



**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA  
ELECTRÓNICA CON MENCIÓN EN  
TELECOMUNICACIONES**

**TESIS**

**Para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico con  
Mención en Telecomunicaciones**

Desarrollo y ensamblaje de un prototipo de control y  
monitoreo de corpúsculos infecciosos en las salas críticas de  
los establecimientos de Salud del Perú

**PRESENTADO POR**

Traverso Frisancho, Angel Junior

**ASESOR**

Aguirre León, Miguel Angel

**Lima, Perú, 2024**

## INFORME DE ORIGINALIDAD ANTIPLAGIO TURNITIN

Mediante la presente, hago de conocimiento:

1. Yo, Angel Junior Traverso Frisancho, identificada con DNI 76585516

Egresados de la Escuela de Ingeniería Electrónica con mención en telecomunicaciones del año 2023 – II y habiendo realizado<sup>1</sup> la Tesis para optar el Título Profesional<sup>2</sup> de Ingeniero Electrónico con mención en telecomunicaciones, se deja constancia que el trabajo de investigación fue sometido a la evaluación del Sistema Antiplagio Turnitin el 17 de octubre del 2024, el cual, ha generado un porcentaje de originalidad<sup>3</sup> de 12%

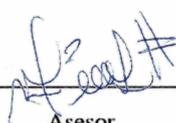
En señal de conformidad con lo declarado, firmo el presente documento el 19 de octubre del 2024



\_\_\_\_\_  
Egresado 1  
Angel Junior Traverso Frisancho

\_\_\_\_\_

Egresado 2



\_\_\_\_\_  
Asesor  
**Miguel Angel Aguirre**  
DNI: 48999226

<sup>1</sup> Especificar qué tipo de trabajo es: tesis (para optar el título), artículo (para optar el bachiller), etc.

<sup>2</sup> Indicar el título o grado académico: Licenciado o Bachiller en (Enfermería, Psicología ...), Abogado, Ingeniero Ambiental, Químico Farmacéutico, Ingeniero Industrial, Contador Público ...

<sup>3</sup> Se emite la presente declaración en virtud de lo dispuesto en el artículo 8°, numeral 8.2, tercer párrafo, del Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI, aprobado mediante Resolución de Consejo Directivo N° 033-2016- SUNEDU/CD, modificado por Resolución de Consejo Directivo N° 174-2019-SUNEDU/CD y Resolución de Consejo Directivo N° 084-2022- SUNEDU/CD.

# Entrega de Tesis Completa 17102024

## INFORME DE ORIGINALIDAD

12%

INDICE DE SIMILITUD

11%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://repositorio.uch.edu.pe">repositorio.uch.edu.pe</a> Fuente de Internet	3%
2	Submitted to Universidad de Ciencias y Humanidades Trabajo del estudiante	1%
3	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	1%
4	<a href="https://qdoc.tips">qdoc.tips</a> Fuente de Internet	<1%
5	<a href="https://repositorio.upt.edu.pe">repositorio.upt.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1%
6	<a href="https://cdn.www.gob.pe">cdn.www.gob.pe</a> Fuente de Internet	<1%
7	Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Peru Trabajo del estudiante	<1%
8	<a href="https://pesquisa.bvsalud.org">pesquisa.bvsalud.org</a> Fuente de Internet	<1%

## Resumen

Al cierre del año 2023 en el Perú, la contaminación de las salas críticas hospitalarias ha generado una alta concentración de organismos microbiológicos contaminantes del orden de 0.3 a más micras, la época de la pandemia ha evidenciado el alto nivel de contaminación cruzada en el que se encuentran las salas críticas de los establecimientos de salud, lo que da lugar a que el Perú sea el primer país del mundo con una tasa elevada de muertes por COVID-19 en relación con su población territorial.

Debido a esto la solución propuesta en esta tesis es el desarrollar y ensamblar en un ambiente controlado a escala un prototipo electrónico para monitorear y controlar el nivel de corpúsculos infecciosos mediante los parámetros de temperatura, humedad relativa, presión y material particulado a través del microcontrolador ESP 32 aplicando la tecnología IoT almacenando los datos en la nube y medidos en tiempo real para una futura réplica en las salas críticas de los establecimientos de salud en el Perú.

Se demostró la eficacia del diseño del dispositivo, replicado a escala, en la reducción de corpúsculos infecciosos. Las pruebas realizadas en un entorno controlado permitieron evaluar su desempeño en términos de eficiencia de filtración y su impacto en la calidad del aire interior. Para ello, se midieron y controlaron parámetros como temperatura, humedad, presión y material particulado, de acuerdo con las recomendaciones de las normas ISO 14644 y ASHRAE 170. Este diseño tiene como objetivo su futura implementación en salas de operaciones en establecimientos de salud en Perú, dentro del marco de creación de salas críticas.

**Palabras claves:** Corpúsculos infecciosos; Infecciones adquiridas en atención de salud; Filtros HEPA; Sala crítica; Calidad de aire interior.

## **Abstract**

By the end of 2023 in Peru, contamination in critical hospital rooms has led to a high concentration of microbiological contaminants measuring 0.3 microns or larger. The pandemic period has highlighted the severe levels of cross-contamination present in the critical care rooms of health facilities, making Peru the country with the highest COVID-19 death rate in relation to its territorial population.

In response to this issue, the proposed solution in this thesis is to develop and assemble, within a controlled environment, a scaled electronic prototype designed to monitor and control infectious particulate levels through parameters such as temperature, relative humidity, pressure, and particulate matter using the ESP32 microcontroller. The solution applies IoT technology to store data in the cloud and measure conditions in real-time, with the goal of future replication in the critical rooms of health facilities across Peru.

The efficacy of the device design, replicated on a small scale, was demonstrated in the reduction of infectious particulates. Tests conducted in a controlled environment allowed for evaluation of its filtration efficiency and impact on indoor air quality. Key parameters—temperature, humidity, pressure, and particulate matter—were monitored and controlled based on the recommendations of ISO 14644 and ASHRAE 170 standards. This design aims for future implementation in operating rooms of healthcare facilities in Peru, within the framework of creating critical care rooms.

**Keywords:** Infectious particulates, healthcare-acquired infections, HEPA filters, critical care rooms, indoor air quality.

## Contenido

Resumen .....	i
Abstract .....	ii
Introducción .....	1
<b>CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>5</b>
1.1.1. Planteamiento y descripción del problema .....	5
1.1.2. Formulación del problema general .....	7
1.1.3. Formulación de los problemas específicos.....	7
<b>1.2. DEFINICIÓN DE LOS OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>8</b>
1.2.1. Objetivo general .....	8
1.2.2. Objetivos específicos.....	8
<b>1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>8</b>
1.3.1. Justificación técnica.....	8
1.3.2. Justificación económica.....	9
1.3.3. Justificación social.....	9
<b>1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>10</b>
1.4.1. Alcances .....	10
1.4.2. Limitaciones .....	11
<b>CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1. ANTECEDENTES .....</b>	<b>13</b>
2.1.1. Internacionales .....	13
2.1.2. Nacionales.....	15
<b>2.2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>18</b>
2.2.1. Niveles de atención en salud.....	18
2.2.2. Infecciones adquiridas en atención en salud.....	19
2.2.2. Características y tipos de agentes patógenos en IAAS.....	19
2.2.4. Concepto de ventilación por flujo laminar .....	20

2.2.5. Diseño asistido por computadora (CAD) .....	24
2.2.6. Componentes electrónicos en diseño de control y monitoreo de corpúsculos infecciosos.....	24
2.2.6. Entorno de programación para microcontrolador ESP32 Thonny Ide .....	26
2.2.7. Protocolo de comunicación MQTT .....	26
2.2.8. Almacenamiento en la nube <i>ThingSpeak</i> .....	27
2.2.9. Tecnología IoT. ....	27
2.2.10. Ecuaciones de estadísticas descriptiva .....	28
<b>2.3. MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>29</b>
2.3.1. Tipo de investigación .....	29
2.3.2. Metodología de investigación .....	29
<b>2.4. MARCO LEGAL .....</b>	<b>30</b>
2.4.1. Ley N° 27657 del Ministerio de Salud.....	30
2.4.2. Ley general de salud N° 27657 .....	31
2.4.3. Norma técnica en salud N° 119 – MINS/DGIEM – V-01.....	31
<b>2.5. DIAGRAMA DE BLOQUES O ARQUITECTURA DEL SISTEMA .....</b>	<b>31</b>
<b>CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA APLICACIÓN .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1. Analizar la situación actual de infecciones asociadas a la atención en salud e infraestructura actual para el control y monitoreo de corpúsculos infecciosos involucrados en sala de operaciones de hospitales nivel III en Lima Metropolitana. ....</b>	<b>34</b>
3.1.1. Revisión del boletín epidemiológico de Perú .....	35
3.1.2. Tipos de agentes patógenos en IAAS .....	38
3.1.3. Investigar sobre las buenas prácticas, lineamientos y protocolos para la implementación de una sala clínicamente limpia hospitalaria .....	40
<b>3.2. Diseñar el dispositivo electrónico para el monitoreo y control de corpúsculos infecciosos en sala de operaciones de hospitales nivel III de Lima Metropolitana. ....</b>	<b>44</b>
3.2.1. Necesidades funcionales para el diseño del prototipo.....	44

3.2.2. Cálculo para la climatización, control de parámetros requeridos y condiciones de aire para el prototipado de la sala de operaciones. ....	48
3.2.3. Diseño del prototipo.....	51
<b>3.3. Seleccionar los componentes electrónicos adecuados para el diseño del dispositivo de control de corpúsculos infecciosos. ....</b>	<b>55</b>
3.3.1. Etapa de energización.....	56
3.3.2. Etapa de control .....	57
3.3.3. Etapa de monitoreo .....	61
3.3.4. Etapa de sensado.....	62
<b>3.4. Determinar y programar el algoritmo del dispositivo electrónico para el control y monitoreo de corpúsculos infecciosos.....</b>	<b>68</b>
3.4.1. Diagrama de flujo .....	68
3.4.2. Entorno de programación de datos, protocolo MQTT y comunicación con la nube en <i>ThingSpeak</i> .....	70
3.4.3. Procesamiento de datos.....	72
<b>3.5. Implementar y validar el prototipo de control y monitoreo de corpúsculos infecciosos.....</b>	<b>74</b>
3.5.1. Ensamblaje del prototipo .....	74
3.5.2. Análisis de resultados.....	76
<b>CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE COSTO Y BENEFICIO .....</b>	<b>80</b>
<b>4.1. ANÁLISIS DE COSTOS .....</b>	<b>81</b>
4.1.1. Recursos humanos.....	81
4.1.2. Recursos de hardware .....	81
4.1.3. Recursos software.....	82
4.1.4. Otros gastos .....	83
<b>4.2. ANÁLISIS DE BENEFICIOS .....</b>	<b>84</b>
4.2.1. Beneficios tangibles.....	84
4.3.2. Beneficios intangibles.....	85

<b>4.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....</b>	<b>85</b>
4.3.1. Desarrollo del flujo de caja .....	85
4.3.2. Análisis del VAN .....	86
4.3.3. Análisis del TIR .....	87
4.3.4. Análisis del ROI .....	88
<b>Conclusiones .....</b>	<b>89</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>90</b>
<b>Glosario .....</b>	<b>91</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>92</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>102</b>
<b>Anexo A. Matriz de consistencia .....</b>	<b>102</b>
<b>Anexo B. Cronograma de Actividades.....</b>	<b>105</b>
<b>Anexo C. Celda Peltier TEC 1 - 12706 .....</b>	<b>106</b>
<b>Anexo D.Sopladora de aire .....</b>	<b>107</b>

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Sistema de ventilación por flujo laminar en sala de operaciones .....	22
<b>Figura 2.</b> Esquema de funcionamiento protocolo MQTT .....	27
<b>Figura 3.</b> Proceso de funcionamiento del dispositivo .....	32
<b>Figura 4.</b> Brotes de IAAS 2010 - 2023 .....	36
<b>Figura 5.</b> Distribución de agentes patógenos en IAAS por tipo de dispositivo médico, 2020-2023. ....	37
<b>Figura 6.</b> Análisis de la incidencia acumulada de recuperaciones y muertes por sepsis según bacteria infectante. ....	39
<b>Figura 7.</b> Requisitos de mínimos de las áreas críticas para intervenciones quirúrgicas en establecimientos de salud de tercer nivel de atención. ....	42
<b>Figura 8.</b> Plano de la sala de operaciones 3 Hospital Nacional Guillermo Almenara Irigoyen.....	43
<b>Figura 9.</b> Clasificación de salas críticas ISO 14644.....	46
<b>Figura 10.</b> Unidad de tratamiento de aire .....	47
<b>Figura 11.</b> Proceso de filtrado en la unidad de tratamiento de aire.....	48
<b>Figura 12.</b> Tabla de corrección de altura.....	49
<b>Figura 13.</b> Adquisición de datos.....	49
<b>Figura 14.</b> Cálculo de la rejilla de extracción de aire .....	50
<b>Figura 15.</b> Cálculo del caudal de aire .....	51
<b>Figura 16.</b> Distribución del aire en el quirófano.....	52
<b>Figura 17.</b> Diseño isométrico del prototipo.....	52
<b>Figura 18.</b> Modelado 3D del prototipo.....	53
<b>Figura 19.</b> Proceso constructivo del prototipo.....	54
<b>Figura 20.</b> Diagrama del circuito electrónico.....	55
<b>Figura 21.</b> Energización del circuito.....	56
<b>Figura 22.</b> Microcontrolador ESP32.....	57
<b>Figura 23.</b> Sopladora de aire DCA.....	59
<b>Figura 24.</b> Representación del filtro HEPA y luz UV en el prototipo.....	60
<b>Figura 25.</b> Sistema de refrigeración Peltier.....	61
<b>Figura 26.</b> Pantalla OLED 0.96".....	62
<b>Figura 27.</b> Sensor UV GYML8511 .....	64
<b>Figura 28.</b> Conexión del sensor GP2Y1014AU0F .....	66

<b>Figura 29.</b> <i>Sensor BME280</i> .....	68
<b>Figura 30.</b> <i>Diagrama de flujo</i> .....	69
<b>Figura 31.</b> <i>Entorno de programación Thonny IDE en ESP32</i> .....	70
<b>Figura 32.</b> <i>Creación de canal en ThingSpeak</i> .....	71
<b>Figura 33.</b> <i>Protocolo MQTT en ThingSpeak</i> .....	72
<b>Figura 34.</b> <i>Configuración de la red</i> .....	72
<b>Figura 35.</b> <i>Integración y configuración de sensores y relé</i> .....	74
<b>Figura 36.</b> <i>Ensamble de sensores dentro del prototipo</i> .....	75
<b>Figura 37.</b> <i>Prototipado final del proyecto</i> .....	76
<b>Figura 38.</b> <i>Valores medidos con el control apagado</i> .....	77
<b>Figura 39.</b> <i>Datos medidos en funcionamiento del prototipo</i> .....	78
<b>Figura 40.</b> <i>Gráfica de medición para el control de corpúsculos infecciosos</i> .....	79

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> <i>Parámetros ambientales en establecimientos de salud del tercer nivel de atención</i> .....	41
<b>Tabla 2.</b> <i>Requisitos mínimos de parámetros ambientales y normativas de referencia para salas críticas</i> .....	45
<b>Tabla 3.</b> <i>Medidas del prototipo</i> .....	47
<b>Tabla 4.</b> <i>Comparativa de ESP32 con otros microcontroladores</i> .....	58
<b>Tabla 5.</b> <i>Análisis de sensores UV: GY-ML8511 frente a otros sensores UV</i> .....	63
<b>Tabla 6.</b> <i>Sensor GP2Y1014AU0F vs comparativa a sensores de calidad de aire</i> ...	64
<b>Tabla 7.</b> <i>Sensor BME280 en comparativa con sensores ambientales</i> .....	67
<b>Tabla 8.</b> <i>Presupuesto de gestión de recursos humanos</i> .....	81
<b>Tabla 9.</b> <i>Presupuesto de hardware</i> .....	82
<b>Tabla 10.</b> <i>Presupuesto de gestión de software</i> .....	83
<b>Tabla 11.</b> <i>Gastos adicionales</i> .....	83
<b>Tabla 12.</b> <i>Sumatoria de costos</i> .....	84
<b>Tabla 13.</b> <i>Flujo de caja del proyecto</i> .....	86

## Introducción

Se sabe que las salas críticas en los hospitales deben ser lugares clínicamente limpios y mientras se ejecutaba el presente estudio se observó que existen muchas salas de operaciones fuera de norma en el Perú. Para ello, la referencia es el alto nivel de concentración de partículas microbianas contaminantes con dimensiones de 0.3 a 0.5 micras, las cuales no se pueden ver, pero existen y están en estado de suspensión. Permanecen en el ambiente y son absorbidas por los pacientes y el personal de salud (Diario médico, 2021). Las infecciones adquiridas durante la atención en salud (IAAS) son generalmente respiratorias y pueden causar la muerte de los pacientes y del personal de salud vulnerable. La Corporación Británica de Radiodifusión (BBC) evidenció que la época de la pandemia ha demostrado una clara ineficiencia en el sistema de salud peruano, poniéndonos en primer lugar a nivel mundial con 653 muertes por cada 100 mil habitantes infectados de COVID-19 (BBC, 2021)

A nivel mundial se siguen las recomendaciones de ciertas normativas y estándares internacionales para el desarrollo adecuado del diseño y construcción de hospitales y clínicas como en este caso la Sociedad Americana de Aire Acondicionado, Refrigeración y Calefacción (ASHRAE) donde las salas críticas hospitalarias están debidamente adecuadas en su sistema de ventilación. La inyección de aire vertical se realiza desde el techo a través de un filtro HEPA (*High Efficiency Particulate Air*) con luz ultravioleta germicida, permitiendo que el aire se distribuya de manera homogénea. Mediante extractores ubicados en cada lado de las paredes en la parte inferior, el aire se expulsa y arrastra todos los corpúsculos infecciosos, minimizando el riesgo de que permanezcan en el ambiente (ASHRAE, 2018).

Existen proyectos que buscan un adecuado monitoreo de la calidad de aire interior en salas críticas hospitalarias y otros ambientes en una investigación reciente (Baquer et al., 2023), se destaca la importancia de la calidad del aire en entornos hospitalarios para la salud de pacientes y personal médico, así como la prevención de infecciones nosocomiales. Se desarrolló un sistema de monitoreo de nueve contaminantes en tiempo real, incluyendo dióxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles, material particulado, humedad y temperatura. El sistema utiliza tecnología de internet de las cosas (IoT) con un microcontrolador ESP32 y sensores como DHT11 y MG811 basados en Arduino. Los datos se envían a la nube y se generan alertas en caso de anomalías. Las pruebas en unidades hospitalarias mostraron variaciones en los

niveles de contaminación, con algunos superando los límites permitidos debido a actividades quirúrgicas y limpieza con esterilizadores. En otro proyecto Naskar y Pal (2021) sugieren un sistema de ventilación mecánica basado en un controlador tipo PI Fuzzi Tipo-2 autoajutable y un filtro HEPA para controlar la calidad del aire en entornos de tratamiento COVID-19. El sistema mantiene la calidad del aire controlando la concentración de CO<sub>2</sub> y la humedad. El controlador SIT2FPIC supera a otros controladores difusos en rendimiento y se destaca por su eficacia en la mejora de la calidad del aire en ambientes de contaminación cruzada. Finalmente, para ampliar la demostración Casteblanco y Marroquín (2023) proponen una solución IoT con sensores DHT22, BMP280 y controladores ESP8266 para un monitoreo preciso en una clínica de nivel 4 en Colombia. El dispositivo supervisa la temperatura y la presión en salas de cirugía y adyacentes, con alertas visuales y sonoras. Los resultados muestran fluctuaciones en la humedad y temperatura en comparación con el termohigrómetro de la clínica. El envío de datos del dispositivo promedia 2880 datos/día en 3 días. Concluyen que la temperatura, humedad y presión indican posibles fallos en el sistema de climatización del de la clínica.

La presente tesis propone solucionar dicha problemática mediante el diseño y la emulación de un dispositivo electrónico con tecnología IoT y reguladores de voltaje tipo *Buck Boost* con conmutadores de corriente continua y alterna capaz de monitorear y controlar el nivel de contaminación dentro de una sala crítica hospitalaria. Esto se logrará mediante el uso de sensores, actuadores y un microcontrolador ESP 32 que en conjunto y a través de un algoritmo de programación en el lenguaje *MicroPython*, mantenga en condiciones clínicamente limpias una sala de operaciones a escala de un establecimiento de salud.

En el primer capítulo de esta tesis, se abordará la problemática central, que implica la comprensión de las cuestiones relacionadas con la investigación. Además, se presentarán los objetivos establecidos para este estudio, junto con sus alcances y limitaciones.

En el segundo capítulo de este trabajo, se revisarán los antecedentes de investigación relevantes, así como se proporcionará un marco teórico que engloba todos los temas relacionados con la investigación. También, se describirá la metodología empleada en

el estudio, incluyendo el tipo de investigación y la metodología utilizada, además de mencionar el marco legal pertinente que rige la tesis.

El tercer capítulo de este documento se dedicará a una explicación detallada del desarrollo de los objetivos específicos, los cuales son fundamentales para la elaboración de la tesis. Además, se detallará el proceso de construcción del prototipo electrónico para el control y monitoreo de corpúsculos infecciosos, incluyendo definiciones adicionales.

El cuarto capítulo de este trabajo consistirá en un análisis exhaustivo de los costos, beneficios y de sensibilidad, ofreciendo una visión completa de la economía que respalda la implementación del sistema.

# **CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

## 1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1.1. Planteamiento y descripción del problema

A nivel mundial, la contaminación del aire interior de las salas de operación en los centros de salud representa una amenaza significativa para la salud de los ocupantes, con las infecciones nosocomiales como un grave riesgo. A pesar de las medidas preventivas, las infecciones adquiridas en el hospital siguen siendo un problema generalizado debido a la transmisión aérea de corpúsculos infecciosos. La deficiencia en los sistemas de ventilación hospitalaria es una de las principales causas de este problema. Una solución genérica implica un estudio exhaustivo de las estrategias de ventilación utilizadas en todas las salas hospitalarias y su capacidad para reducir el riesgo de infección cruzada. Esto incluiría la investigación de técnicas potenciales, como purificadores de aire, ventilación por flujo laminar para abordar las infecciones nosocomiales y mejorar la calidad del aire interior en los hospitales.

En Lima, persisten hospitales públicos de tercer nivel con infraestructuras que datan de más de un siglo, como el hospital 2 de mayo (1875), el hospital Loayza (1549), el hospital Rebagliati (1958), el hospital San Bartolomé (1756), entre otros. La continuidad operativa de estas instalaciones, en caso de sismos o emergencias sanitarias como pandemias, plantea un riesgo significativo determinante para la salud y la vida de la población peruana. (Leandro, 2022a). El especialista Lizandro Mejía, tras una denuncia en diario *El Comercio* en 2020, monitoreó las salas UCI del Hospital de Ate y encontró que cada cama tenía 122 millones de partículas contaminadas, comparadas con 120 millones de dichas partículas en la calle, demostrando que las salas críticas estaban más contaminadas que el exterior. Las IAAS por contaminación cruzada han desencadenado diferentes brotes de enfermedades fatales y ajenas a los síntomas que puede padecer el paciente como, por ejemplo: Neumonía, COVID-19, gripe estacional, tuberculosis, entre otras enfermedades comúnmente de carácter respiratorias. (Congreso de la República del Perú, 2021a).

