4		Tipo: desechable Capas: 5 capas Marca: Se desconoce Certificación: se desconoce



Origen	N°	Ilustración	Características
personal médico - Respirador no reutilizable (KN95)	5		Tipo: desechable Capas: 5 capas Marca: No indica Certificación: se desconoce
Adquisición propia - Respirador no reutilizable	6		Tipo: desechable Capas: 5 capas Marca: nitta Certificación: NIOSH N95, LOTE 03-2021

Nota: Elaborado por Iñaguazo E.

Una vez que se tienen las muestras se diseña el experimento que se muestra en la Tabla 63.

**Tabla 63**

*Diseño de experimento para 3 factores con 2 réplicas*

Orden	Orden aleatorio	Tipo Mascarilla	Tipo de concentración	Velocidad (ft/min)	Eficiencia (%)
1	6	1	A	25	90,64
2	7	2	A	25	80,94
3	9	3	A	25	81,79
4	21	4	A	25	80,71
5	20	5	A	25	89,39
6	23	6	A	25	96,28
7	17	1	B	25	90,15
8	4	2	B	25	80,11

<b>Orden</b>	<b>Orden aleatorio</b>	<b>Tipo Mascarilla</b>	<b>Tipo de concentración</b>	<b>Velocidad (ft/min)</b>	<b>Eficiencia (%)</b>
<b>9</b>	2	3	B	25	80,74
<b>10</b>	24	4	B	25	90,53
<b>11</b>	18	5	B	25	89,34
<b>12</b>	19	6	B	25	96,47
<b>13</b>	5	1	A	50	88,86
<b>14</b>	16	2	A	50	77,18
<b>15</b>	11	3	A	50	79,40
<b>16</b>	3	4	A	50	92,00
<b>17</b>	10	5	A	50	85,77
<b>18</b>	15	6	A	50	95,50
<b>19</b>	13	1	B	50	90,53
<b>20</b>	22	2	B	50	78,79
<b>21</b>	8	3	B	50	80,56
<b>22</b>	1	4	B	50	89,88
<b>23</b>	12	5	B	50	89,10
<b>24</b>	14	6	B	50	92,45

*Nota:* El orden del experimento sigue un orden aleatorio que garantiza que no haya patrones en el orden de observación. El tipo de concentración A corresponde a partículas de poliestireno de 1 $\mu$ m, el tipo B corresponde al Bromuro de Ipratropio y el número de mascarilla corresponde a las utilizadas, detalladas en la Tabla 62. El tiempo que tardó en realizar estas pruebas fue de aproximadamente 12 horas, realizadas en 2 días seguidos

En la Tabla 64 se muestra un ejemplo de la ejecución de la prueba, el respaldo de las pruebas para todas las muestras se anexa en el recurso fotográfico.

Tabla 64

Ejemplo de ejecución de la prueba



Nota: Fotografías por Iñaguazo E.

En el mismo experimento se obtienen datos de temperatura, presión y humedad para cada prueba que se muestran en la Tabla 65.

Tabla 65

Resultados para diseño de experimentos de la Tabla 63

Eficiencia	# partículas Aguas arriba	# partículas Aguas abajo	Temperatura (°C)	Presión (psi)	Humedad relativa (%)
90,64	801	75	22	5	37
80,94	829	158	22	5	35
81,79	851	155	20	5	36
80,71	818	76	22	4	38
89,39	801	85	20	5	37
96,28	806	30	21	5	35
90,15	548	54	22	5	35
80,11	543	108	21	4	37

<b>Eficiencia</b>	<b># partículas Aguas arriba</b>	<b># partículas Aguas abajo</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Presión (psi)</b>	<b>Humedad relativa (%)</b>
80,74	566	109	21	4	36
90,53	528	50	22	4	38
89,34	563	60	21	4	36
96,47	567	20	20	5	38
88,86	664	74	20	4	36
77,18	666	152	20	5	36
79,4	762	157	22	4	38
92	813	65	20	4	38
85,77	731	104	21	5	37
95,5	667	30	21	4	36
90,53	528	50	22	5	36
78,79	514	109	20	5	37
80,56	535	104	21	4	36
89,88	494	50	21	4	36
89,1	523	57	21	4	36
92,45	530	40	22	5	37

*Nota:* El tiempo que tardó en realizar estas pruebas fue de aproximadamente 12 horas, realizadas en 2 días seguidos. Realizado por Ñaguazo E.