Un equipo de investigación del diario *EEI Comercio* detectaron bacterias mortales en las salas de la unidad de cuidados intensivos (UCI) del hospital casi recién inaugurado de Ate en ese momento, microorganismos como el *Acinetobacter* y la *Klebsiella* residen en las heces y el intestino grueso de las personas, y que su exposición indebida puede ocurrir debido a una manipulación incorrecta, la poca ventilación mecánica y la indiferencia frente al monitoreo de concentración de material patógeno particulado. (*El Comercio*, 2020a) de las suposiciones a los hechos, en una primera investigación hubo 19 casos de pacientes graves en UCI infectados con estas bacterias drogo resistentes, a esto se sumaron 31 familias más por lo que ha permitido revelar que, en el hospital especializado de Ate, durante el tratamiento de pacientes graves con COVID-19 existe un brote infeccioso que afecta a todas las salas de cuidados intensivos. Este brote ha tenido consecuencias fatales, donde dichas infecciones intrahospitalarias fueron enmascarados como contaminación cruzada por COVID-19 (*El Comercio*, 2020b). Asimismo, más de 580 médicos fueron víctimas fatales de estas terribles infecciones nosocomiales. (Confederación Médica Latino Iberoamericana [CONFEMEL], 2023a). La guía práctica de la Organización Mundial de la Salud (OMS) menciona que, con el objetivo de prevenir infecciones intrahospitalarias, se enfatiza la necesidad de evitar la entrada de partículas de 0,3 micras o más a estos entornos, a fin de mantenerlos libres de contaminantes y bacterias. (OMS, 2003). Un artículo de la Corporación Británica de Radiodifusión (BBC) evidencia que el Perú se enfrentó a una situación alarmante en la que la tasa de mortalidad por COVID-19, donde fue la más elevada a nivel mundial en relación con su población de 32.5 millones de habitantes. Con aproximadamente 500 fallecidos por cada 100,000 personas, esta estadística refleja el desafío significativo que el país ha enfrentado durante la pandemia, subrayando la importancia de abordar eficazmente la crisis de salud pública en el futuro (BBC, 2021). Para reducir las partículas infecciosas transmitidas por el aire en una sala de operaciones multifuncional, es necesario desarrollar un prototipo de una sala de operaciones multifuncional a escala en un ambiente controlado capaz de

medir en tiempo real, con tecnología IoT y almacenamiento en la nube los parámetros de temperatura, humedad, presión y partículas PM 2.5, haciendo circular el aire en el recinto con una cantidad mínima de 15 renovaciones de aire por hora, cumpliendo con los requisitos de la normativa internacional ISO 14644 para el diseño de salas blancas a través de un filtro de partículas de alto rendimiento (HEPA) integrado con luz ultravioleta germicida. Si se retiran las partículas mayores a 0.3  $\mu\text{m}$  de diámetro y mayores, el aire que entra al quirófano estará esencialmente limpio y libre de contaminantes bacterianos. (ISO 14644, 2022).

### **1.1.2. Formulación del problema general**

¿Como monitorear en tiempo real y controlar la cantidad de corpúsculos infecciosos en salas críticas de establecimientos de salud del Perú?

### **1.1.3. Formulación de los problemas específicos**

**P.E.1:** ¿Cuál es la situación actual de las cifras por infecciones de corpúsculos infecciosos asociadas a la atención en salud, así como los sistemas de monitoreo y control en sala de operaciones de hospitales nivel III en Lima Metropolitana?

**P.E.2:** ¿De qué manera se logrará el monitoreo y control de los corpúsculos infecciosos en sala de operaciones de los hospitales de Lima Metropolitana?

**P.E.3:** ¿Cuáles son los componentes electrónicos adecuados para el diseño del dispositivo monitoreo y control de corpúsculos infecciosos en el prototipado?

**P.E.4:** ¿Cuáles son las acciones adecuadas del algoritmo del dispositivo electrónico para el control y monitoreo de corpúsculos infecciosos en sala de operaciones de hospitales nivel III de Lima Metropolitana?

**P.E.5:** ¿Como validar la efectividad del funcionamiento del prototipo de monitoreo y control de corpúsculos infecciosos en sala de operaciones de hospitales nivel III de Lima Metropolitana?

## **1.2. DEFINICIÓN DE LOS OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN**

### **1.2.1. Objetivo general**

Desarrollar y ensamblar un prototipo electrónico para el monitoreo y control de corpúsculos infecciosos en las salas críticas de establecimientos de salud del Perú.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

**O.E.1:** Analizar la situación actual de infecciones asociadas a la atención en salud e infraestructura actual para el control y monitoreo de corpúsculos infecciosos involucrados en sala de operaciones de hospitales nivel III en Lima Metropolitana.

**O.E.2:** Diseñar el dispositivo electrónico para el monitoreo y control de corpúsculos infecciosos en sala de operaciones de hospitales nivel III de Lima Metropolitana.

**O.E.3:** Seleccionar los componentes electrónicos adecuados para el diseño del dispositivo de monitoreo y control de corpúsculos infecciosos.

**O.E.4:** Determinar y programar el algoritmo del dispositivo electrónico para el control y monitoreo de corpúsculos infecciosos.

**O.E.5:** Implementar y validar el prototipo de control y monitoreo de corpúsculos infecciosos.

## **1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.3.1. Justificación técnica**

Se dispone de una tecnología control y monitoreo en tiempo real, mediante un microcontrolador ESP32, sensores de humedad, presión, temperatura, material particulado, inyectores de aire, celda Peltier, interfaz gráfica de usuario, *software* de control, conexiones, comunicación con el internet de las cosas (IoT) y almacenamiento en la nube, lo cual en conjunto dará indicaciones al controlador para la predicción del respectivo mantenimiento y/o reemplazo de los filtros HEPA según el porcentaje de aire libre de contaminación microbiana que indicarán los sensores, tomando las muestras en tiempo real hasta que empiecen a variar durante el proceso de ventilación compensada,

manteniendo los rangos de presión, temperatura, humedad y material particulado óptimos en la sala de operaciones.

### **1.3.2. Justificación económica**

Se va ingentes cantidades de dinero en tratar al paciente infectado por consecuencia de la poca asepsia que hay en las salas críticas. Considerando el costo de infección nosocomial por la Organización Panamericana de la Salud (OPS) en el Hospital Sergio Bernales de Lima. En promedio, el costo de cada caso de neumonía asciende los S/. 7,474.00 (siete mil setecientos setenta y cuatro soles). (OPS, 2003, p.141). Ahora bien, tomando en cuenta a los brotes de IAAS en los 571 pacientes durante los años 2020, 2021 y 2022 del boletín epidemiológico del Perú, el estado peruano invirtió un monto aproximado de S/.4,267,654.00 (cuatro millones doscientos sesenta y siete mil seiscientos cincuenta y cuatro soles). El estado se ahorraría esta gran inversión evitando que los pacientes se contagien con las infecciones asociadas a la atención en salud, generando una inversión mucho mayor en poder salvarlo y evitando su muerte.

Cambio de infraestructura, el cual contempla, todo un proyecto de inversión, hacer un expediente técnico, estudio económico, diseño de la nueva sala e implementación, los directores de los hospitales no lo pueden hacer, puesto que involucrarse en una obra que va demandar un tiempo escapa al tiempo de gestión que ellos tienen. Una solución extranjera para la etapa del monitoreo y control de corpúsculos infecciosos puede costar un aproximado de S/.50,000.00 (cincuenta mil soles). El presente proyecto busca ser más costo efectivo en dicha etapa, aterrizado a la realidad hospitalaria peruana y ahorrando un 40% menos que un producto extranjero.

### **1.3.3. Justificación social**

Las infecciones adquiridas en el hospital, también llamadas infecciones nosocomiales son causas importantes de morbilidad y mortalidad, son considerados problemas de salud pública de gran importancia en el siglo XXI, tanto a nivel mundial como en Europa. Se estima que el 10% de la

población europea es hospitalizada anualmente debido a las HAI, afectando aproximadamente a 1.75 millones de pacientes y causando 175,000 muertes cada año. En Estados Unidos, las infecciones nosocomiales representan dos millones de infecciones y noventa mil muertes anuales. Además, entre 50,000 y 120,000 muertes al año se deben a infecciones nosocomiales, con un costo anual de alrededor de 7 millones de euros en cuidados adicionales, tratamientos y operaciones secundarias. En Pakistán, se reportan 1,170,561 casos de infecciones nosocomiales cada año. (Idrees et al., 2021)

En el Perú, durante la pandemia los pacientes fueron atendidos en carpas y ambientes compartidos donde el paciente con una mayor carga viral contagiaba a los otros pacientes que tenían menor carga viral y lo mismo al personal de salud dando ninguna esperanza de vida a todos los pacientes y personal de salud de esa época. Hasta la fecha se sabe que más de 580 médicos han fallecido a causa de la contaminación cruzada por COVID-19. (CONFEMEL, 2023b). Así como los más de 2500 pacientes contagiados y hospitalizados solo en el MINSA a inicios del 2022. (MINSA, 2023). Hoy en día, las infecciones asociadas a la atención en salud siguen poniendo en riesgo la salud de la población peruana.

## **1.4. ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.4.1. Alcances**

- El proyecto de investigación logrará la fase de emulación mediante un prototipo de una sala de operación multifunción a escala.
- Se pretende monitorear y controlar las partículas antisépticas en las salas críticas de los hospitales y/o clínicas del Perú, tomando en cuenta la presión de aire, temperatura, humedad y material particulado P.M. 2.5.
- Se procura utilizar tecnologías IoT y almacenamiento en la nube para el prototipo, con propósito de una mejoría en el monitoreo y control.
- En base a los resultados obtenidos se puede replicar en clínicas y ambientes de creación de fármacos.

- El proyecto puede escalar a soluciones de monitoreo, control de polvo y otros contaminantes en *data centers* o centros de datos.
- Se puede prevenir el contagio por infecciones asociadas a la atención en salud garantizando la salud y prevaleciendo la vida de muchas personas.

#### **1.4.2. Limitaciones**

- El proyecto de investigación se orientará solamente a salas críticas que requieran presión positiva, en este caso, salas de operaciones del tipo multifuncional en hospitales de nivel III en Lima Metropolitana.
- El tiempo es una limitante para la implementación del proyecto de investigación.
- La dificultad en la disponibilidad a conveniencia del uso y recolección de datos en las salas críticas hospitalarias y/o clínicas.
- Si el presente trabajo se quiere implementar en provincia será difícil precisar si los nuevos hospitales implementados y proyectados a implementar contemplan el uso de los filtros HEPA en su expediente técnico.
- Es necesaria la autorización de los hospitales y/o clínicas para que el prototipo se pruebe en un entorno real, lo cual es una limitante debido al factor tiempo.
- El impedimento económico para conseguir los filtros HEPA y sensores contadores de partículas patógenas de alta precisión.

## **CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO**

## 2.1. ANTECEDENTES

### 2.1.1. Internacionales

En la investigación de su artículo científico realizada por Baqer et al., (2023) detallan la importancia de la calidad del aire interior en entornos hospitalarios como un factor crucial para proteger la salud de los pacientes y el personal médico, prevenir infecciones nosocomiales y garantizar un entorno de atención médica seguro. En ese sentido, nace el objetivo de desarrollar una metodología innovadora para la prevención de los niveles de contaminación hospitalaria que incluye los nueve contaminantes recomendados para hospitales: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno, ozono, formaldehído (HCHO), compuestos orgánicos volátiles, material particulado (PM), humedad y temperatura del aire. El sistema proporciona monitoreo en tiempo real con tecnología sensorial de internet de las cosas mediante un microcontrolador ESP32 y módulos de sensores de los cuales destacan el sensor de humedad y temperatura DHT 11 y el sensor de CO<sub>2</sub> MG811 basado en Arduino, los cuales envían los datos de los contaminantes a una plataforma en la nube y puede activar alertas tempranas en caso de anomalías. Se realizaron pruebas en unidades de cuidados intensivos quirúrgicos, departamentos de emergencias y salas de mujeres en un hospital. Inmediatamente al finalizar la cirugía, las primeras lecturas realizadas en el dispositivo fueron recibidas durante el período de esterilización antes de la siguiente cirugía, dando como resultado que la temperatura se mantuvo moderada en el rango de los 28 a 29 °C, el CO mantuvo un rango aceptable con un valor de 20 partes por millón (ppm), el CO<sub>2</sub> superó la calidad deficiente del umbral de 2000 ppm en un 5%, la concentración de material particulado PM<sub>2.5</sub> en un periodo de 15 minutos superó el umbral moderado con un valor mayor a 50 mg/m<sup>3</sup>, el formaldehído superó su umbral de 110 µg/m<sup>3</sup>. Al inicio, los contaminantes estaban en niveles altos debido a la cirugía previa y la limpieza con esterilizadores. Minutos antes de una cirugía, los niveles eran moderados, pero el CO<sub>2</sub> y el formaldehído aumentaron, superando los límites permitidos.

En la presente tesis, se implementará el uso de tecnología IoT, así como el sensor de material particulado PM 2.5 para un enfoque actualizado y completo en la medición y análisis de la calidad del aire en sala de operaciones. Además, el sistema proporciona monitoreo en tiempo real y alertas tempranas, lo que permite una respuesta rápida ante cualquier anomalía.

Por otra parte, Naskar y Pal (2021) indican en su artículo sobre los problemas y muertes que generó la pandemia del COVID-19 en relación a la contaminación cruzada. Frente a esta problemática, los autores plantean desarrollar una nueva solución de ventilación mecánica para el control de la calidad del aire interior haciendo uso de un controlador basado en lógica difusa tipo 2, a fin de controlar la humedad y dióxido de carbono de la habitación de un paciente, tomando en cuenta el número de personas presentes proponen un modelo de controlador PI Fuzzi Tipo-2 autoajustable a intervalos (SIT2FPIC). Para su diseño, utilizaron un filtro HEPA en la salida para minimizar la transmisión de partículas antisépticas en estado de suspensión. El ventilador extractor de aire de la salida es accionado por el controlador propuesto en función de la concentración de CO<sub>2</sub> y la humedad del aire deseadas. En este estudio se utilizan diferentes tipos de controladores de sistemas expertos difusos para proporcionar las condiciones de confort necesarias para las salas de tratamiento COVID-19. Dando como resultado que se mantiene la calidad de aire interior (IAQ) controlando la concentración de CO<sub>2</sub> y el porcentaje de humedad, asumiendo que la temperatura es constante en la sala. El CO<sub>2</sub> y el porcentaje de humedad deseados se fijan en 800ppm y 60% respectivamente. Concluyendo que, la implementación del controlador SIT2FPIC propuesto en salas ventiladas mostró un rendimiento muy superior al de otros controladores difusos. Este trabajo de investigación aportará en la metodología de cálculo y programación aplicada para el control de la concentración interior de CO<sub>2</sub> y humedad en ambientes de contaminación cruzada mediante la lógica difusa, como idea de control y monitoreo de material particulado e inclusión de filtro HEPA en el desarrollo del algoritmo para el dispositivo electrónico.

Asimismo, Castebianco y Marroquín (2023), indican en su investigación que en la clínica de nivel 4 ubicada en Colombia utiliza un sistema de registro manual para controlar las variables ambientales en los quirófanos, pero este método no cumple con los estándares necesarios para un monitoreo exhaustivo. Por lo tanto, los autores proponen implementar una solución que permita un monitoreo más preciso y eficiente mediante el internet de las cosas (IoT) con sensores DHT22 para humedad y temperatura, BMP280 para la presión barométrica, una alarma visual y controladores ESP8266 para el monitoreo y transmisión wifi. El dispositivo cumple la función de monitoreo los parámetros de temperatura y presión relativa al interior de la sala de cirugía y salas adyacentes a los quirófanos con una alarma encargada de alertar de forma visual y sonora la relación y cambios de dichos parámetros. Luego de definir los componentes, se evidencia en los resultados que los valores de humedad relativa y temperatura del prototipo tienden a ser más fluctuantes en comparación a las mediciones que presentan el termohigrómetro de la clínica. Por otro lado, evaluando la calidad en el envío de datos del dispositivo en un promedio de 3 días se obtuvo un total de 2,880 datos/día. En síntesis, concluyen que, la temperatura, la humedad relativa y la presión presentan niveles inusuales con medidas por debajo de lo normal las cuales evidencian probables fallas en el equipamiento de climatización de aire. En efecto, dicha investigación contribuirá al desarrollo de la presente tesis, tomando en cuenta el monitoreo de la presión, humedad y temperatura integrados en un solo sensor como es el BME 280, en cuanto a la incertidumbre comparada con los métodos tradicionales de control para condiciones ambientales. Además, el microcontrolador ESP en su versión de 38 pines servirá como base de programación fundamental para la comunicación WiFi y tecnología IoT.

### **2.1.2. Nacionales**

La investigación realizada por Medina M., (2020) detalla en su tesis la contaminación del aire es un grave riesgo para la salud, afectando a millones de personas en todo el mundo, especialmente en áreas

urbanas. A pesar de los esfuerzos para reducir esta amenaza, las tasas de mortalidad siguen aumentando, especialmente entre niños y adultos mayores. Las emisiones de contaminantes, como el monóxido de carbono y las partículas suspendidas, provienen principalmente de vehículos y la industria.

Esta tesis propone la creación de un dispositivo basado en IoT que mide y monitorea la calidad del aire en áreas urbanas. Utiliza el microcontrolador Arduino MKR1000 y MQTT para transferir datos a la nube y almacenarlos en una base de datos. Además, proporciona informes y alertas en tiempo real para que los usuarios puedan tomar medidas preventivas. Este proyecto aborda un problema de salud pública importante respecto a la calidad de aire y ofrece una solución tecnológica considerando el protocolo MQTT para transferencia y almacenamiento de datos en la nube el cual servirá de aplicación para la presente investigación.

La tesis realizada por Torres J., (2019) menciona que, en la mayoría de los establecimientos de salud y hospitales del país, se presentan múltiples necesidades en términos de innovación y tecnología, dejando de lado la seguridad del personal de salud que trabaja en los laboratorios. Es así, que el autor plantea la solución de efectuar un sistema de control electrónico para los filtros HEPA en su cabina de bioseguridad de clase II aplicando la automatización electrónica y una lógica de control de presión. Su sistema incorpora una lógica de control de presión mediante un microcontrolador PIC 16F877 y un transmisor de presión diferencial para el monitoreo de falla en los filtros HEPA. Los resultados que obtuvo en su implementación del sistema fueron valores precisos de presiones diferenciales que oscilaron entre 0.5 inH<sub>2</sub>O y 1.5 inH<sub>2</sub>O. Llegando a concluir que el sistema permitió comprobar los dos niveles de presión diferentes al ubicar las mangueras de forma positiva y negativa en puntos estables del flujo de aire. De este modo, la mencionada investigación servirá como consideración a tomar en cuenta la técnica y el nivel de presión unidireccional positiva con objetivo de

monitorear y controlar las posibles fallas de los filtros HEPA aplicados en sala de operaciones hospitalarias.

Por otro lado, Mendoza y Cordero (2022). Indican en su tesis que, pasamos la mayor parte de nuestras vidas en espacios interiores, entre un 75% y 90%. Esto destaca la importancia de tener una buena calidad del aire en interiores, ya que se ha encontrado que el aire en estos espacios está entre 3 y 7 veces más contaminado que el aire exterior. En los últimos años, se ha prestado especial atención al "síndrome del edificio enfermo", que engloba una amplia gama de síntomas o enfermedades atribuidas al propio edificio por las personas que trabajan o viven en él. En relación, al ver esta problemática, los autores proponen diseñar un sistema IoT que permita el monitoreo remoto de la calidad del aire al interior mediante los parámetros de presión, temperatura, humedad, CO<sub>2</sub> y PM<sub>2.5</sub> mediante los sensores BME 680 y DSM501A, los cuales fueron procesados e integrados a una red con la topología tipo malla mediante las plataformas ESP - 07 y ESP - 8266 en los ambientes de la facultad de Ingeniería de la Universidad Privada de Tacna. Obteniendo los resultados promedios de 956.02 (hPa) de presión, 22.6°C de temperatura, 36.2% de humedad, 530.32 (ppm) de CO<sub>2</sub> y 9.35 (µg/m<sup>3</sup>) de PM<sub>2.5</sub>. Comprobando así que los parámetros medidos están dentro de los estándares de calidad ambiental del aire. De acuerdo con esta evidencia, es considerada adecuada para el aporte en la presente tesis debido a que propone una medición consolidada con el hacer uso del sensor BME 680 que integra múltiples parámetros de precisión como la temperatura, y humedad y presión en un solo dispositivo disminuyendo el consumo de corriente y el espacio para el monitoreo de la calidad de aire interior aplicado a sala de operaciones hospitalarias.

De igual manera, Aldazábal (2022). Señala que, la ausencia de una climatización adecuada podría ocasionar contaminación en los productos del área de producción galénicos, es por ello que la climatización en el sector farmacéutico no solo busca brindar confort al personal que trabaja en la producción, sino también pretende garantizar la calidad de los productos fabricados. Esto se puede ver reflejado en las

salas críticas hospitalarias, de las cuales no se tiene una correcta climatización y ventilación mecánica en su interior causando la contaminación cruzada de los pacientes y personal de salud. Al ver esta problemática, el autor propone dimensionar y calcular los elementos que constituyen un modelo de climatización a sala limpia basado en la ISO 8. Su diseño se basa en cálculos para el control adecuado del nivel de contaminación, temperatura, humedad relativa, presión diferencial, renovación de aire, partículas de aire y los tipos de filtros para una sala limpia. Que, en efecto da como resultado un sistema de aire acondicionado con capacidad de 341,400 BTU/h en consideración a una renovación del aire del 100%, un caudal de inyección de 1785.8 pies cúbicos por minuto (CFM), un caudal de extracción de 1382 (CFM), con una presión diferencial de 9.9 Pa, un filtrado de mediana eficiencia de 90 - 95% y filtro tipo HEPA de 99.99% de eficiencia. Concluyendo así, que se obtuvo un área protegida en relación a una posible contaminación cruzada. De acuerdo con el autor, dicha información contribuirá como base de datos para la comparación con algunos modelos de climatización aplicados en salas clínicamente limpias hospitalarias y como base fundamental para el cálculo y diseño HVAC en sala de operaciones.

## **2.2. MARCO TEÓRICO**

### **2.2.1. Niveles de atención en salud.**

Las categorías de atención en salud están divididas en 3 niveles, posadas y postas de salud, consultorios con profesionales no médicos (I-1), con médicos (I-2), centros de salud y médicos especializados y policlínicos (I-3), y centros de salud y médicos con camas de internamiento (I-4) constituyen el primer nivel de atención. Los hospitales y clínicas de atención general en el segundo nivel (II-1), los que tienen mayor especialización (II-2) y los que se dedican a la atención especializada (II-E). Los hospitales y las clínicas de atención general pertenecen al tercer nivel, que incluye mayores unidades de servicios de salud (III-1), servicios generales (III-E) e institutos especializados (III-2). Según información proporcionada por el

Ministerio de Salud, Lima Metropolitana posee 13 hospitales de tercer nivel. (MINSA, 2024).

### **2.2.2. Infecciones adquiridas en atención en salud.**

Las infecciones relacionadas con la atención en salud son infecciones que se adquieren durante la prestación de servicios médicos y pueden ocurrir en una variedad de lugares, como hospitales y centros de salud. IAAS, especialmente infecciones del sitio quirúrgicos son cruciales en las salas de operación. El flujo de aire en estas áreas debe proteger a los pacientes del síndrome de insuficiencia respiratoria (SSI) y al personal médico de agentes infecciosos. El equipo médico es la principal fuente de microorganismos patógenos, mientras que los pacientes contribuyen mínimamente a contaminación y son los más vulnerables a adquirir una infección nosocomial. La inhalación o el depósito de bacterias en la herida quirúrgica pueden transmitir polución cruzada influyendo altamente en la tasa de infección. (Schumann et al., 2023).

### **2.2.2. Características y tipos de agentes patógenos en IAAS.**

Los grados más altos de contaminación en hospitales de nivel superior presentan agentes microbianos predominantes tal y como es demostrada en la investigación de Odoyo et al., (2023) a los *Enterococcus faecalis / faecium*, *Staphylococcus aureus*, *Klebsiella pneumoniae*, *Acinetobacter baumannii*, *Pseudomonas aeruginosa*, así como las especies de *Enterobacter* y *Escherichia coli*, conocidos como patógenos ESKAPEE. Los cuales son responsables de las IAAS a nivel mundial.

### **2.2.3. Criterios de implementación para una sala crítica clínicamente limpia.**

Para que una sala crítica sea clínicamente limpia se debe considerar principalmente los criterios de diseño que recomienda la organización internacional de normalización ISO 14644-4, (2022). Especifica los requisitos y límites para las partículas en el aire, así como los métodos de prueba y clasificación de las salas limpias según su nivel de

limpieza tales como la instalación de sistemas de filtración de aire altamente eficientes, ya sea mediante el uso de filtros centrales o filtros HEPA, que logren una eficiencia del 99,97% al 99,99%, capturando partículas de 0,3 micrones. Para garantizar un flujo aerodinámico unidireccional y evitar la contaminación cruzada suele ser necesario considerar la velocidad media del aire entre 0,20 m/s y 0,60 m/s a una distancia de prueba de 150 mm a 300 mm desde la cara de entrada del aire de suministro. La velocidad, el flujo de aire debe dirigirse desde la entrada en la habitación, alrededor del paciente y hacia la salida, manteniendo una presión positiva en la habitación en relación al pasillo. Es importante que la habitación esté bien sellada y se mantenga una presión adecuada. Además, se recomienda un flujo de aire laminar con una tasa de renovación de aire por hora que oscile entre 15 y 400 R/H (tasas más altas pueden generar incomodidad al paciente). Siendo esencial el uso de filtros HEPA para garantizar la efectividad del sistema. Graselli et al., (2020) indican que el tamaño promedio del coronavirus es de alrededor de 0,123 micrones y según el Instituto de Ciencias y Tecnología Ambiental, se establece que un filtro HEPA debe ser capaz de retener el 99,97% de las partículas de 0,01 micrones o mayores. En la actualidad, los sistemas de filtración HEPA han incorporado luz ultravioleta de alta energía y recubrimientos antimicrobianos para eliminar las bacterias y virus que quedan atrapados en el medio filtrante. Esto garantiza un nivel muy elevado de protección contra la transmisión de partículas antisépticas en estado de suspensión aéreas.

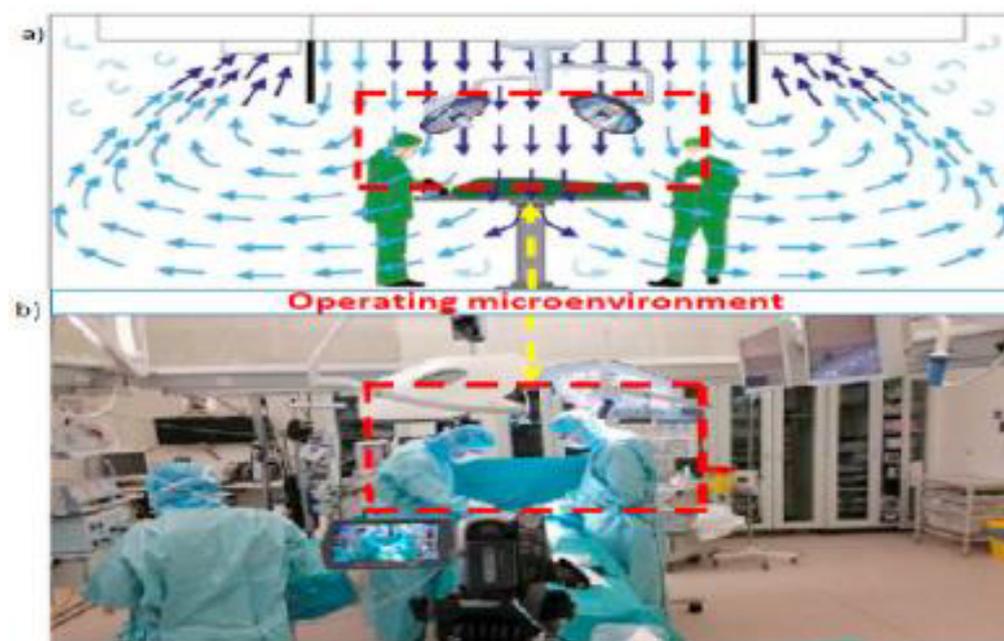
#### **2.2.4. Concepto de ventilación por flujo laminar**

El manual de diseño de calefacción, ventilación y aire acondicionado para hospitales y clínicas (ASHRAE, 2018), define la ventilación por flujo laminar como un sistema en el cual el aire se mueve de manera uniforme y sin turbulencias, manteniendo la condición de la sala crítica con un rango de temperaturas de 20°C a 24°C y una humedad relativa de 50% creando una corriente de aire suave, paralela al plano de

trabajo. Un flujo unidireccional del aire donde se desplaza en una dirección específica, ya sea de forma vertical u horizontal, evitando la mezcla de aire contaminado con aire limpio mediante filtros de alta eficiencia, como los filtros HEPA, para eliminar partículas y microorganismos del aire suministrado. Se mantiene una presión positiva que es ligeramente superior en el área controlada en comparación del entorno circundante, con un diferencial de presión positiva de 0.01 pulgadas de agua (2.5Pa), para evitar la entrada de aire no filtrado, creando un área estéril alrededor del paciente o del proceso, donde el flujo de aire está altamente controlado y se minimiza la contaminación del entorno. Se establece una tasa de recambio de aire por hora para garantizar una constante tasa de renovación del aire de 20 ACH. El flujo laminar contribuye a la protección del personal y de los productos al reducir la contaminación del aire y mantener un entorno limpio y controlado. (Lin et al., 2021). La Figura 1 muestra el flujo de aire en la sala de operaciones, la parte (a) detalla el aire limpio, representado por flechas azules, se introduce desde el techo hacia abajo en un patrón laminar y cubre toda el área operativa. Este flujo laminar reduce la posibilidad de contaminación cruzada al empujar el aire contaminado (representado por flechas moradas) hacia el área estéril. El recuadro amarillo indica el microentorno operativo, el espacio crítico alrededor de la mesa de operaciones y el equipo quirúrgico. El equipo médico trabaja dentro del área delimitada por el recuadro rojo, correspondiente al microentorno operativo que se muestra en la vista esquemática, en la imagen b). El personal médico usa ropa quirúrgica estéril y los equipos están colocados estratégicamente para maximizar el flujo de aire limpio. La disposición del equipo y el personal en este entorno controlado es crucial para prevenir infecciones y garantizar la seguridad del paciente durante la cirugía.

**Figura 1**

*Sistema de ventilación por flujo laminar en sala de operaciones*



**Nota:** la parte “(a)” y “(b)” separa a las dos perspectivas complementarias del microentorno operativo de una sala de cirugía, con el flujo de aire controlado que se utiliza para mantener un ambiente estéril. Fuente: tomado de Sadrizadeh et al., (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102693>

### **A. Filtros de alta eficiencia HEPA para salas clínicamente limpias**

Los filtros de aire desempeñan un papel crucial en la ventilación de una sala crítica clínicamente limpia. Estos filtros son esenciales para garantizar la calidad del aire y la eliminación eficiente de partículas y contaminantes. La norma española UNE (Una Norma Española) en adopción de la norma europea (EN) menciona la aplicación de los filtros absolutos de alta eficiencia, los Filtros HEPA, los cuales son altamente eficientes para la eliminación de partículas (UNE-EN 1822-1, 2020). Se utilizan ampliamente en salas críticas clínicamente limpias debido a su capacidad para atrapar al menos el 99.97% del material particulado de 0.3 micrones de tamaño.

### **B. Lámparas de irradiación germicida ultravioleta UVGI**

Las lámparas de irradiación germicida ultravioleta (UVGI) y los filtros HEPA pueden usarse juntos para mejorar la desinfección del aire. Estos sistemas se instalan con frecuencia en unidades

de tratamiento de aire (UTA) y tienen la capacidad de limpiar bobinas y filtros al mismo tiempo. Utilizan aproximadamente 0.02 W/cfm de energía y tienen la capacidad de inactivar microorganismos en un solo paso con una tasa de inactivación del 85% o más. La irradiancia en el aire de 30 a 50  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  y la irradiancia en superficies irradiadas de hasta 2000  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  se pueden alcanzar con la instalación típica, lo que mejora la conductividad térmica y reduce la resistencia al flujo de aire en los sistemas de ventilación. (ASHRAE, 2020).

### C. Presión positiva y caudal de aire

La presión positiva en una sala de operaciones previene la entrada de aire contaminado de áreas adyacentes, asegurando un entorno estéril. Esto se consigue mediante un sistema de ventilación que suministra más aire del que se extrae, generando una presión ligeramente superior dentro de la sala. Este flujo constante de aire limpio expulsa los contaminantes, protegiendo a pacientes y personal de infecciones (Fassbinder & Abernathy, 2024).

El artículo realizado por Khanal y Kharel (2023) explica que el caudal de aire en CFM, o pies cúbicos por minuto, es una medida importante para garantizar una ventilación adecuada en las salas de operaciones. Este se calcula utilizando el volumen de la sala y la cantidad de veces que se renueva el aire por hora (ACH) se aprecia en la Ecuación 1.

$$CFM = \frac{\text{Volumen} \times ACH}{60} \quad (1)$$

Donde:

- CFM: volumen de aire que circula por minuto (pies cúbicos por minuto).
- Volumen: espacio total de la sala (pies cúbicos).
- ACH: número de renovaciones de aire por hora (renovaciones).

- 60: factor de conversión para cambiar el tiempo de horas a minuto.

### **2.2.5. Diseño asistido por computadora (CAD)**

El término CAD hace mención al software utilizado para crear, modificar y optimizar diseños. Este programa permite la creación de modelos digitales precisos en dos dimensiones y tres dimensiones, lo que facilita la visualización, la documentación técnica y la simulación de aspectos constructivos. Además de permitir iteraciones rápidas y una colaboración efectiva entre profesionales, CAD mejora la eficiencia, precisión y calidad del diseño (Wang et al., 2023).

### **2.2.6. Componentes electrónicos en diseño de control y monitoreo de corpúsculos infecciosos**

#### **A. Microcontrolador ESP32**

El ESP32, desarrollado por *Espressif Systems*, es un microcontrolador de alto rendimiento con integración wifi y *Bluetooth*, lo que lo convierte en un excelente candidato para aplicaciones IoT. Contiene un procesador *dual-core* de 32 bits a 240 MHz, 520 KB de SRAM, convertidores analógicos digital (ADCs) de 12 bits y convertidores digital analógicos (DACs) de 8 bits, múltiples pines de entradas y salidas GPIOs y soporte para interfaz periférica serial (SPI), interfaz de circuito interconectado (I2C) y transmisor receptor asíncrono universal (UART). Es ideal para proyectos que requieren una buena conectividad inalámbrica y eficiencia energética porque es compatible con Arduino y *MicroPython* (Strohmayr & Kampel, 2023).

#### **B. Sensor BME 280**

El BME280 es un sensor ambiental de alta precisión que integra la medición de temperatura, humedad y presión barométrica en un solo dispositivo. Desarrollado por *Bosch Sensortec*, este sensor es ampliamente utilizado en aplicaciones de monitoreo ambiental, estaciones meteorológicas y dispositivos IoT debido a

su alta precisión y bajo consumo de energía. El BME280 tiene un rango de temperatura de  $-40$  a  $+85^{\circ}\text{C}$  con una precisión de  $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ , un rango de humedad de  $0-100\%$  RH con una precisión de  $\pm 3\%$  RH, y un rango de presión de  $300-1100$  hPa con una precisión de  $\pm 1$  hPa (Thalman, 2024).

### **C. Sensor ML811**

El ML8511 es un sensor de luz ultravioleta (UV) que mide la intensidad de la radiación UV en el rango de  $280$  a  $390$  nm. Fabricado por Lapis Semiconductor, este sensor proporciona una salida analógica proporcional a la intensidad de la luz UV, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de monitoreo de radiación UV, protección solar y dispositivos portátiles de detección de luz UV. El ML8511 opera a un voltaje de  $3.0-3.6\text{V}$  y tiene un consumo de corriente de  $300\ \mu\text{A}$ . (Bermeo, 2024).

### **D. Sensor GP2Y1010AU0**

El GP2Y1010AU0 es un sensor de partículas óptico desarrollado por Sharp, utilizado para medir la concentración de partículas en el aire, como el polvo y el humo. Este sensor utiliza el principio de dispersión de luz para detectar partículas de tamaño  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{PM}_{10}$ , proporcionando una salida de voltaje analógico que es proporcional a la densidad de partículas. El GP2Y1010AU0 tiene un rango de medición de  $0-500\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  y un consumo de energía de  $20\ \text{mA}$ , operando a un voltaje de  $5\text{V}$ . (Muhamad, 2023).

### **E. Celda Peltier TEC1-12706**

La celda Peltier TEC1-12706, con  $127$  pares de termopares, maneja hasta  $15.4\text{V}$  y  $6\text{A}$ . Es utilizada para enfriar o calentar mediante el efecto Peltier, siendo ideal para proyectos enfocados la refrigeración de precisión, enfriadores de CPU y cualquier proyecto que requiera un control térmico preciso (Maryani et al., 2023).

### **2.2.6. Entorno de programación para microcontrolador ESP32 Thonny Ide**

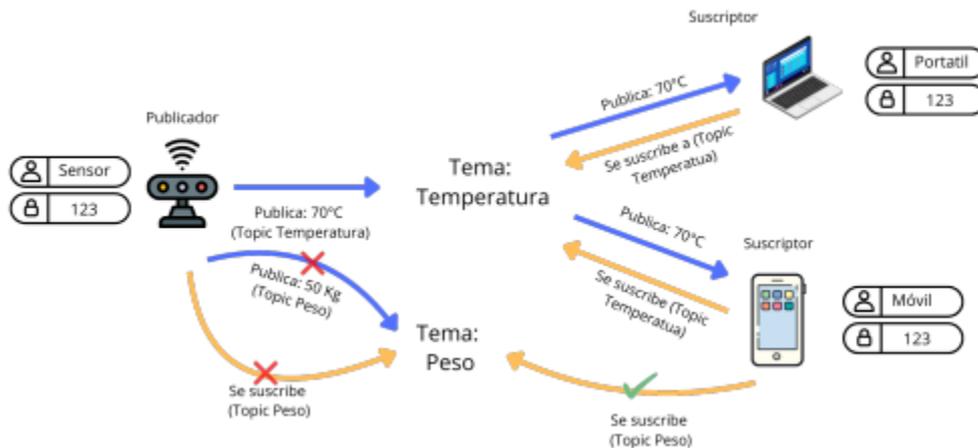
Thonny IDE es un entorno de desarrollo integrado (IDE) es un entorno de desarrollo integrado que ayuda a los principiantes y a los usuarios de microcontroladores como ESP32. Con un resaltado de variables, análisis de código en tiempo real y herramientas de depuración paso a paso, facilita la identificación de errores, tiene una interfaz fácil de entender. Además, permite la gestión de paquetes y el flujo de trabajo optimizado en entornos virtuales. Su capacidad para ejecutar scripts directamente en dispositivos embebidos y su compatibilidad con plataformas de hardware populares lo convierten en una opción sólida y accesible para ingenieros electrónicos en proyectos de IoT y educación en programación (Scozzina, et al. 2022).

### **2.2.7. Protocolo de comunicación MQTT**

MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) es un protocolo de comunicación ligero y eficiente diseñado para la transmisión de datos en redes con recursos limitados y alta latencia. Es especialmente adecuado para aplicaciones IoT debido a su bajo consumo de ancho de banda y su capacidad de funcionar en entornos inestables. MQTT utiliza un modelo de publicación/suscripción, donde los dispositivos (clientes) se suscriben a temas específicos y los datos se transmiten a través de un *broker*. Esto permite una comunicación eficiente y escalable entre múltiples dispositivos y sistemas, facilitando la interoperabilidad y la integración en redes IoT complejas (Lakshminarayana et al., 2024). La Figura 2 ilustra el principio de funcionamiento del protocolo MQTT detallando un sensor que funciona como publicador y transmite datos sobre dos temas distintos: temperatura y peso. Para recibir actualizaciones, los suscriptores, representados por un portátil y un dispositivo móvil, se suscriben a estos temas específicos, esto destaca cómo los dispositivos pueden recibir solo la información correspondiente al tema al que están suscritos, lo que optimiza el uso de recursos y la comunicación.

**Figura 2**

*Esquema de funcionamiento protocolo MQTT*



*Nota:* en este protocolo, un sensor funciona como publicador y transmite datos de temperatura (70°C) y peso (50 kg) a dos temas diferentes: "temperatura" y "peso". Solo si está suscrito al tema correspondiente, los datos se transmiten a los dispositivos suscriptores, ya sean portátiles o celulares. En este caso, tanto el portátil como el celular están suscritos al tema "temperatura", por lo que ambos reciben 70°C, mientras que solo el móvil está suscrito al tema "peso", por lo que recibe una lectura de 50 kg. En aplicaciones IoT, este mecanismo de publicación/suscripción facilita la comunicación selectiva. Fuente: obtenido de Alsaqqa (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102693>

### **2.2.8. Almacenamiento en la nube *ThingSpeak***

*ThingSpeak* es una plataforma de Internet de las cosas que permite la recolección, el almacenamiento, el análisis y la visualización de datos en la nube. Es ideal para proyectos que requieren microcontroladores como ESP32. Permite el análisis en tiempo real mediante scripts en MATLAB y permite el almacenamiento seguro de datos enviados por sensores a través de HTTP o MQTT. La plataforma ofrece herramientas de visualización personalizables para monitorear los datos y facilita la integración con otros servicios a través de API y *Webhooks*, permitiendo la automatización de tareas y la creación de aplicaciones complejas basadas en eventos específicos. (Sekhar et al., 2023).

### **2.2.9. Tecnología IoT.**

La tecnología IoT es referenciada a la interconexión de dispositivos físicos, vehículos, edificios y otros elementos integrados con

electrónica, *software*, sensores y conectividad de red. Esta tecnología permite que los dispositivos recojan y compartan datos entre sí y con sistemas centralizados, creando una red de objetos inteligentes. IoT se aplica en diversas áreas como la automatización del hogar, la industria 4.0, la salud, el transporte y las ciudades inteligentes. La clave del éxito de IoT radica en su capacidad para mejorar la eficiencia operativa, optimizar el uso de recursos y proporcionar nuevas oportunidades de negocio mediante la recolección y análisis de datos en tiempo real (Rath et al., 2024).

### 2.2.10. Ecuaciones de estadísticas descriptiva

Las ecuaciones de estadística descriptiva son herramientas matemáticas utilizadas para analizar conjuntos de datos. Robayo (2021) menciona que algunas de las ecuaciones comunes incluyen la media, mediana, moda, varianza, desviación estándar y cuartiles. Dichas ecuaciones proporcionan medidas numéricas que describen la tendencia central, dispersión y forma de distribución de los datos. Ayudan a resumir y comprender las características clave de un conjunto de observaciones. Para datos desagrupados de una muestra se aplica la Ecuación 2:

$$S = \sqrt{\left[ \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \right]} \quad (2)$$

Donde:

- S: Desviación estándar
- $x_i$ : Identificación para cada valor observado
- $\bar{x}$ : Media aritmética
- n: Es el tamaño de la muestra

## **2.3. MARCO METODOLÓGICO**

### **2.3.1. Tipo de investigación**

El presente enfoque de investigación de la tesis se centra en la aplicación tecnológica para el monitoreo y control experimental de corpúsculos infecciosos en sala de operaciones hospitalarias debido al alto nivel de contaminación de IAAS que existe.

### **2.3.2. Metodología de investigación**

El prototipo planteado servirá para la implementación en salas de operaciones del tipo multifuncional de los hospitales de tercer nivel en Lima Metropolitana. Del cual se sabe que hasta la fecha hay 13 hospitales categorizados en tercer nivel de atención a nivel de Lima Metropolitana (MINSA, 2023), por otro lado, están las redes prestacionales y otros centros especializados de salud como la red prestacional Rebagliati, Almenara, Sabogal, Instituto Nacional Cardiovascular Carlos Alberto Peschiera Carrillo y el Centro Nacional de Salud Renal (EsSalud, 2024). La elección del lugar es debido a que, durante el período comprendido entre diciembre de 2022 y febrero de 2023, la cantidad de personas empleadas en Lima Metropolitana aumentó en un 4,6%, lo que representa un incremento de 224.400 personas, alcanzando así una población ocupada de 5.102.600. (Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI, 2023) Habiendo una mayor concentración de pacientes y personal han generado una situación difícil en la que muchos pacientes no han podido acceder a los cuidados necesarios. Además, se han reportado casos de contagios masivos entre el personal de salud, lo que ha afectado su capacidad de respuesta y ha incrementado el riesgo de propagación del virus. Estos desafíos han puesto en evidencia la necesidad de medidas urgentes y una mejor coordinación para abordar la crisis sanitaria en el país.

El sistema propuesto está conformado por un microcontrolador que procesara los datos medidos de la calidad del aire interior en el entorno de una sala crítica mediante sensores de humedad,

temperatura, presión y material particulado PM 2.5 en tiempo real y almacenados a la nube de la plataforma *ThingSpeak*. Estos datos serán controlados mediante los ventiladores de inyección y extracción de aire representando a los actuadores implicados en la ventilación de flujo laminar, así como los indicadores led ultravioleta en representación a los filtros HEPA de una sala crítica, a fin de lograr los rangos de medición óptimos que el ambiente requiere, en base a las buenas prácticas y recomendaciones de los estándares internacionales.