### **Análisis de Resultados**

En esta sección se analizan los resultados obtenidos en la prueba de funcionamiento a través de un análisis ANOVA balanceado, ya que se tiene la misma cantidad de datos para cada factor.

En la Tabla 66 se muestra la información de cada factor para el análisis.

**Tabla 66**

*ANOVA Balanceado: Información del factor*

<b>Factor</b>	<b>Tipo</b>	<b>Niveles</b>	<b>Valores</b>
<b>Mascarilla</b>	Fijo	6	1; 2; 3; 4; 5; 6
<b>Tipo de concentración</b>	Fijo	2	A; B
<b>VELOCIDAD (ft/min)</b>	Fijo	2	25; 50

*Nota:* La tabla muestra los parámetros para un ANOVA Balanceado

En la Tabla 67 se muestra en análisis de varianza para nuestra eficiencia de mascarilla.

**Tabla 67**

*ANOVA Balanceado: Análisis de varianza de Eficiencia (%)*

<b>Fuente</b>	<b>P</b>
Mascarilla	0,004
Tipo de concentración	0,514
VELOCIDAD (ft/min)	0,647
Mascarilla*Tipo de concentración	0,858
Tipo de concentración*VELOCIDAD (ft/min)	0,745
Mascarilla*VELOCIDAD (ft/min)	0,497

*Nota:* La tabla muestra los valores P de los factores analizados para un ANOVA Balanceado

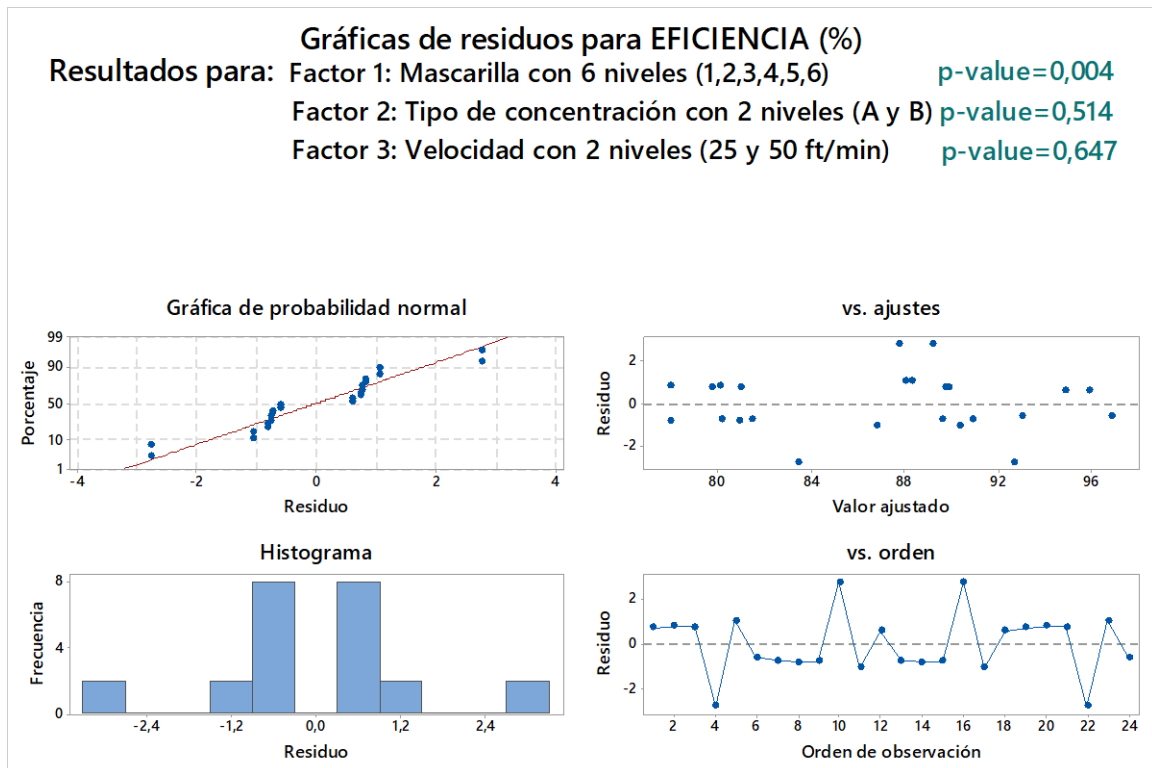
Se compara el P-value de cada factor y su interacción con el valor de 0.05, obteniendo como resultado que:

- El tipo de mascarilla es un factor significativo para la obtención de la eficiencia de la mascarilla por filtración de partículas, lo que garantiza que las partículas se están filtrando de acuerdo al tipo de mascarilla y eficiencia de la misma.
- El tipo de concentración no es un factor significativo para la obtención de la eficiencia de la mascarilla por filtración de partículas, lo que otorga la factibilidad de usar el bromuro de ipratropio o las partículas de poliestireno, por temas económicos y de disponibilidad, el mejor tipo de concentración para futuras pruebas es el bromuro de ipratropio.
- La velocidad del aire no es un factor significativo para la obtención de la eficiencia de la mascarilla por filtración de partículas, lo que garantiza que al usar velocidades comprendidas entre 1 y 50 ft/min, como rige la norma, se estará efectuando la prueba de forma correcta.
- Las interacciones mascarilla y tipo de concentración, tipo de concentración y velocidad, mascarilla y velocidad, no son factores significativos en las pruebas.

La Figura 86 indica el resultado de residuos del análisis, en donde se muestra que los datos siguen una distribución normal e independencia entre ellos, la gráfica de orden de observación no tiene patrones debido a que se el experimento fue realizado de manera aleatoria.

Figura 86

ANOVA Balanceado: Gráfico de residuos



*Nota:* A un costado se muestran los valores P de los factores analizados para un ANOVA Balanceado

## Capítulo V

### Conclusiones y Recomendaciones

En el presente capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones a las que se llegó una vez finalizado el diseño y construcción del prototipo.

#### Conclusiones

Se diseñó y se construyó un equipo para la validación y certificación de la capacidad de filtrado de mascarillas y respiradores según ASTM – F2299 con las siguientes características:

- Rango de flujo de prueba: 0.5 ~ 20 L/min
- Velocidad de aire de prueba: 0.5-25 cm/s
- Área de la sección transversal del conducto: 15cm<sup>2</sup> o 15E-4m<sup>2</sup>
- Rango de la eficiencia de filtración: 0 -99.99%, resolución 0.01%
- Detección tamaño de partículas: >1µm
- Tiempo de prueba: ~15 min
- Voltaje de alimentación: 110V
- Dimensiones: 500 x 600 x 1110 mm

La cámara de pruebas está construida sobre un mueble base que está diseñado de acuerdo a la normativa para equipos y mesones de laboratorio, además se encarga de garantizar las relaciones dimensionales entre los componentes que alberga de acuerdo a los requerimientos de la norma ASTM-F2299, para reducir el costo su fabricación fue realizada en aglomerado con un recubrimiento liso y en color blanco.

El sistema de transporte y nebulización de partículas de prueba está constituido por un filtro de alta eficiencia que elimina partículas del ambiente no deseadas durante



la prueba, un compresor con capacidad de 24L y un nebulizador médico que permite generar aerosoles con partículas mayores a 0.1  $\mu\text{m}$ .

En el sistema de fotometría láser se cuenta con sensor de medición cuantitativa, basado en anchos de pulsos el que se encarga de contabilizar las partículas que son atrapados por una sonda de vía central acoplado al conducto principal de prueba, cuya geometría y tamaño está regida por la norma en uso.

El sistema de monitoreo y control de condiciones ambientales consta de sensores y actuadores que se colocaron en el conducto de prueba mediante acoples impresos en 3D, esta tecnología otorgó la versatilidad para realizar diseños difíciles de fabricar o manufacturar por otro método.