En primera instancia se medirá la eficacia de los parámetros y el control del prototipo a escala durante un periodo de 5 días con una frecuencia de medición de 3 horas prolongadas por 3 veces día, con miras a determinar posibles errores promedios en las variables medidas para una futura implementación en entornos reales. En primera instancia se medirá la eficacia de los parámetros y el control del prototipo a escala durante un periodo de una semana con una frecuencia de medición de 3 horas prolongadas por 3 veces día, con miras a determinar posibles errores promedios en las variables medidas para una futura implementación en entornos reales. Asimismo, se registrarán los datos en la nube para analizar los resultados obtenidos de las pruebas del prototipo y se verificará si las predicciones del circuito coinciden con los estándares recomendados por la normativa internacional. Si los resultados no son satisfactorios, el circuito se ajustará y las pruebas se repetirán para mejorar su eficacia. Esto le permitirá tomar decisiones informadas sobre cómo funciona.

## **2.4. MARCO LEGAL**

### **2.4.1. Ley N° 27657 del Ministerio de Salud**

El artículo 2° de la ley del ministerio de salud, establece que el MINSA tiene la responsabilidad de liderar, regular y promover la participación del Sistema Nacional de Salud. Su objetivo principal es garantizar el desarrollo integral de las personas, a través de la promoción,

protección, recuperación y rehabilitación de la salud, así como la creación de entornos saludables. Todo esto se realiza respetando plenamente los derechos fundamentales de las personas, desde su concepción hasta su muerte natural. (Ley N° 27657, 2002).

#### **2.4.2. Ley general de salud N° 27657**

El título XV de la ley general de salud dispone que el gobierno debe apoyar la investigación científica y tecnológica en el campo de la salud para mejorar la calidad de vida de la población. Esto incluye la promoción y financiación de programas e iniciativas de investigación, la creación de un marco regulatorio ético, la capacitación continua de profesionales de la salud y el desarrollo de nuevas tecnologías médicas. Además, se destaca la importancia de difundir y aplicar los hallazgos de las investigaciones para garantizar que los avances científicos beneficien directamente a los pacientes y al sistema de salud (Ley N° 26842, 1997).

#### **2.4.3. Norma técnica en salud N° 119 – MINSA/DGIEM – V-01**

Según la Norma Técnica en Salud NTS N°119-MINSA/DGIEM-V.01 MINSA (2015), establece que el objetivo del sistema de climatización es crear un ambiente cómodo y minimizar la presencia de agentes contaminantes en un establecimiento de salud. Estos agentes pueden incluir microorganismos, bacterias, polvo, gases, desinfectantes, olores u otras sustancias. El sistema de aire acondicionado busca garantizar el bienestar de las personas al regular la temperatura, la humedad y la calidad del aire en el entorno de salud (MINSA, 2015a).

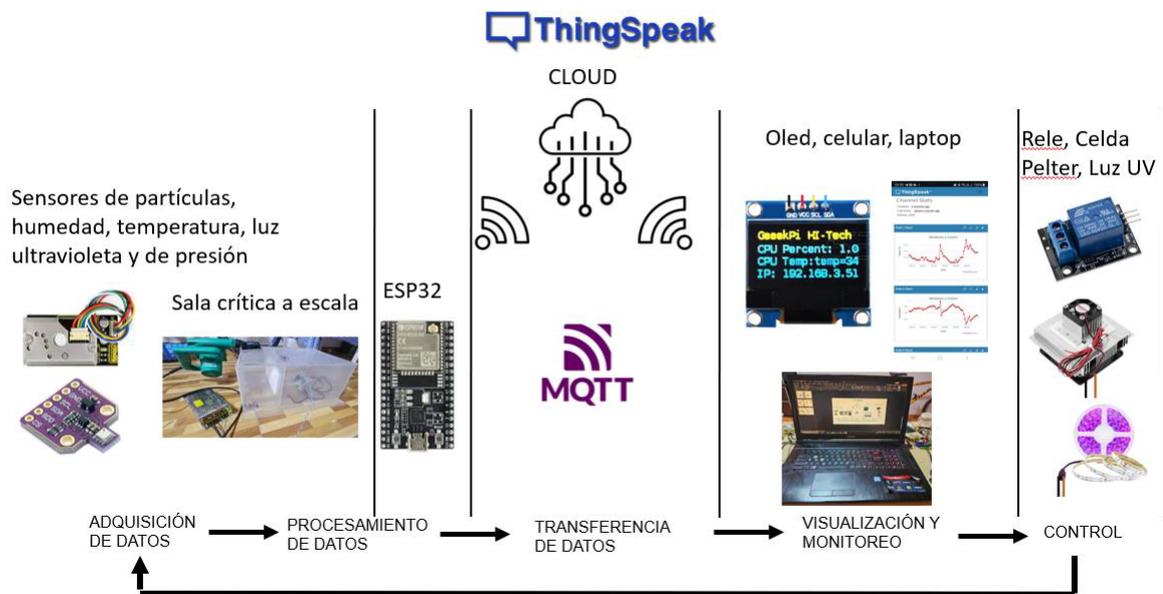
### **2.5. DIAGRAMA DE BLOQUES O ARQUITECTURA DEL SISTEMA**

La operación del prototipo electrónico muestra en la Figura 3 el monitoreo y control de corpúsculos infecciosos mediante los parámetros ambientales en tiempo real para una sala crítica utilizando la plataforma *ThingSpeak* en la nube con tecnología IoT. Los sensores de partículas, humedad, temperatura, luz ultravioleta y presión recolectan datos en tiempo real en la sala crítica. Estos datos son procesados por un microcontrolador ESP32, que luego transfiere la

información a la nube *ThingSpeak* para su almacenamiento y análisis. Desde la nube, los datos se pueden visualizar y monitorear en dispositivos como celulares, laptops y pantalla OLED. Finalmente, el sistema permite controlar inyectores, actuadores y filtros HEPA, optimizando las condiciones sépticas y ambientales en la sala crítica garantizando un entorno seguro y controlado.

**Figura 3**

*Proceso de funcionamiento del dispositivo*



**Nota:** el control automatizado se encuentra principalmente en el relé y la celda Peltier, los cuales son responsables de la regulación automática de las funciones del sistema. En contraste, la sopladora de aire opera mediante un control manual, lo que implica que su funcionamiento depende de la intervención directa del usuario en la inyección de presión. Fuente: elaboración propia.

## **CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA APLICACIÓN**

### **3.1. Analizar la situación actual de infecciones asociadas a la atención en salud e infraestructura actual para el control y monitoreo de corpúsculos infecciosos involucrados en sala de operaciones de hospitales nivel III en Lima Metropolitana.**

Debido a infecciones asociadas a la atención en salud (IAAS), se registraron numerosos contagios intrahospitalarios en el hospital de Ate durante el período crítico de la pandemia de COVID-19. La propagación de patógenos aumentó significativamente debido a la falta de infraestructura adecuada en las salas críticas, como la falta de sistemas de ventilación con filtros HEPA y el control inadecuado de la presión del aire. La situación se agravó cuando el personal y los equipos compartidos facilitaron la contaminación cruzada entre pacientes, lo que provocó un brote de bacterias en el hospital con una mortalidad alarmante del 50 al 80%. La desinfección insuficiente y el manejo inadecuado del aire en estas áreas cruciales hicieron evidente la urgencia de mejorar la infraestructura hospitalaria e implementar medidas estrictas de control de infecciones para proteger tanto a los pacientes como al personal de salud. (Congreso de la república del Perú, 2021b). La situación actual en 2024 de la asepsia en relación con la contaminación de las salas críticas en los establecimientos de salud por microorganismos patógenos no se cumple en la mayoría de los hospitales de Lima Metropolitana.

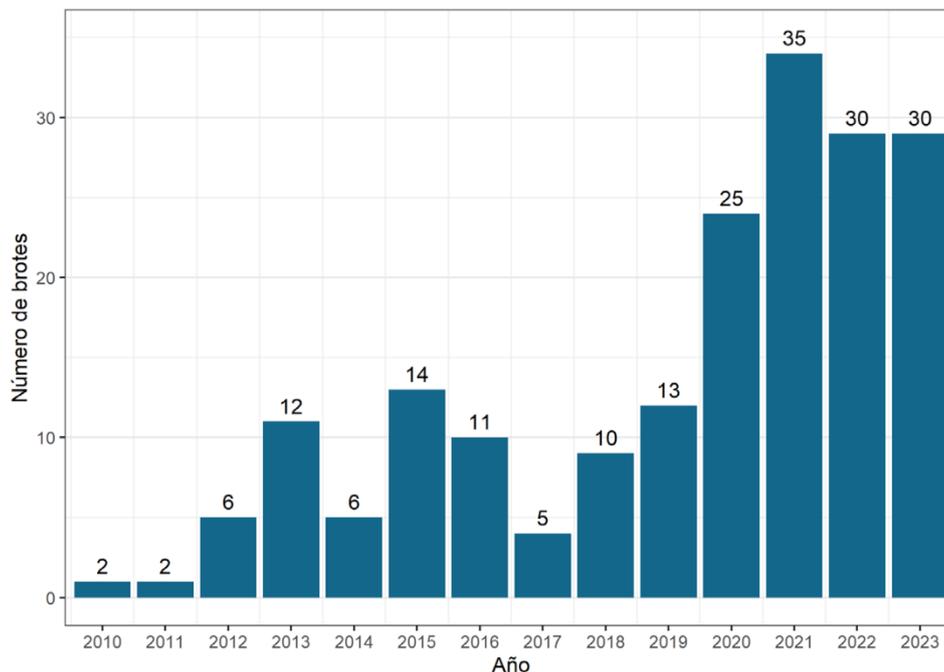
A pesar de las lecciones aprendidas durante la pandemia, muchos hospitales de tercer nivel, incluido el de Ate, aún no cumplen con las normas de prevención de infecciones asociadas a la atención en salud (IAAS). La contaminación cruzada persiste debido a la falta de infraestructura adecuada, como sistemas de ventilación con filtros HEPA y un control efectivo de la presión del aire en áreas importantes. Esto pone a pacientes y trabajadores de la salud en peligro innecesario de contraer infecciones nosocomiales. Es imperativo que los líderes de la atención médica tomen medidas inmediatas para corregir estas deficiencias y garantizar un ambiente seguro en los hospitales.

### **3.1.1. Revisión del boletín epidemiológico de Perú**

El Centro Nacional de Prevención y Control de Enfermedades (CDC-Perú) registró 120 brotes de infecciones asociadas a la atención en salud (IAAS) entre 2020 y 2023. Los brotes anuales fueron 25 en 2020, 35 en 2021, 30 en 2022 y 30 en 2023, con un aumento significativo de los brotes relacionados con los centros de diálisis. En Lima Metropolitana se registraron los brotes más numerosos (42), seguido por Cusco (13), La Libertad y Arequipa (10 cada una). La Unidad Temática de IAAS del CDC-Perú y otros organismos de salud recopilaron y analizaron esta información, que resalta la urgencia de mejorar las estrategias de prevención y control de infecciones en los centros de salud del país, la totalidad del número de afectados en 2020, 2021, 2022 y 2023 fue de 291, 187, 93 y 183, respectivamente. De los 754 pacientes afectados, el 95 % (716/754) fueron pacientes hospitalizados y el 5 % (38/754) fueron personal de salud. (MINSA, 2024a). El gráfico de la Figura 4 muestra cómo ha cambiado el número de brotes registrados desde 2010 hasta 2023. La cantidad de brotes generalmente aumenta a lo largo de los años, con algunos picos notables. Después de un inicio bastante bajo en 2010 y 2011 con solo 2 brotes por año, se puede ver un aumento significativo en 2013 con 12 brotes. Este aumento fue lento hasta alcanzar un máximo histórico de 35 brotes en 2021. Se mantiene un alto número de brotes en los dos años siguientes, 2022 y 2023, con 30 cada año.

## Figura 4

Brotos de IAAS 2010 - 2023



**Nota:** gráfico obtenido del Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades (MINSa, 2024b).

[https://www.dge.gob.pe/epipublic/uploads/boletin/boletin\\_202412\\_29\\_153641.pdf](https://www.dge.gob.pe/epipublic/uploads/boletin/boletin_202412_29_153641.pdf)

Durante los años 2020 a 2023, la tabla de la Figura 5 revela la distribución de agentes patógenos responsables de infecciones asociadas a la atención de salud por dispositivo médico. Los patógenos más comunes son *Acinetobacter baumannii* y *Klebsiella pneumoniae*, particularmente en las neumonías asociadas a ventilador mecánico e infecciones del torrente sanguíneo. Hay una variación en la frecuencia de estos patógenos a lo largo del tiempo, con un aumento notable en las infecciones por *Klebsiella pneumoniae* en 2022 y 2023. La presencia constante de hongos, como *Candida albicans* y otros, muestra la variedad de agentes patógenos presentes en las IAAS. La Figura 5 señala que en 2023 se notificaron tres brotes de IAAS causados por *Candida parapsilosis*, *Candida krusei* y *Candida glabrata*. Se ha observado una resistencia preocupante a los flagelos, como fluconazol y voriconazol, y a las equinocandinas, que no están disponibles en el petitorio nacional de hospitales. El 56% de

las IAAS fueron neumonías asociadas con ventiladores (NAV), el 34% infecciones del torrente sanguíneo y el 5% infecciones del tracto urinario entre 2020 y 2023. En 2023, el 4% de los pacientes colonizados no estaban relacionados con procedimientos o dispositivos médicos y el 0,7% de las IAAS fueron infecciones de heridas operatorias. El 60,2% de los pacientes fueron hombres y el 33,4% mujeres, con un mayor impacto en adultos mayores y adultos mayores. La tasa de mortalidad ha variado, siendo 58,1 en 2020, 25,1 en 2021, 22,5 en 2022 y 25,7 en 2023, lo que demuestra la importancia de mejorar los enfoques de prevención y tratamiento de IAAS.

**Figura 5**

*Distribución de agentes patógenos en IAAS por tipo de dispositivo médico, 2020-2023.*

Agentes patógenos	2020			2021			2022			2023		
	NAV	ITS	ITU	NAV	ITS	ITU	NAV	ITS	ITU	NAV	ITS	ITU
Acinetobacter baumannii	180 (61,9%)	54 (18,6%)	2 (0,7%)	111 (59,4%)	10 (5,3%)		13 (13,9%)		3 (3,2%)	23 (12,6%)		1 (0,5%)
Klebsiella pneumoniae	21 (7,2%)	23 (7,9%)		11 (5,9%)	9 (4,8%)	3 (1,6%)	1 (1,1%)	14 (15,1%)		15 (8,2%)	35 (19,1%)	
Pseudomonas aeruginosa	1 (0,3%)	3 (1,0%)	1 (0,3%)	18 (9,6%)			10 (10,8%)	3 (3,2%)				3 (1,6%)
Escherichia coli			2 (0,7%)	3 (1,6%)	4 (2,1%)	3 (2,8%)						
Candida albicans			2 (0,7%)				4 (4,3%)					
Staphylococcus		2 (0,7%)										
Enterobacter spp							1 (1,1%)	3 (3,2%)				
Enterobacter cloacae				2 (1,1%)				2 (2,2%)			10 (8,7%)	
Klebsiella oxytoca				1 (0,5%)								
Elizabethkingia meningoseptica				3 (1,6%)								
Enterococcus faecalis					1 (0,5%)							
Proteus mirabilis						4 (2,1%)						
Providencia regleri						2 (1,1%)						
Enterococcus faecium							2 (2,2%)	3 (5,4%)				
Burkholderia cepacia							3 (3,2%)					
Serratia marscesens							20 (21,5%)				24 (13,1%)	
Sthenotropomonas maltophilia							1 (1,1%)			1 (0,5%)	13 (7,1%)	
Candida auris							1 (1,1%)					
Achromobacter xylosoxidans											3 (1,6%)	
Sphingomonas paucimobilis											2 (1,1%)	
Candida Parapsilosis											2 (1,1%)	
Candida glabrata												2 (1,1%)
Candida Krusei											1 (0,5%)	
Providencia stuartii											1 (0,5%)	
No se detecto agente							4 (4,3%)					

**Nota:** la presencia constante de *Pseudomonas aeruginosa* en infecciones respiratorias y del

torrente sanguíneo durante los años estudiados demuestra la importancia de medidas eficaces de prevención y control para estos patógenos en ambientes hospitalarios. (MINSA, 2024c). [https://www.dge.gob.pe/epipublic/uploads/boletin/boletin\\_202412\\_29\\_153641.pdf](https://www.dge.gob.pe/epipublic/uploads/boletin/boletin_202412_29_153641.pdf)

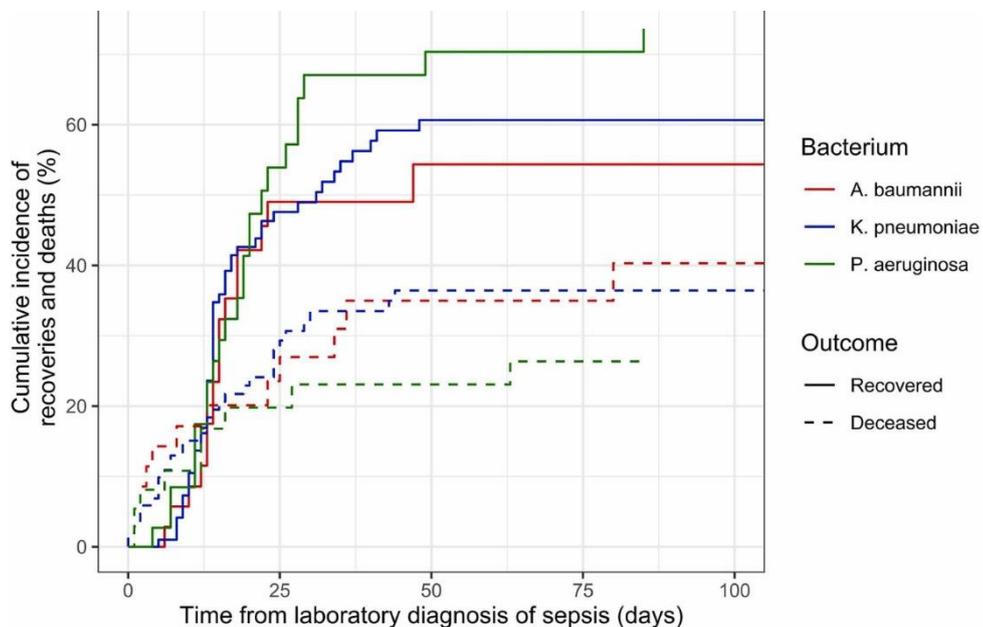
### 3.1.2. Tipos de agentes patógenos en IAAS

Los *Enterobacterales* resistentes a carbapenémicos (CRE), como *Klebsiella pneumoniae* (CRKP), *Pseudomonas aeruginosa* (CRPA) y *Acinetobacter baumannii* (CRAB), son los agentes patógenos más comunes involucrados en infecciones asociadas con la atención sanitaria. Estos patógenos pueden infectar a varios pacientes al mismo tiempo, lo que presenta problemas importantes para el control de infecciones y el tratamiento médico. Según los estudios, la coinfección con varios patógenos resistentes a carbapenémicos aumenta las estancias hospitalarias, las tasas de mortalidad y la gravedad de la enfermedad. Esto complica la situación clínica y el pronóstico de los pacientes afectados. Estos patógenos se propagan principalmente a través del aire, lo que los convierte en desafíos significativos para la salud pública. Debido a su resistencia a múltiples antibióticos y su capacidad para sobrevivir en ambientes hospitalarios, son los principales causantes de infecciones asociadas a la atención en salud (IAAS) en salas de operaciones. Los pacientes inmunocomprometidos pueden experimentar neumonía, infecciones urinarias, septicemia y heridas causadas por *Acinetobacter baumannii* (Sophonsri et al., 2023). Como se aprecia en la Figura 6, las infecciones graves como neumonía, infecciones urinarias, sanguíneas y heridas son causadas por *Klebsiella pneumoniae*, que puede desarrollar resistencia y producir *carbapenemasa*. *Pseudomonas aeruginosa* causa infecciones respiratorias, urinarias, de piel, tejidos blandos y septicemia, siendo particularmente peligrosa para pacientes con sistemas inmunológicos debilitados debido a su adaptabilidad y resistencia. El cuadro de la Figura 6 resalta la incidencia acumulada de recuperaciones y muertes en pacientes con sepsis está representada por las bacterias causantes: *Acinetobacter baumannii* (rojo), *Klebsiella pneumoniae* (azul) y *Pseudomonas*

*aeruginosa* (verde). Las líneas continuas indican recuperaciones, mientras que las líneas discontinuas indican fallecimiento. Las tasas de recuperación de *P. aeruginosa* son superiores, las de *K. pneumoniae* son intermedias y las de *A. baumannii* son las más mortales. No hubo variaciones significativas en las tasas de recuperación (53-57%) y mortalidad (30,4%) durante la pandemia de COVID-19, lo que demuestra la importancia de estrategias específicas según la bacteria para mejorar los resultados en sepsis.

**Figura 6**

*Análisis de la incidencia acumulada de recuperaciones y muertes por sepsis según bacteria infectante.*



**Nota:** el gráfico muestra la incidencia acumulada de recuperaciones y muertes (porcentaje de recuperados y fallecidos) en función del tiempo desde el diagnóstico de sepsis en el laboratorio (basado en días) cuadro extraído de (Garlasco et al., 2023). <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2023.02.007>

**A. *Acinetobacter baumannii*:** es una bacteria gramnegativa que puede sobrevivir en ambientes hospitalarios durante largos períodos de tiempo. Es conocida por su resistencia a múltiples antibióticos y puede causar infecciones graves, especialmente en pacientes debilitados o inmunocomprometidos. Las infecciones

por *Acinetobacter baumannii* incluyen neumonía, infecciones del tracto urinario, infecciones de heridas y septicemia. (Abed A. et al., 2023).

**B. *Klebsiella pneumoniae*:** es otra bacteria gramnegativa que se encuentra comúnmente en el ambiente hospitalario. Es conocida por su capacidad de adquirir resistencia a los antibióticos y puede causar infecciones graves en diferentes partes del cuerpo, como neumonía, infecciones del tracto urinario, infecciones sanguíneas y de heridas. También puede producir una enzima llamada *carbapenemasa*, que confiere resistencia a los antibióticos de último recurso (Sousa M. Et al., 2022).

**C. *Pseudomonas aeruginosa*:** esta bacteria gramnegativa se encuentra ampliamente en el medio ambiente y puede colonizar diversos sitios del cuerpo humano. Es conocida por su capacidad de adaptación y resistencia a múltiples fármacos, lo que dificulta su tratamiento, puede causar infecciones respiratorias, del tracto urinario, de la piel y tejidos blandos, así como infecciones del torrente sanguíneo. Es especialmente preocupante en pacientes con sistemas inmunológicos comprometidos (Tuon F. et al., 2023).

### **3.1.3. Investigar sobre las buenas prácticas, lineamientos y protocolos para la implementación de una sala clínicamente limpia hospitalaria**

La norma técnica en salud enfocada en la infraestructura y equipamiento de los establecimientos de salud de tercer nivel atención hace hincapié a los parámetros de diseño y construcción en salas críticas considerando las recomendaciones internacionales principalmente de las normas ISO 14644 y ASHRAE 170, es fundamental implementar una serie de mejores prácticas. En primer lugar, mantener un sistema de ventilación eficiente y de alta calidad es esencial. Esto implica la utilización de filtros HEPA (Filtros de Partículas de Aire de Alta Eficiencia) para capturar partículas infecciosas y controlar la calidad del aire interior. Además, se debe

monitorear constantemente la concentración de partículas en el aire y mantener una presión negativa en la sala para evitar la fuga de partículas hacia áreas no críticas. La Tabla 1 infiere que, para garantizar una ventilación eficaz, la sala de operaciones debe mantener quince renovaciones de aire por hora con un caudal mínimo de 850 a 1200 CFM. Para evitar la proliferación de microorganismos, la temperatura debe estar entre 20 y 25 °C y la humedad relativa debe ser de al menos 45%. La implementación de filtros HEPA con una eficiencia del 99.97%, junto con filtros de bolsa al 60% y prefiltros al 30%, es de vital importancia para mantener un ambiente estéril y seguro.

**Tabla 1**

*Parámetros ambientales en establecimientos de salud del tercer nivel de atención*

<b>Ambiente</b>	<b>Renovaciones por hora (cantidad)</b>	<b>Caudal mínimo (CFM)</b>	<b>Temperatura del ambiente (°C)</b>	<b>Humedad relativa dentro del ambiente (%)</b>
Sala de operaciones (con filtros HEPA 99.97%, bolsa 60% y pre-filtro 30%)	15	850 a 1200	20-25	45 a más
Sala de parto	15	800	24-25	45-60
Salas de cuidados intensivos e intermedios	12	750	18-25	40-60

**Nota:** parámetros considerados para el cálculo de aire acondicionado y ventilación mecánica  
Fuente: (MINSA, 2015b).

<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1817584/Norma%20T%C3%A9cnica%20de%20Salud%20N%C2%B0%20119-MINSA-DGIEM-V.01.pdf>

La Figura 7 especifica los requisitos de área mínima para diversos tipos de intervenciones quirúrgicas en hospitales de tercer nivel de atención. Además, también indica el código de ambiente y el tipo de sala de operaciones necesarios. Por ejemplo, las salas de

operaciones para cirugía general, multifuncional o de emergencia requieren un área mínima de 36 m<sup>2</sup>, de las cuales son consideradas para el diseño del prototipo en la presente investigación.

**Figura 7**

*Requisitos de mínimos de las áreas críticas para intervenciones quirúrgicas en establecimientos de salud de tercer nivel de atención.*

AMBIENTES PRESTACIONALES			
PRESTACIONES DE LA CARTERA DE SERVICIOS DE SALUD	CÓDIGO DE AMBIENTE	AMBIENTE	ÁREA MÍNIMA (m <sup>2</sup> )
Intervenciones quirúrgicas por médico especialista en cirugía general	CQX1a	Sala de Operaciones de Cirugía General	36
Intervenciones quirúrgicas por médico especialista en ginecología y obstetricia	CQX1b	Sala de Operaciones de Ginecología (1)	36
Intervenciones quirúrgicas por médico especialista en otorrinolaringología	CQX1e	Sala de Operaciones de Otorrinolaringología	36
Intervenciones quirúrgicas por médico especialista en traumatología y ortopedia	CQX1f	Sala de Operaciones de Traumatología	42
Intervenciones quirúrgicas por médico especialista en urología	CQX1g	Sala de Operaciones de Urología	36
Intervenciones quirúrgicas por médico especialista en cirugía torácica y cardiovascular	CQX1h	Sala de Operaciones de Cirugía de Tórax y Cardiovascular	80
Intervenciones quirúrgicas por médico especialista en cirugía plástica	CQX1i	Sala de Operaciones de Cirugía Plástica	36
Intervenciones quirúrgicas por médico especialista en cirugía de cabeza y cuello	CQX1j	Sala de Operaciones de Cirugía de Cabeza y Cuello	36
Intervenciones quirúrgicas por médico especialista en neurocirugía	CQX1k	Sala de Operaciones de Neurocirugía	80
Intervenciones quirúrgicas por médico especialista en cirugía pediátrica	CQX1l	Sala de Operaciones de Cirugía Pediátrica	36
Intervenciones quirúrgicas por médico especialista en cirugía oncológica	CQX1m	Sala de Operaciones de Cirugía Oncológica	36
Intervenciones quirúrgicas por médicos de diversas especialidades	CQX2a	Sala de Operaciones Multifuncional (2)	36
	CQX2b	Sala de Operaciones de Emergencia	36
	CQX2c	Sala de Operaciones Híbridas (3)	70
Atención en Sala de Recuperación Post Anestésica	CQX3	Sala de Recuperación Post Anestésica (4)	40

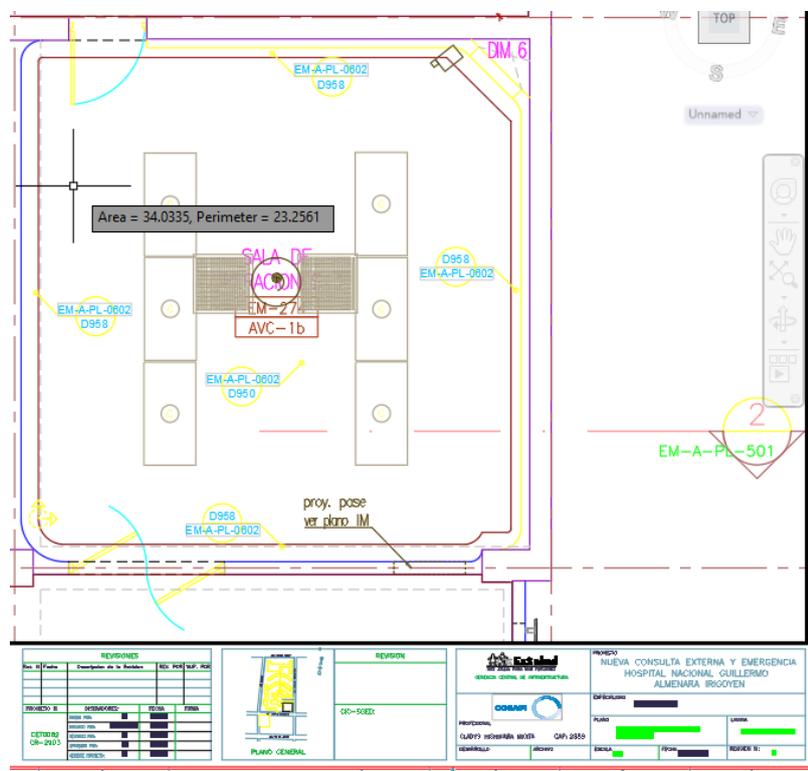
**Nota:** información obtenida de la Norma Técnica en Salud N° 119 (MINSA, 2015c). <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1817584/Norma%20T%C3%A9cnica%20de%20Salud%20N%C2%B0%20119-MINSA-DGIEM-V.01.pdf>

Se sabe que varios hospitales públicos de tercer nivel de atención en Lima con más de 100 años de antigüedad todavía funcionan con el

mismo diseño desfasado en su infraestructura hospitalaria, tal es el caso del Hospital 2 de Mayo (1875), el Hospital Loayza (1549), entre otros. (Leandro, 2022b). Hasta el año 2024 dichos hospitales siguen en funcionamiento con el mismo diseño desfasado como los requisitos mínimos de área para alguna de sus salas de operaciones, ventilación por flujo laminar, no hay filtros HEPA tal y como recomiendan estándares internacionales como la ISO 14644, ASHRAE 170 y la misma norma técnica en salud N° 119 del MINSA. Una clara evidencia es reflejada en la resolución ministerial del 19 de julio del 2024 del MINSA donde especifica que como segunda causa del problema identificado es la falta de mantenimiento a la infraestructura y equipamiento de los centros quirúrgicos de los establecimientos de salud. (MINSA, 2024c). La figura 8 presenta una visión detallada del plano en formato CAD de la sala de operaciones número 3 del Hospital Almenara.

**Figura 8**

*Plano de la sala de operaciones 3 Hospital Nacional Guillermo Almenara Irigoyen.*



**Nota:** el plano muestra que la sala de operaciones número 3 ubicada en el segundo nivel del Hospital Nacional Guillermo Almenara Irigoyen tiene un área de 34 m<sup>2</sup> al igual que las otras salas no cumplen con los requisitos de área mínimos de diseño y otros que la norma técnica en salud

119 del MINSA exige. Fuente obtenido del proyecto nueva consulta externa y emergencia Hospital Nacional Guillermo Almenara Irigoyen (COSAPI, 2011). <https://www.cosapi.com.pe/Site/Index.aspx?aID=61>

### **3.2. Diseñar el dispositivo electrónico para el monitoreo y control de corpúsculos infecciosos en sala de operaciones de hospitales nivel III de Lima Metropolitana.**

#### **3.2.1. Necesidades funcionales para el diseño del prototipo**

Como etapa preliminar para el diseño del prototipo es importante saber que en base al reporte climatológico del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) de la ciudad de Lima, la altura promedio oscila en 154 m.s.n.m. Las temperaturas y la humedad varían considerablemente a lo largo del año. En verano (de diciembre a marzo), las temperaturas máximas van de 25°C a 27°C, con temperaturas mínimas de 19°C a 21°C y una humedad relativa del 80%. Durante el otoño (de abril a junio), las temperaturas disminuyen ligeramente, con máximas de 21°C a 24°C y mínimas de 16°C a 19°C, pero la humedad permanece constante. Las temperaturas máximas en invierno (de julio a septiembre) oscilan entre 17°C y 20°C, y las mínimas entre 14°C y 16°C, con una humedad del 100% al cierre del mes de julio de 2024. En la primavera (de octubre a noviembre), las temperaturas comienzan a subir nuevamente, alcanzando temperaturas máximas de 20°C a 23°C y mínimas de 16°C a 18°C. La humedad disminuye ligeramente, pero sigue siendo aproximadamente del 80% (SENHAMI, 2024).

En la concepción de un dispositivo electrónico destinado al control y monitoreo de corpúsculos infecciosos, es esencial establecer parámetros rigurosos para los requisitos mínimos, considerando factores críticos basados en los estándares y normas internacionales que fueron estudiadas y mencionadas en los anteriores capítulos. La temperatura operativa debe situarse en un rango óptimo, generalmente entre 20-25°C, para garantizar un entorno propicio y estable. La humedad relativa, idealmente mantenida entre el 40-60%, contribuye a la prevención de la proliferación de microorganismos. Los

cambios de aire por hora deben cumplir con estándares específicos, usualmente superando las 15 a 25 renovaciones, asegurando así una calidad de aire adecuada. La presencia de partículas antisépticas, como aerosoles desinfectantes, debe ser monitoreada y ajustada según protocolos sanitarios, promoviendo un ambiente hospitalario seguro y libre de contaminantes. Las normas de referencia para salas críticas en ambientes hospitalarios y los parámetros ambientales mínimos se muestran en la Tabla 2. Con referencia a las normas ISO 14644-1 y ASHRAE 170, se describen las condiciones de temperatura, que deben mantenerse entre 20-25°C (68-77°F). Siguiendo las mismas regulaciones, la humedad relativa debe estar entre el treinta y el sesenta por ciento. Según ASHRAE 170, los cambios de aire por hora (ACH) requeridos oscilan entre 15 y 25. Además, el tipo de sala determina el control de partículas infecciosas, que está regulado por ISO 14644-1 y ASHRAE 170.

**Tabla 2**

*Requisitos mínimos de parámetros ambientales y normativas de referencia para salas críticas*

<b>Parámetro</b>	<b>Requisito mínimo</b>	<b>Normativa/Estándar de referencia</b>
Temperatura	20-25°C (68-77°F)	ISO 14644-1, ASHRAE 170
Humedad relativa	20-60%	ISO 14644-1, ASHRAE 170
Cambios de Aire por Hora (ACH)	20-25 ACH	ASHRAE 170
Partículas Infecciosas	Control riguroso; depende del tipo de sala*	ISO 14644-1, ASHRAE 170

**Nota:** esta tabla contiene los requisitos mínimos de control de partículas infecciosas, temperatura, humedad relativa, cambios de aire por hora (ACH) y estándares de referencia correspondientes, como ISO 14644-1 y ASHRAE 170. Fuente: elaboración propia.

\* La serie ISO 14644 cubre la limpieza y control de ambientes divididos en 12 clases según el nivel de limpieza requerido en el diseño.

La Figura 9 detalla la clasificación de salas blancas según la norma ISO 14644, especificando el valor máximo de partículas por metro cúbico de aire en diferentes tamaños de micras (0.1 µm, 0.2 µm, 0.3

$\mu\text{m}$ ,  $0.5 \mu\text{m}$ ,  $1 \mu\text{m}$  y  $5 \mu\text{m}$ ). Las diferentes clases ISO, que van de 1 a 9, indican niveles de limpieza y control de partículas, esenciales para ambientes críticos en industrias como la farmacéutica, sala de operaciones, salas de cuidado intensivo, donde la pureza del aire es vital.

**Figura 9**

Clasificación de salas críticas ISO 14644



**CLASIFICACIÓN DE SALAS BLANCAS  
ISO 14644**

Valor máximo de partículas por metro cúbico de aire, en micras

Nº clasificación ISO	0,1 $\mu\text{m}$	0,2 $\mu\text{m}$	0,3 $\mu\text{m}$	0,5 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$
Clase ISO 1	10	2	-	-	-	-
Clase ISO 2	100	24	10	4	-	-
Clase ISO 3	1.000	237	102	35	8	-
Clase ISO 4	10.000	2.370	1.020	352	83	-
Clase ISO 5	100.000	23.700	10.200	3.520	832	29
Clase ISO 6	1.000.000	237.000	102.000	35.200	8.320	293
Clase ISO 7	-	-	-	352.000	83.200	2.930
Clase ISO 8	-	-	-	3.520.000	832.000	29.300
Clase ISO 9	-	-	-	35.200.000	8.320.000	293.000

**Nota:** las salas de operaciones están clasificadas dentro de clase ISO 6. Fuente: imagen obtenida de (SteEngipharm, 2021). <https://www.steengipharm.com/que-es-sala-limpia-iso-14644/>

Para la consideración del parámetro de partículas por metro cubico en el diseño y construcción del prototipo es importante seleccionar el rango de clasificación ISO 5 a ISO 6, el cual es recomendado en diseño de quirófanos. En ese sentido, se prototipó en material acrílico transparente de 4mm una sala de operaciones del tipo multifuncional, emergencias o de cirugía general considerando un área de  $42 \text{ m}^2$  el cual se diseñó a una escala de 1/20 con las medidas detalladas en la Tabla 3 que hacen un área de  $0.1024 \text{ m}^2$  y un volumen de  $0.019747 \text{ m}^3$ .

**Tabla 3**

*Medidas del prototipo*

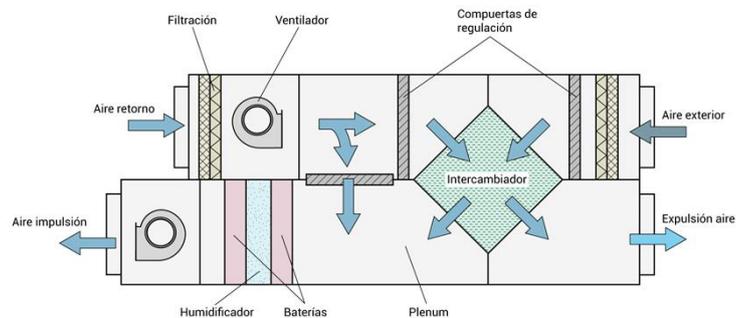
Medida	Valor
Ancho	32 cm
Largo	33 cm
Alto	18.5 cm
Espesor	4 mm

**Nota:** las medidas que se detalla en la Tabla 3 solo es el espacio del ambiente que es requerido presurizar en representación a una sala de operaciones. Fuente: elaboración propia.

La unidad de tratamiento de aire o manejadora de aire que se muestra en la Figura 10 funciona mediante la combinación de aire exterior y aire de retorno; dicho aire es filtrado mediante un filtro HEPA para eliminar los contaminantes antes de que un ventilador lo impulse. Las compuertas de regulación controlan el flujo de aire mediante un intercambiador de calor que recupera energía térmica para aumentar la eficiencia. El aire acondicionado se distribuye uniformemente a través del *plenum* después de ser humedecido y ajustado térmicamente en las baterías de enfriamiento o calefacción. Por último, el sistema expulsa el aire al exterior para garantizar la renovación continua del aire interior y mantener un ambiente saludable y confortable.

**Figura 10**

*Unidad de tratamiento de aire*



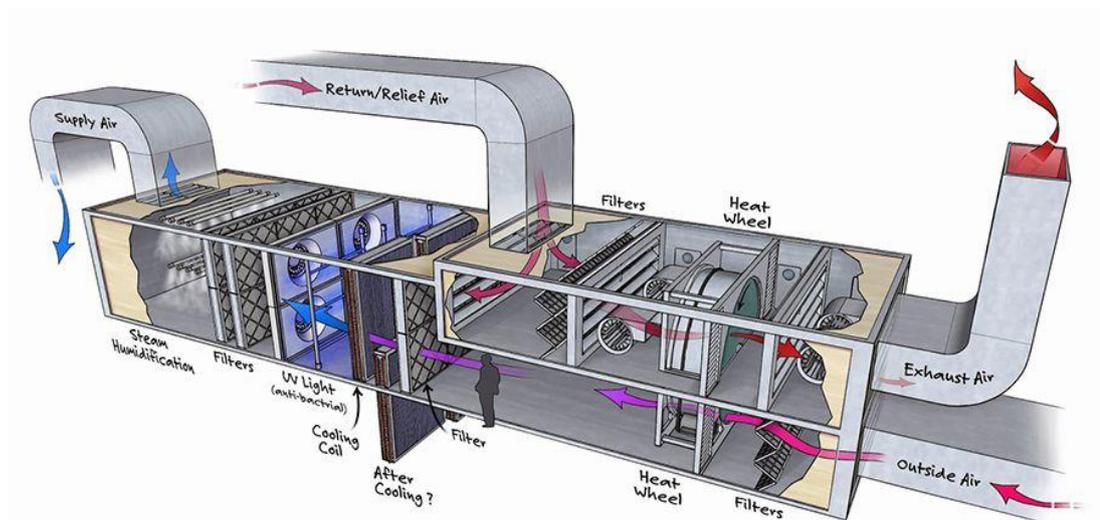
**Nota:** el *plenum* se refiere al espacio vacío donde se distribuye el flujo de aire (Artécnics, 2021).

<https://www.airtecnics.com/es/noticias/que-es-una-unidad-de-tratamiento-de-aire-uta>

Para destacar, el sistema de manejo de aire utiliza prefiltros con el objetivo de capturar partículas grandes, seguido de filtros HEPA para eliminar micropartículas, complementados con luz germicida UV que desactiva microorganismos residuales, ilustrado en la Figura 11. Garantizando un aire altamente purificado y libre de corpúsculos infecciosos en ambientes críticos.

**Figura 11**

*Proceso de filtrado en la unidad de tratamiento de aire*



**Nota:** la combinación de filtración mecánica y desinfección UV es crucial para neutralizar la proliferación de corpúsculos infecciosos en salas críticas. (Energet, 2019). <https://enertec.es/sabes-lo-que-son-las-unidades-de-tratamiento-de-aire-utas/>

### **3.2.2. Cálculo para la climatización, control de parámetros requeridos y condiciones de aire para el prototipado de la sala de operaciones.**

En primer lugar, es necesario calcular el caudal de aire para el diseño y desarrollo del prototipo haciendo uso de la fórmula detallada en el marco teórico del capítulo II y dar inicio con la adquisición de datos que figuran en la Tabla 3 y una tabla de corrección de altura ilustrada en la Figura 12, esta tabla proporciona factores de corrección para ajustar el caudal de aire de equipos de ventilación en función de la altitud sobre el nivel del mar y la temperatura ambiente. Estos factores permiten recalcular el caudal efectivo cuando un equipo, especificado

a nivel del mar y a una temperatura estándar, es instalado en altitudes mayores o en condiciones de temperatura diferentes, asegurando así su rendimiento óptimo. Por ejemplo, un equipo con un caudal nominal de 1950 m<sup>3</sup>/h a 24°C, instalado a 1250 m de altura, tendría un caudal efectivo de 1695 m<sup>3</sup>/h tras aplicar el factor de corrección correspondiente.

**Figura 12**

*Tabla de corrección de altura*

Temperatura		Altura sobre el Nivel del Mar												
		0 m	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
°C	°F	0 pies	820	1640	2470	3280	4100	4920	5740	6560	7380	8200	9020	9840
0 a 20	32 a 69	0.93	0.95	0.98	1.01	1.04	1.08	1.10	1.14	1.16	1.20	1.23	1.29	1.32
21 a 29	70 a 85	1.00	1.03	1.05	1.09	1.12	1.15	1.19	1.22	1.27	1.29	1.33	1.39	1.41
30 a 39	86 a 103	1.03	1.06	1.08	1.12	1.16	1.18	1.23	1.26	1.30	1.33	1.37	1.43	1.45
40 a 49	104 a 121	1.06	1.10	1.12	1.16	1.20	1.22	1.27	1.30	1.35	1.37	1.42	1.48	1.50
50 a 74	122 a 166	1.10	1.12	1.16	1.19	1.23	1.27	1.30	1.33	1.39	1.42	1.47	1.53	1.56
75 a 99	167 a 211	1.18	1.22	1.25	1.28	1.33	1.37	1.41	1.45	1.49	1.53	1.59	1.64	1.67
100 a 124	212 a 256	1.27	1.30	1.33	1.39	1.43	1.47	1.52	1.54	1.59	1.64	1.69	1.76	1.79
125 a 149	257 a 301	1.35	1.39	1.43	1.47	1.52	1.56	1.61	1.67	1.69	1.75	1.82	1.88	1.92
150 a 174	302 a 346	1.43	1.47	1.52	1.56	1.61	1.67	1.69	1.75	1.82	1.86	1.92	2.00	2.04
175 a 200	347 a 390	1.52	1.56	1.61	1.67	1.69	1.75	1.82	1.85	1.92	1.97	2.04	2.12	2.17

**Nota:** en Lima, el factor de corrección de altura está en el rango de 1 a 1.03. (Ventpol, s.f.).  
<https://www.ventdepot.com/mexico/temasdeinteres/tablasyescalas/faccorportemalt/index.html>

Con la información de la tabla de corrección de altura, se procede a la recolección de datos del proyecto, considerando una altura de 140 msnm, ya que las pruebas experimentales son desarrolladas en el distrito de Comas. Asimismo, se aplicaron cálculos de conversión a pies cúbicos (ft<sup>3</sup>), grados Fahrenheit (°F) y pies requeridos en las operaciones del caudal de aire, desarrollados en Excel, como se ilustra en la Figura 13.