Los resultados de prueba son mostrados en una pantalla touch de 3.2 pulgadas, la misma que permite la ejecución de la prueba y el control de las cámaras de temperatura, de nebulización y cierre o apertura de la portamascarillas. La ejecución de prueba es simple e intuitiva, sus detalles se pueden ver en el manual de usuario adjunto al trabajo.

### **Recomendaciones**

Antes de realizar alguna prueba se recomienda leer el manual de usuario, mismo que se encuentra adjunto al prototipo y usar equipo de protección personal: mascarilla, protector auditivo y gafas de seguridad.

Posicionar el prototipo en zonas planas, evitar las inclinaciones, debido a posibles desalineamientos en el cierre y apertura del portamuestras.

Se recomienda que la instalación y uso del prototipo sea en un espacio libre de polvos, gases y aerosoles.

De acuerdo a la información técnica se recomienda una limpieza semestral del sensor fotométrico DSM501a, para esto se humedecerá con agua un lado de un hisopo y se debe frotar el lente con él, finalmente secar el lente con el otro extremo del hisopo.

### **Trabajos futuros**

Implementar en el sistema de sellado, una protección automática o manual que impida colocar manos u objetos dentro del sistema y evitar atascamientos.

Además de utilizar el prototipo para evaluar la capacidad de filtración de mascarillas y respiradores nuevos, ampliar la investigación y conocer qué sucede con la eficiencia de mascarillas y respiradores al variar sus condiciones de almacenamiento, tipo de empaque y tiempo de uso.

Implementar un sistema de impresión de resultados con el uso de impresoras matriciales.

## Capítulo VI

### Referencias

3M. (2020). *Respirators and Surgical Masks: A Comparison*. 1-4.

3M. (Junio de 2020). *3M Ciencia Aplicada a la vida*. Obtenido de

[https://www.3m.com.ec/3M/es\\_EC/inicio/todos-los-productos-3m/~3M-](https://www.3m.com.ec/3M/es_EC/inicio/todos-los-productos-3m/~3M-)

[Respirador-de-Media-Cara-Reutilizable-Serie-7500-Protección-Respiratoria-](https://www.3m.com.ec/3M/es_EC/inicio/todos-los-productos-3m/~3M-Respirador-de-Media-Cara-Reutilizable-Serie-7500-Protección-Respiratoria-7501-7502-7503-/?N=5002385+8709319+8711017+8711405+8720539+8720550+8720785+3294780212&rt=rud)

[7501-7502-7503-](https://www.3m.com.ec/3M/es_EC/inicio/todos-los-productos-3m/~3M-Respirador-de-Media-Cara-Reutilizable-Serie-7500-Protección-Respiratoria-7501-7502-7503-/?N=5002385+8709319+8711017+8711405+8720539+8720550+8720785+3294780212&rt=rud)

[/?N=5002385+8709319+8711017+8711405+8720539+8720550+8720785+3294](https://www.3m.com.ec/3M/es_EC/inicio/todos-los-productos-3m/~3M-Respirador-de-Media-Cara-Reutilizable-Serie-7500-Protección-Respiratoria-7501-7502-7503-/?N=5002385+8709319+8711017+8711405+8720539+8720550+8720785+3294780212&rt=rud)

[780212&rt=rud](https://www.3m.com.ec/3M/es_EC/inicio/todos-los-productos-3m/~3M-Respirador-de-Media-Cara-Reutilizable-Serie-7500-Protección-Respiratoria-7501-7502-7503-/?N=5002385+8709319+8711017+8711405+8720539+8720550+8720785+3294780212&rt=rud)

3M. (Julio de 2020). *3M Science Applied to Life*. Obtenido de

[https://www.3m.com.ec/3M/es\\_EC/inicio/todos-los-productos-3m/~Respirador-](https://www.3m.com.ec/3M/es_EC/inicio/todos-los-productos-3m/~Respirador-para-Partículas-3M-8511-N95-80-caja/?N=5002385+8709315+8711017+8711405+8720539+8720542+8720774+3294780243&rt=rud)