**Figura 13**

*Adquisición de datos*

Datos del Proyecto				
Volumen de la sala	0.019	m3	0.68	ft3
Area	0.102	m2		
Temperatura	19.00	°C	66.20	°F
Altitud	140.00	msnm	459.32	pies
Factor correccion de Altura (ver hoja)	1.00			

**Nota:** el factor de corrección de altura se tomó el valor de 1 en consideración a la altitud y temperatura del distrito de Comas. Fuente: elaboración propia.

La Figura 14 proporciona una descripción detallada del cálculo total de área abierta para la extracción de aire necesaria en la ventilación, manteniendo la presión positiva en la sala con una rejilla de extracción de 0.014 m<sup>2</sup>.

**Figura 14**

*Cálculo de la rejilla de extracción de aire*

Cantidad de Puertas Sala	1.00	area de la rejilla					
Ancho	120.00	mm	0.12	m	4.72	in	(% Apertura de puertas)
Altura	120.00	mm	0.12	m	4.72	in	
Area total de las Puertas	0.01	m <sup>2</sup>	0.16	ft <sup>2</sup>			2.0% Lona
Porcentaje de area Abierta de las puertas	100%	Puertas Batientes					1.00% Batientes
Area Abierta puerta Cerradas	0.014	m <sup>2</sup>	0.155	ft <sup>2</sup>			4.00% Corredizas
Area Abierta Total puertas cerradas	0.014	m <sup>2</sup>	0.155	ft <sup>2</sup>			

**Nota:** el porcentaje de área abierta de las puertas está considerado dentro del cálculo de la rejilla de extracción. Fuente: elaboración propia.

Una vez obtenidos los datos del proyecto, se calcula el caudal de inyección de aire por la presión interior de la sala, considerando una presión ideal al interior de la sala de 13 pascales, dando como resultado un caudal final de 92.47 cfm (pies cúbicos por minuto). Paralelamente, se realizó un segundo cálculo tomando en cuenta la recomendación de la normativa ASHRAE 170, que sugiere un mínimo de 20 renovaciones de aire por hora (ACH) en salas críticas como quirófanos. Este cálculo dio como resultado un caudal de 0.23 CFM, lo cual es significativamente inferior al caudal obtenido basado en la presión interior. El análisis revela que el caudal obtenido considerando la presión interior de la sala supera ampliamente las recomendaciones mínimas establecidas por ASHRAE 170 en relación con las renovaciones por hora. Este exceso de caudal asegura no solo el cumplimiento de las normativas, sino también un margen adicional que contribuye a mantener un ambiente altamente controlado, reduciendo de manera efectiva la probabilidad de contaminación de corpúsculos infecciosos. La comparación detallada de estos resultados se presenta en la Figura 15.

**Figura 15**

*Cálculo del caudal de aire*

<b>Cálculo Por Presión interior de la sala</b>				
Máximo	0.16	inH2O	40.00	Pa
presión ideal al interior de la sala	0.05	inH2O	13.00	Pa
Area abierta (rejilla de extracción)	0.014	m2	0.16	ft2
Caudal	92.47	cfm	251.41	m3/h
Caudal corregido por altura	92.47	acfm	251.41	am3/h

<b>Calculo en renovaciones Hora</b>				
Renovaciones por hora	20.00	r/h	0.33	r/m
Caudal	0.23	cfm	0.38	m3/h
Caudal Corregido por Altura	0.23	acfm	0.38	Am3/h

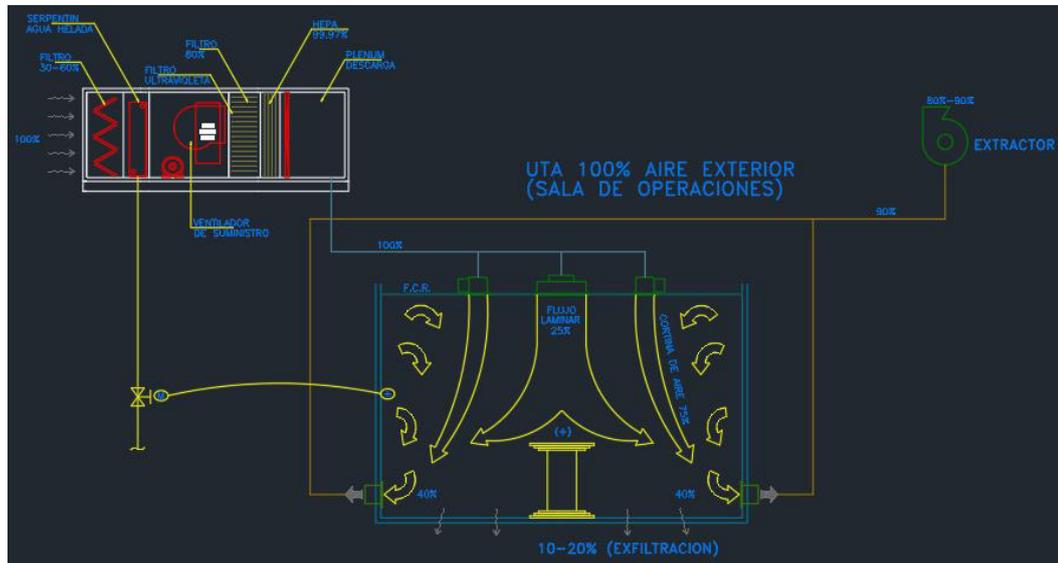
**Nota:** el caudal y el caudal corregido por altura es el mismo debido a que el factor de corrección de altura es la unidad. Fuente: elaboración propia.

### **3.2.3. Diseño del prototipo**

En la Figura 16 se visualiza el diseño de un sistema HVAC para una sala de operaciones utilizando un suministro de aire exterior al 100%. El aire pasa primero por un serpentín de agua helada para su enfriamiento, luego atraviesa una serie de filtros, incluyendo un filtro HEPA y un filtro ultravioleta, que garantizan la eliminación de partículas y microorganismos antes de entrar a la sala. El aire purificado es impulsado por un ventilador de suministro hacia la sala de operaciones, donde se distribuye mediante un sistema de flujo laminar que cubre el 25% del área central, apoyado por cortinas de aire que ocupan el 75% restante. El diseño asegura que entre el 10% y 20% del aire sea exfiltrado a través de rejillas, manteniendo la calidad del aire y la presión positiva dentro de la sala.

**Figura 16**

*Distribución del aire en el quirófano*

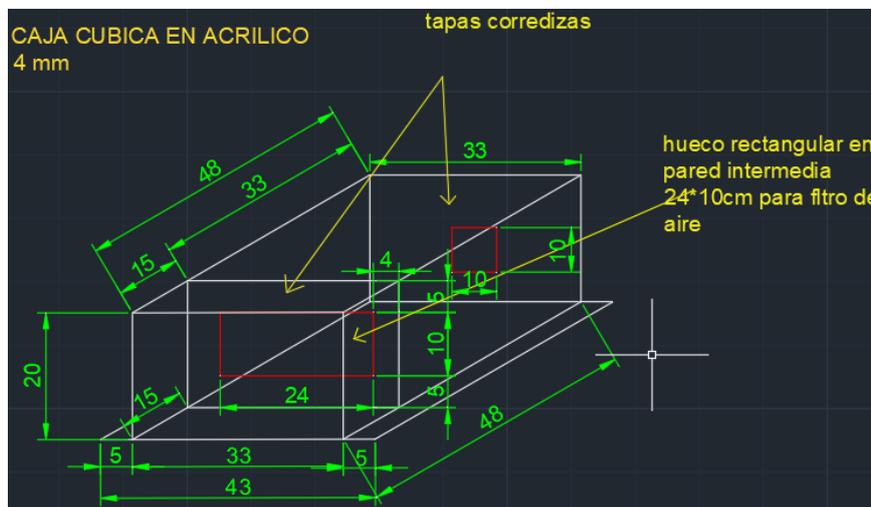


**Nota:** esquema de climatización para áreas críticas (sala de operaciones). Fuente: elaboración propia.

Después de calcular el caudal de aire basado en la presión interior de la sala, el siguiente paso es diseñar un isométrico del prototipo en formato CAD, incorporando todas las medidas previamente establecidas para el diseño de una sala crítica a escala. Este plano, que toma en cuenta los cálculos y especificaciones mencionadas anteriormente, es representado en la Figura 17.

**Figura 17**

*Diseño isométrico del prototipo*

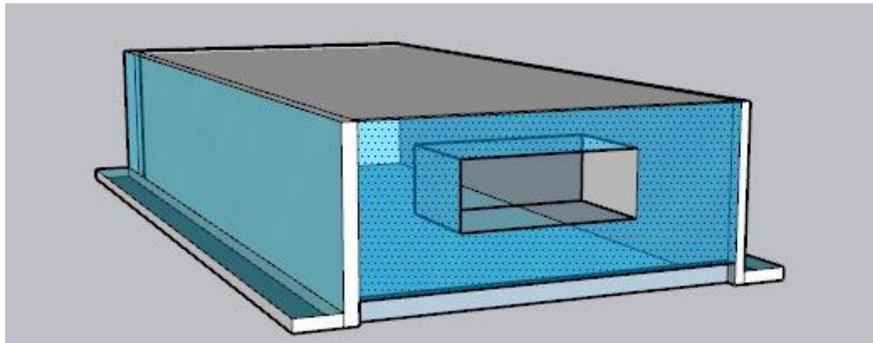


**Nota:** todas las medidas del dibujo están representadas en centímetros. Fuente: elaboración propia.

La Figura 18 proporciona un modelado tridimensional de la sala crítica creado en software SketchUp, permitiendo visualizar las dimensiones y proporciones del prototipo previos a su fabricación.

### Figura 18

*Modelado 3D del prototipo*

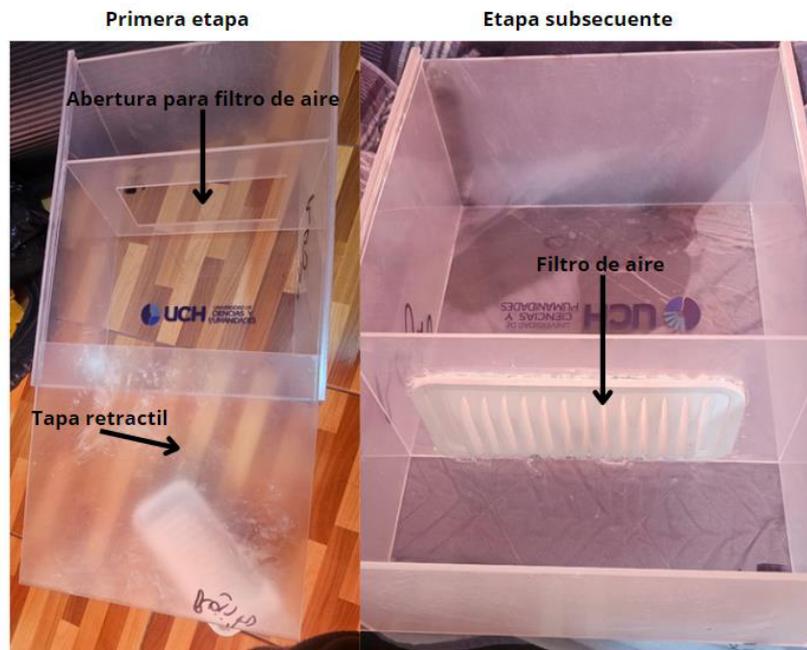


**Nota:** el espacio abierto en la pared interior central del prototipo es para integrar un filtro de aire en representación al filtro HEPA en una sala crítica Fuente: elaboración propia.

Tomando en consideración los diseños previos del proyecto, la Figura 19 exhibe el proceso constructivo del prototipo en material acrílico transparente de 4 milímetros de espesor, dividido en dos partes: un espacio menor destinado para la unidad de tratamiento de aire, y del otro lado, la sala de operaciones a escala, separadas por una pared interior. En la primera etapa de construcción, se observa en la pared interior una abertura destinada al filtro de aire, representando el filtro HEPA. En la etapa subsecuente, se aprecia el filtro de aire ya instalado.

**Figura 19**

*Proceso constructivo del prototipo*

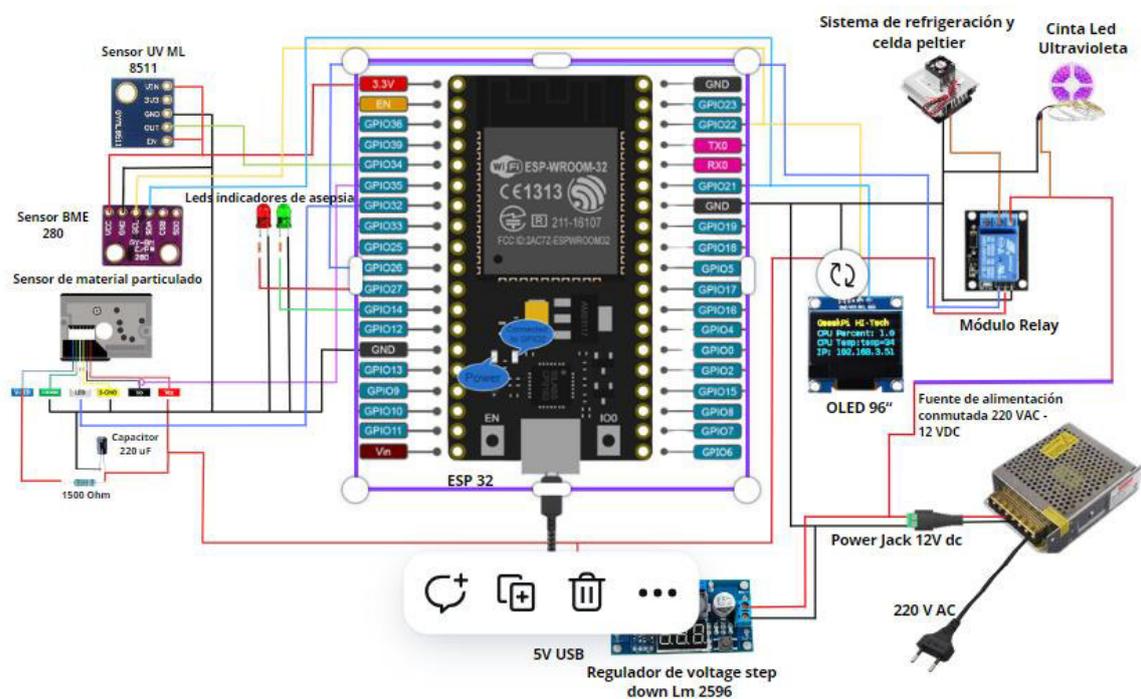


**Nota:** el espacio abierto en la pared interior central del prototipo es para integrar un filtro de aire en representación al filtro HEPA en una sala crítica Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, la Figura 20 esquematiza el circuito electrónico del prototipo basado en el microcontrolador ESP32, diseñado para el monitoreo y control de los corpúsculos infecciosos. El sistema integra múltiples sensores, como el ML8511 para medir radiación ultravioleta del filtro HEPA, el BME280 para temperatura, humedad y presión, y un sensor de material particulado para detectar contaminantes en el aire. Estos sensores envían datos al ESP32, que procesa la información y controla los actuadores a través de un módulo *relay*. Entre los actuadores se encuentran un sistema de refrigeración con celda Peltier para el control de humedad, una cinta LED ultravioleta en representación a la luz germicida en el filtro HEPA y unos leds indicadores rojo y verde, que se activan en base a la condición de asepsia del ambiente. La visualización de los datos se realiza en un display OLED de 0.96", mientras que un regulador de voltaje LM2596 convierte los 12V de la fuente de alimentación conmutada a los 5V necesarios para alimentar el ESP32 y otros componentes.

Figura 20

Diagrama del circuito electrónico



**Nota:** el espacio abierto en la pared interior central del prototipo es para integrar un filtro de aire en representación al filtro HEPA en una sala crítica. Fuente: elaboración propia

### 3.3. Seleccionar los componentes electrónicos adecuados para el diseño del dispositivo de control de corpúsculos infecciosos.

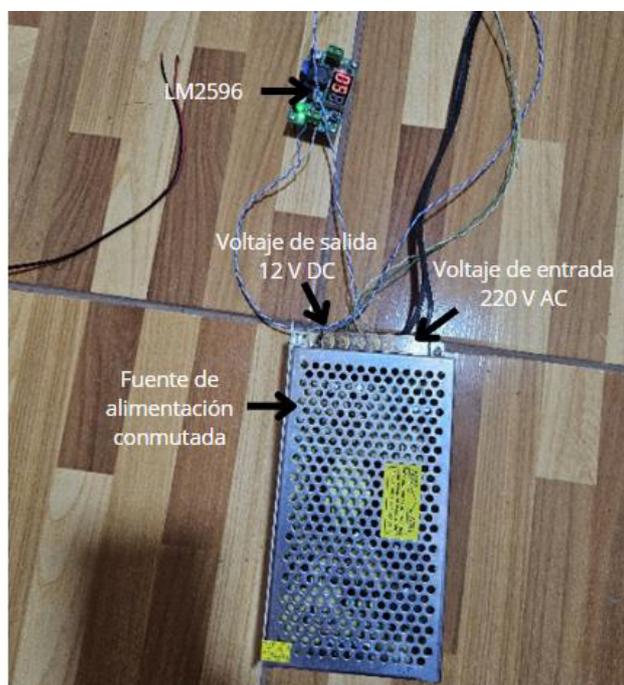
El desarrollo del prototipo está dividido en 4 etapas de operación. Estas etapas incluyen la alimentación y distribución de energía, que garantiza el suministro adecuado para cada componente hasta la etapa de control, donde el microcontrolador toma decisiones en tiempo real basadas en la información sensada. La etapa de monitoreo permite al usuario visualizar el óptimo funcionamiento del sistema. Finalmente, la etapa de sensado recopila los datos ambientales necesarios para que el sistema funcione de manera correcta. Cada una de estas etapas se explica con más detalle a continuación.

### 3.3.1. Etapa de energización

En esta primera etapa se calculó la corriente total consumida por todos los componentes electrónicos involucrados en el prototipo, obteniendo un total de 13.8 amperios. Basado en este cálculo, se seleccionó una fuente de alimentación conmutada de 220V AC a 12V DC y 20 amperios, encargada de convertir la corriente alterna de la red eléctrica en corriente continua, necesaria para el correcto funcionamiento de los componentes del circuito. Además, para alimentar y proteger el microcontrolador y los sensores, se utilizó un módulo regulador de voltaje Step-Down DC-DC LM2596 de 3 amperios, que ajusta el voltaje de salida a 5V DC. La Figura 21 muestra ambos sistemas de alimentación que garantizan una distribución de energía confiable y eficiente, protegiendo los componentes sensibles de sobrecargas o fluctuaciones de voltaje.

**Figura 21**

*Energización del circuito*



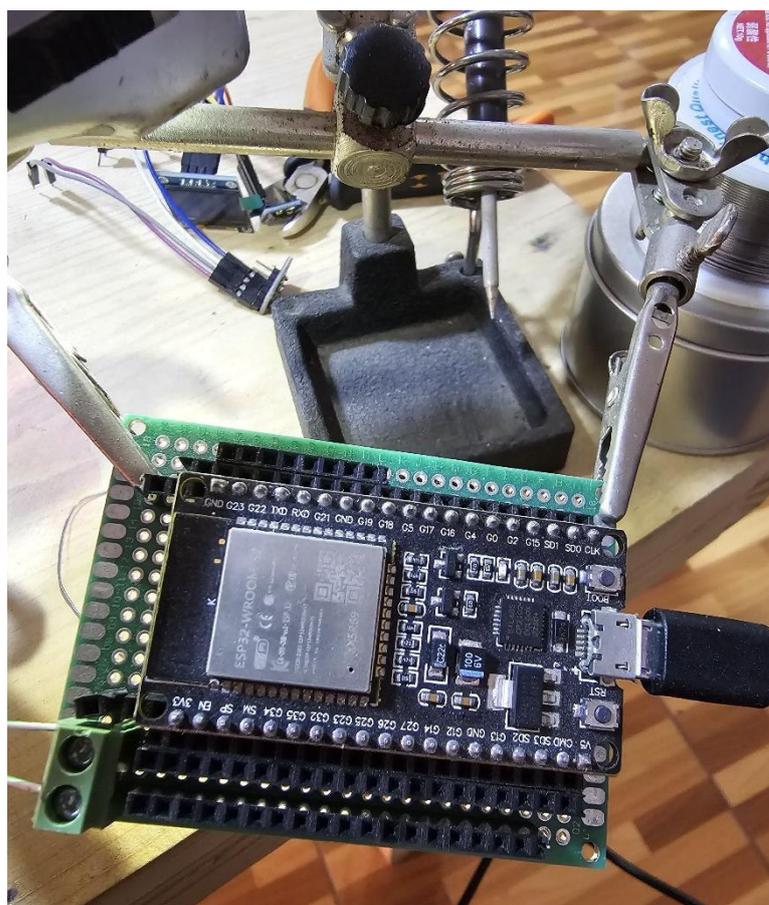
**Nota:** el rango de operación del regulador LM2596 es de 1.23V DC – 37V DC. Para este proyecto se utilizó el rango de 12V DC como entrada y 5V DC como salida. Fuente: elaboración propia.

### 3.3.2. Etapa de control

Para la etapa de control se seleccionó el microcontrolador versátil y potente ESP32 de 38 pines, ideal para este proyecto IoT debido a su procesador dual-core de 240 MHz, conectividad Wi-Fi y *Bluetooth* integradas, y una amplia gama de interfaces como SPI, I2C, UART, ADC y DAC. Con 520 KB de RAM, hasta 16 MB de almacenamiento flash y un consumo de energía optimizado (menos de 10  $\mu$ A en modo reposo profundo), también se construyó una placa electrónica específicamente para el conexionado de energización y funcionamiento de los sensores y actuadores del dispositivo electrónico ilustrado en la Figura 22.

**Figura 22**

*Microcontrolador ESP32*



**Nota:** la fuente de alimentación del ESP 32 está considerada por el puerto micro USB 5V. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 4 se aprecia una comparativa entre 4 microcontroladores similares de los cuales resalta el ESP32 por su potencia, conectividad integrada, bajo consumo y excelente relación costo beneficio.

**Tabla 4**

*Comparativa de ESP32 con otros microcontroladores*

Característica	ESP32	ESP8266	Arduino Uno	Raspberry Pi Pico
<b>Procesador</b>	Dual-core Xtensa LX6 @ 240 MHz	Single-core @ 80 MHz	AVR 8-bit @ 16 MHz	Dual-core ARM Cortex-M0+ @ 133 MHz
<b>Memoria RAM</b>	520 KB	160 KB	2 KB	264 KB
<b>Almacenamiento Flash</b>	4 MB (extensible hasta 16 MB)	4 MB	32 KB	2 MB
<b>Conectividad</b>	Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.2	Wi-Fi 802.11 b/g/n	No tiene conectividad nativa	No tiene conectividad nativa
<b>Puertos GPIO</b>	34 GPIO	17 GPIO	14 GPIO	26 GPIO
<b>Interfaces</b>	SPI, I2C, UART, ADC, DAC, PWM	SPI, I2C, UART	SPI, I2C, UART	SPI, I2C, UART
<b>Wi-Fi</b>	Sí	Sí	No	No
<b>Bluetooth</b>	Sí (BLE y clásico)	No	No	No
<b>Consumo de energía</b>	Modo de reposo profundo < 10 µA	Modo de reposo profundo < 20 µA	Bajo, pero sin soporte de Wi-Fi	Modo de baja energía disponible
<b>Precio aproximado</b>	\$5-7 USD	\$3-5 USD	\$10-15 USD	\$4-6 USD

**Nota:** el ESP32 sobresale por su potencia, conectividad inalámbrica integrada, y versatilidad, mientras mantiene un consumo eficiente de energía y un precio accesible, haciéndolo la opción prioritaria para el presente proyecto de monitoreo y control. Fuente: elaboración propia.

Para la inyección de aire se utilizó una sopladora modelo DCA AQF32 de 680W ajustable ilustrada en la Figura 23, con un caudal de 1.6 – 3.2 m<sup>3</sup>/min, lo que convertido a pies cúbicos por minuto da un caudal de 56.5 – 113 CFM. Este valor se encuentra dentro del rango calculado para el caudal deseado, equivalente a 92.74 CFM, desarrollado en el objetivo anterior.

**Figura 23**

*Sopladora de aire DCA*



**Nota:** el caudal adecuado en el prototipo de funcionamiento con la sopladora de aire fue de 2.63 m<sup>3</sup>/min. Fuente: elaboración propia.

La Figura 24 muestra una representación de un sistema de filtración HEPA combinado con luz UV germicida, utilizando una tira de LEDs UV de 12V DC y un filtro de aire marca STP con eficiencia de filtración del 99%, baja resistencia al flujo de aire su diseño ondulado y su estructura física imitan las características básicas de los filtros de aire utilizados en entornos críticos como salas de operaciones. El filtro HEPA, que es crucial para eliminar partículas microscópicas del aire

en entornos controlados, está complementado por la luz ultravioleta, que actúa como un sistema germicida para desactivar microorganismos presentes en el aire. Esta combinación asegura un doble nivel de purificación, eliminando tanto partículas como corpúsculos infecciosos.

**Figura 24**

*Representación del filtro HEPA y luz UV en el prototipo*



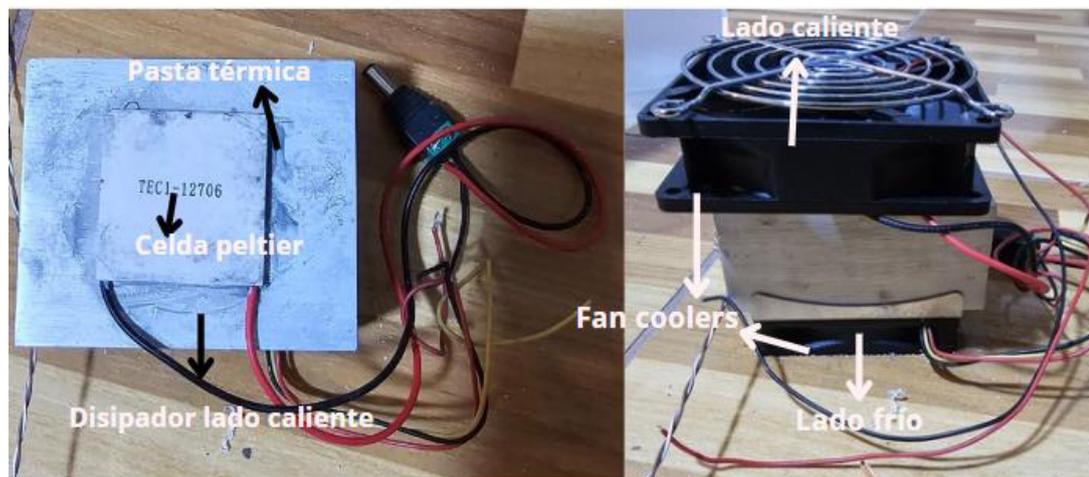
**Nota:** en este prototipo, la tira de LEDs UV representa el papel de la luz germicida, destacando cómo ambos elementos trabajarían en conjunto para mantener un ambiente estéril en salas críticas como sala de operaciones. Fuente: elaboración propia.

Del mismo modo, para un reducir y mantener la humedad en condiciones óptimas se aplicó el uso de una celda Peltier, donde su principio de funcionamiento dese basa en el efecto termoeléctrico, que genera una diferencia de temperatura cuando se aplica corriente eléctrica por medio de un *relay* de 12V DC de salida y 5V DC de entrada. En un ambiente pequeño, al hacer pasar corriente por la

celda Peltier, uno de sus lados se enfría mientras que el otro se calienta. El lado frío de la celda puede ser utilizado para condensar la humedad presente en el aire, ya que, al enfriarse el aire, el vapor de agua se condensa en gotas, reduciendo así la humedad relativa del ambiente. Se empleó una celda Peltier modelo Tec1-12706 con un voltaje de operación de 12V DC, y un consumo nominal de 6.4A de corriente. A fin de mejorar la eficiencia, se colocó un disipador en cada lado de la celda (frío y caliente), utilizando pasta térmica en el lado caliente, junto con un ventilador *fan cooler* sobre cada disipador, tal como se muestra en la Figura 25.

**Figura 25**

*Sistema de refrigeración Peltier*



**Nota:** la pasta térmica ayuda al flujo de temperatura y al mismo tiempo adhiere a la Peltier al disipador. Fuente: elaboración propia.

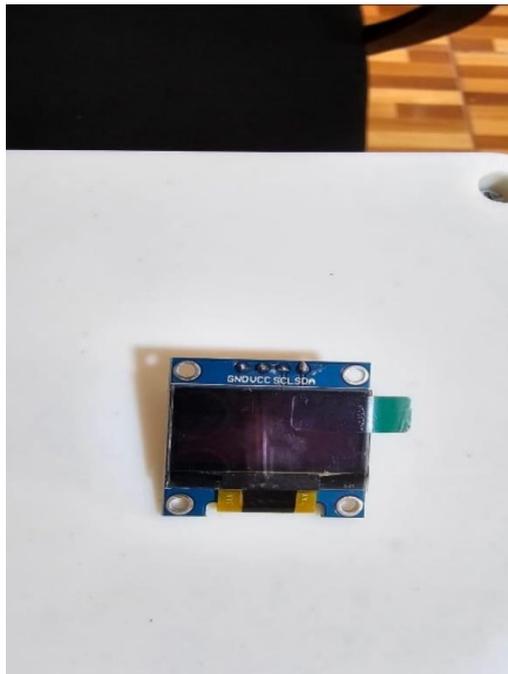
### 3.3.3. Etapa de monitoreo

La etapa de monitoreo se enfoca en la visualización en tiempo real de los parámetros medidos por el prototipo, ya sea desde una laptop o un celular mediante el aplicativo *web ThingSpeak*, o a través de una pantalla OLED integrada en el prototipo. La pantalla OLED utilizada es el modelo SSD1306, monocromática, con una resolución de 128x64 píxeles, que ofrece una calidad de imagen excelente, con negros profundos y un contraste óptimo. Su compatibilidad con los protocolos de comunicación I2C y SPI facilita su integración con el microcontrolador ESP32, y su tamaño compacto permite una

instalación eficiente. Además, su bajo consumo energético y rápida velocidad de actualización la hacen ideal para mostrar datos en tiempo real de manera continua, sin necesidad de recargas frecuentes. Esto se puede observar en la Figura 26.

**Figura 26**

*Pantalla OLED 0.96"*



**Nota:** la resolución, el tamaño, la interfaz, el consumo de energía y la velocidad de actualización la hacen ideal para este proyecto. Fuente: elaboración propia.

### **3.3.4. Etapa de sensado**

Con el fin de medir los parámetros de presión, temperatura, humedad, material particulado y radiación UV. El sensor de luz ultravioleta (UV) de modelo GY – ML8511 es el más versátil y adecuado para el prototipo en comparación con otros sensores similares como se aprecia en la Tabla 5.

**Tabla 5**

*Análisis de sensores UV: GY-ML8511 frente a otros sensores UV*

<b>Característica</b>	<b>GY-ML8511</b>	<b>VEML6075</b>	<b>Si1145</b>	<b>GUVA-S12SD</b>
<b>Rango de longitud de onda</b>	280 - 390 nm	280 - 365 nm	200 - 370 nm	240 - 370 nm
<b>Voltaje de operación</b>	3.3V - 5V	1.7V - 3.6V	2.7V - 3.6V	3.3V - 5V
<b>Consumo de energía</b>	300 $\mu$ A	300 $\mu$ A	500 $\mu$ A	500 $\mu$ A
<b>Sensibilidad</b>	1V = 15 mW/cm <sup>2</sup>	UVA y UVB separadamente	Alta sensibilidad a UVA	0.1V = 1 mW/cm <sup>2</sup>
<b>Interfaz</b>	Analógico	I2C	I2C, SPI	Analógico
<b>Dimensiones</b>	12 x 12 mm	2 x 2 mm	6.0 x 6.0 mm	3.3 x 3.3 mm
<b>Tiempo de respuesta</b>	Rápido	Rápido	Moderado	Moderado
<b>Beneficio principal</b>	Amplio rango de longitud de onda	Baja potencia, mide UVA/UVB	Alta sensibilidad	Alta precisión en UV

**Nota:** el bajo consumo de energía y su tamaño compacto lo hacen perfecto para sistemas que necesitan ser eficientes y ocupar poco espacio, como en una sala de operaciones a escala. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 27 se observa al sensor de luz ultravioleta GY-ML8511, el cual tiene una zona de detección específica para captar la radiación UV. Este sensor cuenta con pines claramente etiquetados para su fácil conexión: VIN para la alimentación, 3V para el voltaje de entrada (3.3V), GND para tierra, OUT para la señal analógica de salida, y EN para habilitar o deshabilitar el sensor y en el prototipo se encarga de medir la presencia de iluminación UV instalada en el filtro de aire.

**Figura 27**

*Sensor UV GYML8511*



**Nota:** para el prototipo la alimentación del sensor es con 5V DC y el pin (3V3) no se usa. Fuente: elaboración propia.

En esa misma línea está el sensor GP2Y1014AU0F compacto y de bajo consumo energético (20 mA) diseñado para detectar partículas de polvo fino y humo en el aire, con una sensibilidad de 0.5V/100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Funciona a un rango de voltaje de 4.5V a 5.5V y proporciona una salida analógica que es fácil de leer mediante el microcontrolador ESP 32 como se representa en la Tabla 6. Su tiempo de respuesta es rápido, inferior a un segundo, y su diseño compacto lo hace ideal para el monitoreo de corpúsculos infecciosos.

**Tabla 6**

*Sensor GP2Y1014AU0F vs comparativa a sensores de calidad de aire*

Característica	GP2Y1014AU0F	DSM501A	SDS011	PMS5003
Tipo de partículas	Polvo fino, humo	Polvo fino, humo	PM2.5, PM10	PM2.5, PM10
Voltaje de operación	4.5 - 5.5V	5V	4.7 - 5.5V	5V
Consumo de energía	20 mA	100 mA	70 mA	100 mA

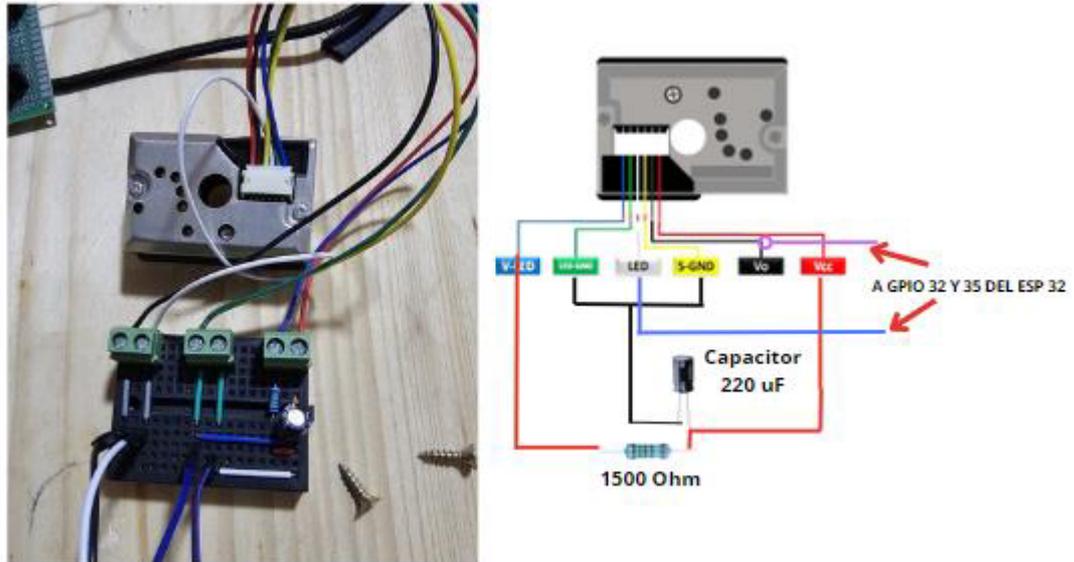
<b>Sensibilidad</b>	0.5V/(100 µg/m³)	1.0V/(100 µg/m³)	0.3 µg/m³ (PM2.5)	0.3 µg/m³ (PM2.5)
<b>Rango de medición</b>	0 - 600 µg/m³	0 - 999 µg/m³	0 - 999.9 µg/m³	0 - 999.9 µg/m³
<b>Interfaz</b>	Analógico	Digital PWM	UART	UART
<b>Tiempo de respuesta</b>	< 1 segundo	< 1 segundo	1 segundo	1 segundo
<b>Dimensiones</b>	46 x 30 x 17.6 mm	59 x 45 x 21 mm	71 x 70 x 23 mm	50 x 38 x 21 mm
<b>Beneficio principal</b>	Bajo consumo de energía, compacto	Bajo costo	Alta precisión	Alta precisión, más compacto

**Nota:** la interfaz analógica del sensor ofrece una amplia gama de mediciones, lo que simplifica su programación en el microcontrolador ESP32 sin necesidad de utilizar librerías adicionales. Esto lo hace ideal para el presente proyecto, ya que permite detectar partículas pequeñas con alta precisión y eficiencia energética, facilitando su integración. Fuente: elaboración propia.

El sensor de polvo GP2Y1014AU0F funciona mediante la dispersión de luz infrarroja. Internamente, un diodo emisor de luz (LED) emite un haz de luz infrarroja que, al encontrarse con partículas de polvo o humo en el aire, se dispersa. Un fotodetector dentro del sensor capta esta luz dispersa, y la cantidad de luz detectada es proporcional a la concentración de partículas en el aire. El sensor genera una señal analógica en su salida que varía según la densidad de partículas, permitiendo medir la cantidad de polvo en el ambiente en tiempo real. El sensor viene con una resistencia de 1500 Ohmios de precisión y un capacitor electrolítico de 220µF, Las conexiones del sensor se observa en la Figura 28.

**Figura 28**

Conexión del sensor GP2Y1014AU0F



**Nota:** es muy importante estañar las puntas del cableado del sensor a fin de lograr una correcta conexión en las borneras del prototipo. Fuente: elaboración propia.

Finalizando la etapa de sensado, en la Tabla 7 se describe el sensor BME280, un dispositivo compacto y versátil que mide temperatura, humedad y presión barométrica, con un amplio rango de operación (-40 a +85°C para temperatura y 0 a 100% RH para humedad). Su alta precisión ( $\pm 1^\circ\text{C}$  para temperatura,  $\pm 3\%$  RH para humedad y  $\pm 1$  hPa para presión) lo convierte en una opción ideal para este proyecto. Además, su bajo consumo de energía ( $3.6 \mu\text{A}$  a 1 Hz) y su compatibilidad con interfaces I2C y SPI permite acoplar la misma conexión con las mismas interfaces de la pantalla OLED 0.96”.

**Tabla 7**

*Sensor BME280 en comparativa con sensores ambientales*

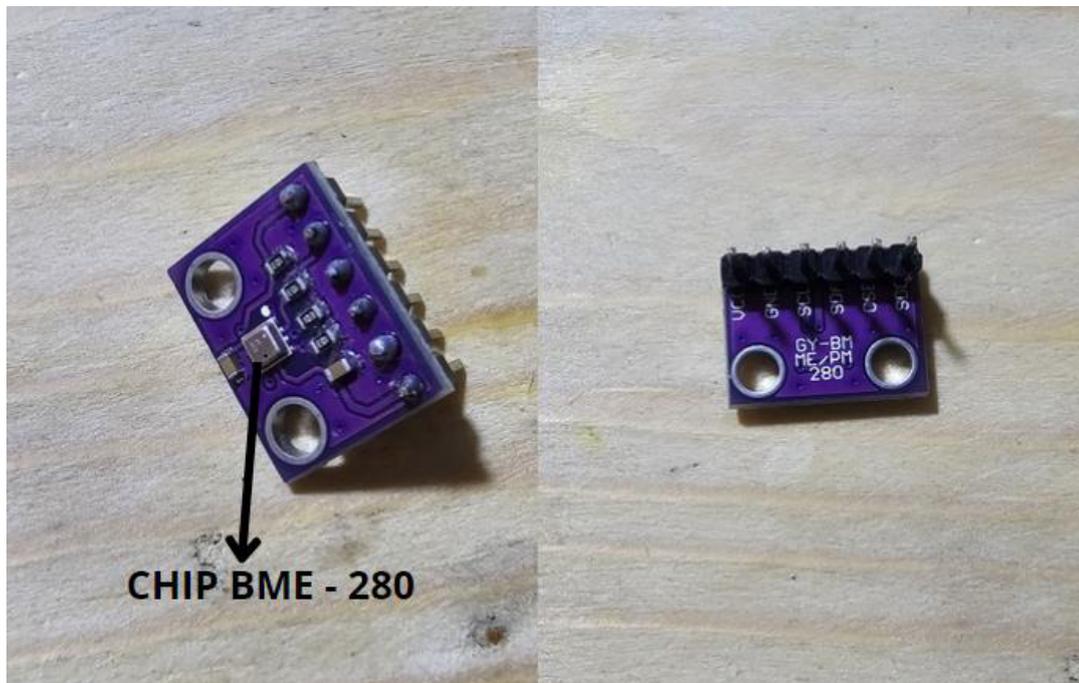
<b>Característica</b>	<b>BME280</b>	<b>DHT22</b>	<b>BMP280</b>	<b>Si7021</b>
<b>Parámetros medidos</b>	Temperatura, humedad, presión	Temperatura, humedad	Temperatura, presión	Temperatura, humedad
<b>Rango de temperatura</b>	-40 a +85°C	-40 a +80°C	-40 a +85°C	-40 a +125°C
<b>Rango de humedad</b>	0 a 100% RH	0 a 100% RH	No disponible	0 a 100% RH
<b>Rango de presión</b>	300 a 1100 hPa	No disponible	300 a 1100 hPa	No disponible
<b>Precisión (temperatura)</b>	±1.0°C	±0.5°C	±1.0°C	±0.4°C
<b>Precisión (humedad)</b>	±3% RH	±2-5% RH	No disponible	±3% RH
<b>Precisión (presión)</b>	±1 hPa	No disponible	±1 hPa	No disponible
<b>Consumo de energía</b>	3.6 µA	0.3 mA	3.6 µA	2 µA en modo de reposo
<b>Interfaz</b>	I2C, SPI	Digital (1-wire)	I2C, SPI	I2C
<b>Beneficio principal</b>	Medición completa de 3 parámetros	Fácil integración	Alta precisión en presión	Baja potencia, alta precisión

**Nota:** el BME280 sobresale en su capacidad de medir tres parámetros ambientales críticos (temperatura, humedad, y presión) con alta precisión, en un solo dispositivo. Fuente: elaboración propia.

Ahora bien, el BME280 utiliza principios de sensado capacitivo para medir la humedad, un sensor térmico para la temperatura, y un sensor piezoeléctrico para la presión. Como se representa en la Figura 29.

**Figura 29**

*Sensor BME280*



**Nota:** los sensores BME280 y BMP280 son muy similares físicamente; la principal diferencia radica en la forma del chip, siendo el BME280 cuadrado y el BMP280 rectangular. Asimismo, es importante verificar el voltaje de operación ya que el BME280 se energiza con 3V DC y es alimentado directamente desde el ESP32. Fuente: elaboración propia.

### **3.4. Determinar y programar el algoritmo del dispositivo electrónico para el control y monitoreo de corpúsculos infecciosos.**

#### **3.4.1. Diagrama de flujo**

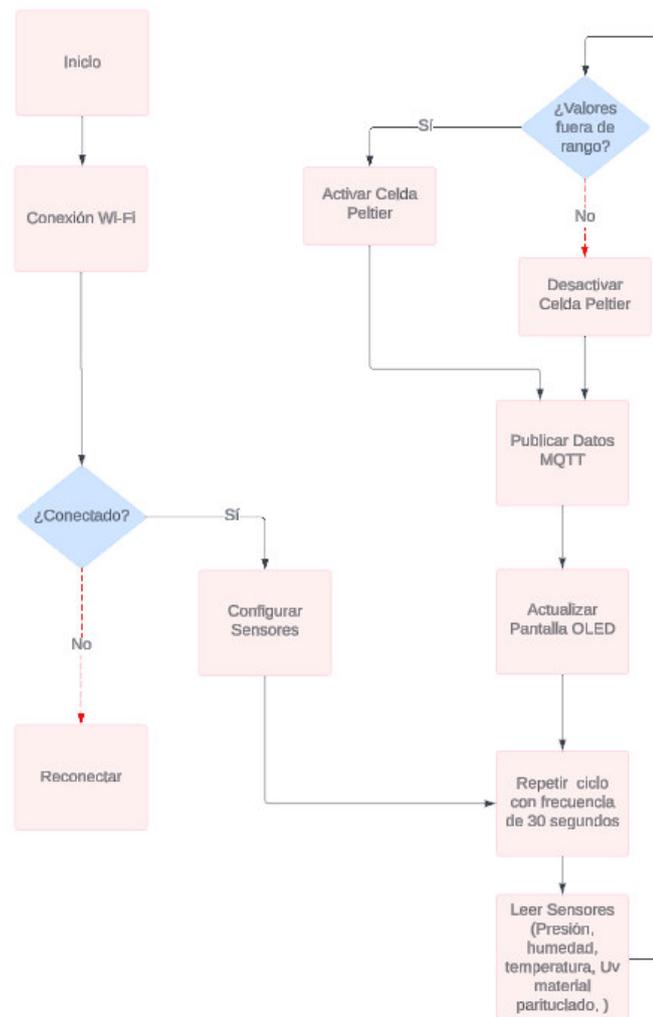
En este trabajo, se propone el desarrollo de un algoritmo innovador capaz de detectar y mantener niveles de contaminación cruzada dentro de los parámetros óptimos. La detección de esta contaminación se basa en los niveles y los parámetros microbianos.