[para-Partículas-3M-8511-N95-80-](https://www.3m.com.ec/3M/es_EC/inicio/todos-los-productos-3m/~Respirador-para-Partículas-3M-8511-N95-80-caja/?N=5002385+8709315+8711017+8711405+8720539+8720542+8720774+3294780243&rt=rud)

[caja/?N=5002385+8709315+8711017+8711405+8720539+8720542+8720774+3](https://www.3m.com.ec/3M/es_EC/inicio/todos-los-productos-3m/~Respirador-para-Partículas-3M-8511-N95-80-caja/?N=5002385+8709315+8711017+8711405+8720539+8720542+8720774+3294780243&rt=rud)

[294780243&rt=rud](https://www.3m.com.ec/3M/es_EC/inicio/todos-los-productos-3m/~Respirador-para-Partículas-3M-8511-N95-80-caja/?N=5002385+8709315+8711017+8711405+8720539+8720542+8720774+3294780243&rt=rud)

3M. (2020). *Respirators and Surgical Masks: A Comparison*. 1-4.

[https://multimedia.3m.com/mws/media/957730O/respirators-and-surgical-masks-](https://multimedia.3m.com/mws/media/957730O/respirators-and-surgical-masks-contrast-technical-bulletin.pdf)

[contrast-technical-bulletin.pdf](https://multimedia.3m.com/mws/media/957730O/respirators-and-surgical-masks-contrast-technical-bulletin.pdf)

3M. (2020). Comparison of FFP2, KN95, and N95 and Other Filtering Facepiece Respirator Classes. 1-3.

[https://multimedia.3m.com/mws/media/1791500O/comparison-ffp2-kn95-n95-](https://multimedia.3m.com/mws/media/1791500O/comparison-ffp2-kn95-n95-filtering-facepiece-respirator-classes-tb.pdf)

[filtering-facepiece-respirator-classes-tb.pdf](https://multimedia.3m.com/mws/media/1791500O/comparison-ffp2-kn95-n95-filtering-facepiece-respirator-classes-tb.pdf)

American Society for Testing and Materials. (2017). *Standard Test Method for*

*Determining the Initial Efficiency of Materials Used in Medical Face Masks to*

*Penetration by Particulates Using Latex Spheres (ASTM-F2299).*

[https://www.astm.org/f2299\\_f2299m-03r17.html](https://www.astm.org/f2299_f2299m-03r17.html)

Berger, D., & Eichfeld, C. (2020). Preliminary Evaluation of the Filtration Efficiency of Alternative Mask Filter Materials. *Penn State Journal of Medicine*, Vol 1 (2020): Penn State Journal of Medicine Fall 2020 Edition.

<https://doi.org/10.26209/PSJM61989>

British Standards Institution. (2001a). *Respiratory protective devices: Filtering half masks to protect against particles: requirements, testing, marking.*

British Standards Institution. (2001b). *Workbenches for laboratories: Dimensions, safety requirements and test methods.* BSI.

CDC. (4 de noviembre de 2020). *Centers for Disease Control and Prevention.* Obtenido de <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/prevent-getting-sick/cloth-face-cover-guidance.html>

Codeo f Federal Regulations. (1995). Approval of Respiratory Protective Devices (Parte 84 <https://www.ecfr.gov/current/title-42/chapter-I/subchapter-G/part-84>

*COVID-19—Update, Live.* (2022, enero). <https://www.worldometers.info/coronavirus/>

European Commission. (2020, marzo 25). *Coronavirus: Harmonised standards for medical devices to respond to urgent needs.*

[https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_20\\_522](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_522)

Forouzandeh, P., O'Dowd, K., & Pillai, S. C. (2021). Face masks and respirators in the fight against the COVID-19 pandemic: An overview of the standards and testing methods. *Safety Science*, 133, 104995. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104995>

- Garcia, G. P. A., Fracarolli, I. F. L., Santos, H. E. C. dos, Souza, V. R. dos S., Cenzi, C. M., & Marziale, M. H. P. (2021). Use of personal protective equipment to care for patients with COVID-19: Scoping review. *Revista Gaúcha de Enfermagem*, *42*(spe), e20200150. <https://doi.org/10.1590/1983-1447.2021.20200150>
- Graessler, I., Hentze, J., & Bruckmann, T. (2018). *V-MODELS FOR INTERDISCIPLINARY SYSTEMS ENGINEERING*. 747-756. <https://doi.org/10.21278/idc.2018.0333>
- Ippolito, M., Vitale, F., Accurso, G., Iozzo, P., Gregoretta, C., Giarratano, A., & Cortegiani, A. (2020). Medical masks and Respirators for the Protection of Healthcare Workers from SARS-CoV-2 and other viruses. *Pulmonology*, *26*(4), 204-212. <https://doi.org/10.1016/j.pulmoe.2020.04.009>
- Konda, A., Prakash, A., Moss, G. A., Schmoldt, M., Grant, G. D., & Guha, S. (2020). Aerosol Filtration Efficiency of Common Fabrics Used in Respiratory Cloth Masks. *ACS Nano*, *14*(5), 6339-6347. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c03252>
- Liu, Z., Yu, D., Ge, Y., Wang, L., Zhang, J., Li, H., Liu, F., & Zhai, Z. (2019). Understanding the factors involved in determining the bioburdens of surgical masks. *Annals of Translational Medicine*, *7*(23), 754-754. <https://doi.org/10.21037/atm.2019.11.91>
- O'Dowd, K., Nair, K. M., Forouzandeh, P., Mathew, S., Grant, J., Moran, R., Bartlett, J., Bird, J., & Pillai, S. C. (2020). Face Masks and Respirators in the Fight Against the COVID-19 Pandemic: A Review of Current Materials, Advances and Future Perspectives. *Materials*, *13*(15), 3363. <https://doi.org/10.3390/ma13153363>

- O'Kelly, E., Pirog, S., Ward, J., & Clarkson, P. J. (2020). Ability of fabric face mask materials to filter ultrafine particles at coughing velocity. *BMJ Open*, *10*(9), e039424. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2020-039424>
- Prather, K. A., Wang, C. C., & Schooley, R. T. (2020). Reducing transmission of SARS-CoV-2. *Science*, *368*(6498), 1422-1424. <https://doi.org/10.1126/science.abc6197>
- Pu, Y., Zheng, J., Chen, F., Long, Y., Wu, H., Li, Q., Yu, S., Wang, X., & Ning, X. (2018). Preparation of Polypropylene Micro and Nanofibers by Electrostatic-Assisted Melt Blown and Their Application. *Polymers*, *10*(9), 959. <https://doi.org/10.3390/polym10090959>
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2017). *Equipos de protección respiratoria* (INEN 181 2R). <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/181-2R.pdf>
- Ulrich, K. T., & Flores Valentín, A., Romero Hernández, Sergio, Romo Muñoz, Jorge Humberto, Eppinger, Steven D. (2013). *Diseño y desarrollo de productos*. <http://www.ebooks7-24.com/?il=281>
- Van Turnhout, J., Adamse, J. W. C., & Hoeneveld, W. J. (1980). Electret filters for high-efficiency air cleaning. *Journal of Electrostatics*, *8*(4), 369-379. [https://doi.org/10.1016/0304-3886\(80\)90057-1](https://doi.org/10.1016/0304-3886(80)90057-1)
- Vijayakumar, V. (2020). Personal Protection Prior to Preoperative Assessment—Little more an anaesthesiologist can do to prevent SARS-CoV-2 transmission and COVID-19 infection. *Ain-Shams Journal of Anesthesiology*, *12*(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s42077-020-00066-x>
- WHO. (2020). *Infection prevention and control during health care when novel coronavirus (nCoV) infection is suspected*. 1-5.

Zhou, S. S., Lukula, S., Chiossone, C., Nims, R. W., Suchmann, D. B., & Ijaz, M. K. (2018). Assessment of a respiratory face mask for capturing air pollutants and pathogens including human influenza and rhinoviruses. *Journal of Thoracic Disease*, 10(3), 2059-2069. <https://doi.org/10.21037/jtd.2018.03.103>