Este algoritmo, representado en la Figura 30 mediante un diagrama de flujo comienza con la conexión a la red Wi-Fi, verificando si es exitosa o no; en caso de fallo, intenta reconectarse. Una vez conectado, se configuran los sensores y se establece la conexión al servidor MQTT. En el bucle principal, se leen los datos de los sensores

(temperatura, humedad, presión, polvo y UV), se evalúan los valores para activar o desactivar el relé y los LEDs según si están fuera o dentro de los rangos permitidos, se publican los datos al servidor MQTT y se actualiza la pantalla OLED. Si ocurre algún error de conexión durante el proceso, el sistema se reconecta automáticamente, repitiendo todo el ciclo continuamente sin fin, ya que es un sistema en tiempo real.

**Figura 30**

*Diagrama de flujo*



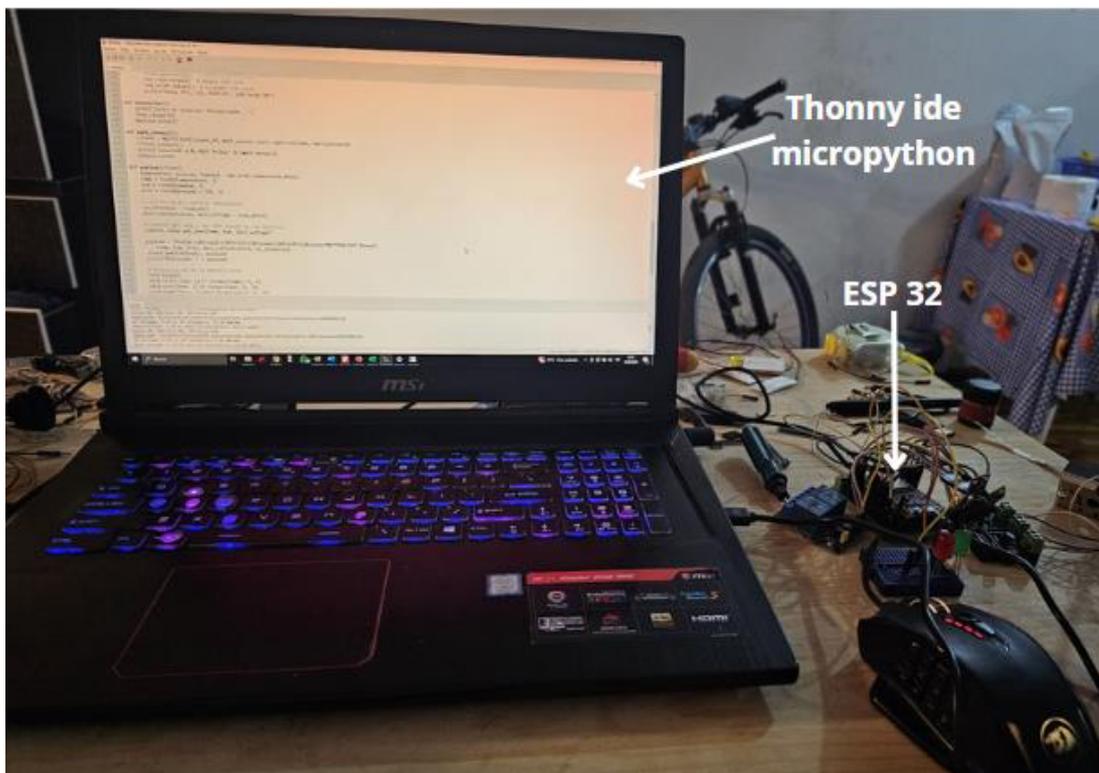
**Nota:** el diagrama de flujo fue realizado basado en su funcionamiento en tiempo real, por ese motivo no lleva un óvalo de fin. Fuente: elaboración propia.

### 3.4.2. Entorno de programación de datos, protocolo MQTT y comunicación con la nube en *ThingSpeak*

El ESP32 actúa como el cerebro del sistema, gestionando los sensores y controlando los periféricos. Su capacidad de conectividad Wi-Fi permite enviar los datos recolectados a la nube. Está programado en el *software Thonny IDE* basado en el entorno de programación de *MicroPython*, utilizando bibliotecas como *machine* para manejar los *pines GPIO* y *network* para conectividad Wi-Fi. El código controla la lectura de los sensores, la lógica de control de la celda Peltier, y la conexión a servicios en la nube mediante MQTT como ilustra la Figura 31.

**Figura 31**

*Entorno de programación Thonny IDE en ESP32*

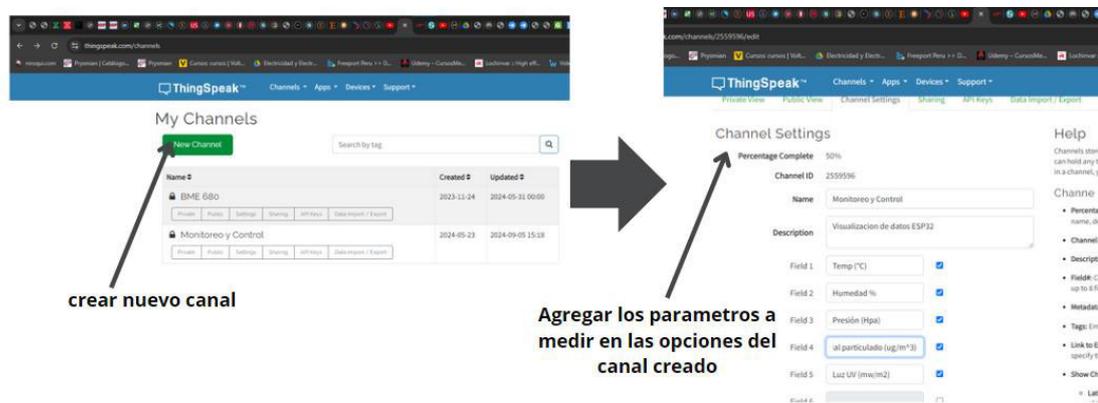


**Nota:** es necesario instalar los *Drivers* compatibles con el ESP 32 para la programación en *MicroPython*. Fuente: elaboración propia.

Para la visualización de datos en tiempo real y almacenarlos en la nube se utilizó la plataforma *ThingSpeak* con el protocolo MQTT, el primer paso es registrarse de forma gratuita en la página de *ThinSpeak*, crear un canal y agregar los parámetros a medir de los sensores BME280 (temperatura, humedad, presión), UV (radiación ultravioleta), y el sensor de material particulado GP2Y1014AU0F proyectados en la Figura 32.

**Figura 32**

*Creación de canal en ThingSpeak*

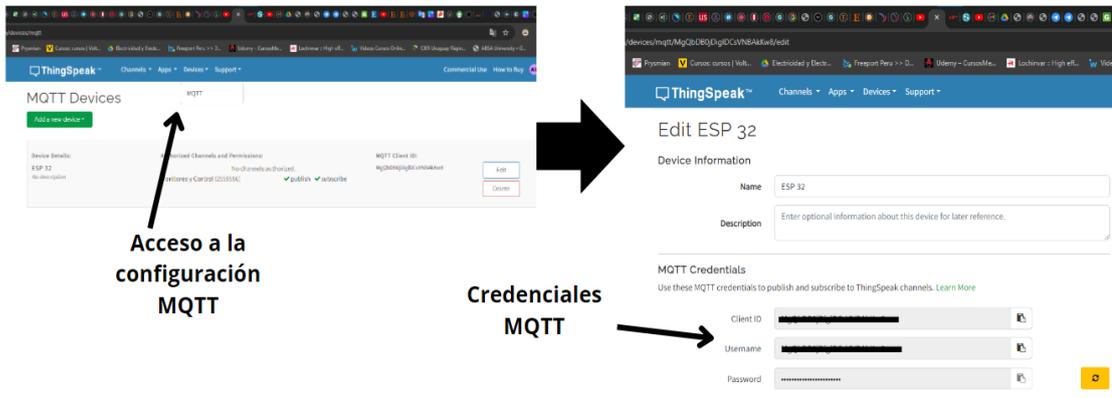


**Nota:** la versión libre de la plataforma *ThingSpeak* permite tener 4 canales como máximo, cada canal admite 8 campos de datos y autoriza el envío de 8,200 mensajes por día de los datos. Fuente: elaboración propia.

La Figura 33 muestra la integración del protocolo MQTT que permite la transmisión eficiente de los datos desde el ESP32 a la nube mediante unas credenciales generadas automáticamente las cuales serán agregadas en la programación de *MicroPython*, luego se conecta a un servidor MQTT de *ThingSpeak*, enviando los datos medidos en intervalos regulares mediante mensajes publicados, la comunicación en tiempo real se logra gracias a la capacidad del ESP32 de publicar los datos inmediatamente después de la captura. Usando el protocolo MQTT, los datos son enviados directamente a la nube para que el usuario pueda visualizarlos y analizarlos en tiempo real desde cualquier dispositivo conectado.

**Figura 33**

*Protocolo MQTT en ThingSpeak*



**Nota:** las credenciales del protocolo MQTT están tachadas debido a la protección de datos sensibles. Fuente: elaboración propia.

**3.4.3. Procesamiento de datos**

Al inicio del código aseguramos que el dispositivo tenga acceso a la red Wi-Fi de internet para poder comunicarse con el servidor MQTT de *ThingSpeak* utilizando el SSID y la contraseña de red. Luego, se establecen las credenciales de ID del canal (`channel_id`), el nombre de usuario MQTT (`mqtt_username`), la contraseña MQTT (`mqtt_password`), y el ID del cliente (`client_id`) como se observa en la Figura 34.

**Figura 34**

*Configuración de la red*

```
Thonny - D:\ANGEL MAKIAVELO\UNIVERSIDAD UCH\TESIS 2024\semana 15\Codigo final corpúsculos infecciosos.py ...
Fichero Editar Visualizar Ejecutar Herramientas Ayuda

Codigo final corpúsculos infecciosos.py * x
1 # Configuración de red
2 ssid = 'digitar nombre de la red'
3 password = 'digitar contraseña de la red'
4 mqtt_server = 'mqtt3.thingspeak.com'
5 port = 1883
6 channel_id = 'digitar nnombre de canal'
7 mqtt_username = 'digitar el usuario del mqtt que se generó en ThingSpeak'
8 mqtt_password = 'digitar el pasword del mqtt que se generó en ThingSpeak'
9 client_id = 'dgitar el cliente ID'
```

**Nota:** las credenciales MQTT son generadas en la *ThingSpeak*. Fuente: elaboración propia.

El ESP32 lee datos de los sensores BME280 (temperatura, humedad, presión), UV (radiación ultravioleta), y el sensor de polvo GP2Y1014AU0F. Los valores se procesan y convierten en unidades legibles, como  $\text{mW}/\text{cm}^2$  para UV o  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para polvo, antes de ser enviados a la nube. En el código, el BME280 se inicializa a través del bus I2C, utiliza la librería (`bme282_float`) específica del sensor para leer los parámetros a través de la comunicación I2C y la función (`bme.read_compensated_data()`) para leer temperatura, presión y humedad. Estos valores son procesados y redondeados, luego publicados en *ThingSpeak* y mostrados en la pantalla OLED. Si los valores están fuera de los rangos aceptables, activan las acciones correspondientes en la celda Peltier a través del relé. El sensor GY-ML8511 mide la radiación UV mediante la función (`read_uv()`), que convierte el valor leído en voltios y lo mapea a una intensidad de radiación UV ( $\text{mW}/\text{cm}^2$ ) usando (`mapfloat()`). El valor es comparado con un umbral, y si es inferior a  $1 \text{ mW}/\text{cm}^2$ , se enciende el LED rojo indicando ausencia de luz UV en el filtro de aire, mientras los datos también se publican en la nube y se muestran en la OLED. Por otra parte, el GP2Y1014AU0F mide la concentración de polvo cuando el LED interno se activa mediante (`dust_led_pin.value(0)`), y el valor analógico es leído con (`read_dust()`). Este voltaje se convierte en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y, si la concentración supera el límite de  $1 \text{ V}$ , el relé y el LED rojo se activan. Los datos son luego enviados a *ThingSpeak* y mostrados en la OLED. La función (`control_relay_and_leds()`) revisa las lecturas de los tres sensores, y si alguna de ellas está fuera de los rangos definidos (temperatura, humedad, material particulado o radiación UV), se activa el relé y el LED rojo. Si las condiciones son normales, el LED verde se enciende, asegurando que el sistema reaccione visualmente y a nivel de control según los datos sensoriales recopilados. La Figura 35 ilustra la configuración e integración en el código de programación para cada sensor y relé.

Figura 35

### Integración y configuración de sensores y relé

```

Configuración sensor BME 280
29 # Configuración del sensor BME 280
30 bme = bme280_float.BME280(i2c=I2C, address=0x76)
103 def publish(client):
104     temperatura, presion, humedad = bme.read_compensated_data()
105     temp = round(temperatura, 1)
106     hum = round(humedad, 1)
107     pres = round(presion / 100, 1)
108
109 # Lectura de los sensores adicionales
110 uv_intensity, uv_voltage = read_uv()
111 dust_concentration, dust_voltage = read_dust()
112
113 # Control del relé y LEDs basado en las lecturas
114 control_relay_and_leds(temp, hum, dust_voltage, uv_voltage)
115
116 payload = "fields=[%s]&fields2=[%s]&fields3=[%s]&fields4=[%s]&status=MQTTPUBLISH".format(
117     temp, hum, pres, dust_concentration, uv_intensity)
118 client.publish(topic, payload)
119 print("Publicado: " + payload)
120
Configuración del sensor de material particulado GP2Y1014AU0F
39 # Configuración del sensor de material particulado GP2Y1014AU0F
40 print("Inicializando sensor de polvo GP2Y1014AU0F")
41 dust_sensor_pin = ADC(Pin(35)) # Pin ADC para el sensor de polvo
42 dust_led_pin = Pin(32, Pin.OUT) # Pin digital para el LED del sensor
43
44 def read_dust():
45     dust_led_pin.value(0) # Encender el LED
46     time.sleep_us(200)
47     dust_value = dust_sensor_pin.read()
48     time.sleep_us(50)
49     dust_led_pin.value(1) # Apagar el LED
50     dust_voltage = dust_value / 4095.0 * 3.3
51     dust_concentration = (dust_value / 0.5) * 100
52     if dust_concentration < 0:
53         dust_concentration = 0 # La concentración no puede ser negativa
54     print("Dust Voltage: {:.2f} V, Dust Concentration: {:.2f} µg/m³".format(dust_voltage, dust_concentration))
55     return dust_concentration, dust_voltage

```

```

Configuración sensor UV GY-ML8511
32 # Configuración del sensor UV GY-ML8511
33 print("Inicializando sensor UV GY-ML8511")
34 uv_pin = ADC(Pin(30)) # Pin ADC para el sensor UV
35 uv_pin.atten(ADC.ATTN_110DB) # Configuración de atenuación
36 uv_en = Pin(25, Pin.OUT) # Pin de habilitación del sensor UV
37 uv_en.value(1) # Habilitar el sensor UV
38
39 # Función para leer el sensor UV y convertir a mW/cm²
40 def read_uv():
41     uv_value = uv_pin.read()
42     uv_voltage = uv_value / 4095.0 * 3.3
43     uv_intensity = maxfloat(uv_voltage, 1.0, 3.0, 0.0, 15.0)
44     if uv_intensity < 0:
45         uv_intensity = 0 # La intensidad UV no puede ser negativa
46     print("UV Voltage: {:.2f} V, UV Intensity: {:.2f} mW/cm²".format(uv_voltage, uv_intensity))
47     return uv_intensity, uv_voltage

```

```

Integración del relé
48 # Configuración del relé
49 relay_pin = Pin(26, Pin.OUT) # Pin para el relé
50
51 # Configuración de los LEDs
52 led_rojo = Pin(27, Pin.OUT) # Pin para el LED rojo
53 led_verde = Pin(14, Pin.OUT) # Pin para el LED verde
54
55 def control_relay_and_leds(temp, hum, dust_voltage, uv_voltage):
56     if temp < 20 or temp > 25 or hum < 20 or hum > 60 or dust_voltage > 1.0 or uv_voltage < 1.0:
57         relay_pin.value(1) # Activar el relé
58         led_rojo.value(1) # Encender LED rojo
59         led_verde.value(0) # Apagar LED verde
60         print("Relay ON, LED Rojo ON, LED Verde OFF")
61     else:
62         relay_pin.value(0) # Desactivar el relé
63         led_rojo.value(0) # Apagar LED rojo
64         led_verde.value(1) # Encender LED verde
65         print("Relay OFF, LED Rojo OFF, LED Verde ON")

```

**Nota:** el código incluye un mecanismo de control que evalúa las lecturas de los sensores y decide si activar o desactivar un relé y cambiar el estado de los LEDs (rojo y verde). En función de las siguientes condiciones: Si la temperatura está dentro del rango de 20-25°C, la humedad en el rango de 20-60%. Si la concentración de material particulado supera los 1.0 V y si la radiación UV es inferior a 1 mW/cm<sup>2</sup>. Fuente: elaboración propia.

## 3.5. Implementar y validar el prototipo de control y monitoreo de corpúsculos infecciosos.

### 3.5.1. Ensamblaje del prototipo

En primer lugar, el prototipo fue ensamblado integrando todos sus componentes, comenzando por los sensores de presión, humedad, temperatura y material particulado, los cuales se colocaron estratégicamente en la salida de aire del filtro. A fin de poder monitorear de manera precisa las condiciones ambientales del aire filtrado y asegurando una medición continua de los parámetros críticos. Conforme se presenta en la Figura 36.

**Figura 36**

*Ensamble de sensores dentro del prototipo*

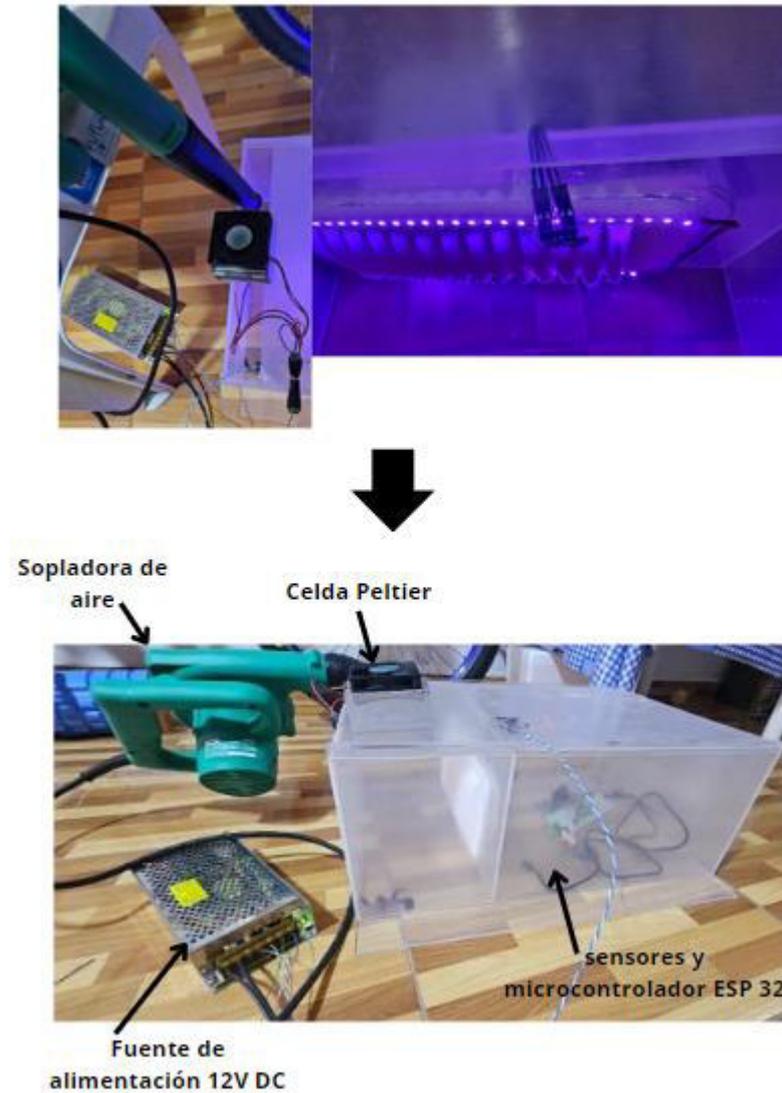


**Nota:** la disposición de los sensores monitorea el aire filtrado directamente en el entorno cerrado.  
Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con lo representado en la Figura 37, el sistema incluye una sopladora de aire por control manual a 92.8 CFM, sensores conectados a un ESP32 (BME280 para temperatura, humedad y presión, GY-ML8511 para la presencia de luz UV en el filtro de aire, y GP2Y1014AU0F para concentración de material particulado), monitoreando y regulando automáticamente las condiciones ambientales dentro de la caja cerrada a escala. A través de la lectura de estos sensores y el uso de un sistema de control basado en MQTT, el sistema puede ajustar el flujo de aire según sea necesario, encendiendo la celda Peltier automáticamente y un control manual de la sopladora cuando las condiciones exceden los umbrales establecidos.

**Figura 37**

*Prototipado final del proyecto*



**Nota:** el funcionamiento hermético del prototipo con la sopladora de aire mantiene la presión positiva de 70 %. Fuente: elaboración propia.

### **3.5.2. Análisis de resultados**

El prototipo tiene una cantidad de muestras muy grandes y está basado en la línea de tiempo, la población es cerrada, la comparación es el funcionamiento del prototipo con la parte de control apagada durante 1 hora a fin de obtener valores a condiciones ambientales y el muestreo es intencional debido a que se está tomando datos en el mismo sujeto de prueba. Se dejó en funcionamiento durante 1 hora seguida con el sistema de control apagado y los datos obtenidos promedio fueron los siguientes: de 19.3 °C, 998.92 hPa, material

particulado igual a 2.4 ug/m<sup>3</sup>, humedad relativa de 78.7% evidenciado en la Figura 38.

**Figura 38**

*Valores medidos con el control apagado*

1	fechas de medición	temperatura	humedad	presion	material particulado	LUZ UV
2	2024-06-06 23:09:22 UTC	19.7	83	999.60	0	0
3	2024-06-06 23:40:52 UTC	20.2	82.8	999.60	0	0
4	2024-06-06 23:41:23 UTC	19.1	82.9	999.60	0	0
5	2024-06-06 23:41:55 UTC	19.1	82.7	999.60	2.789084	0
6	2024-06-06 23:42:26 UTC	19.1	83	999.60	2.789084	0
7	2024-06-06 23:42:56 UTC	19.1	82.6	999.60	2.789084	0
8	2024-06-07 00:03:16 UTC	19.4	84.3	1000.00	2.789084	0
9	2024-06-07 00:03:47 UTC	19.1	84.4	1000.00	2.789084	0
10	2024-06-07 00:04:18 UTC	19.1	84.3	1000.00	2.789084	0
11	2024-06-07 00:04:49 UTC	19.1	84.3	1000.00	2.789084	0
12	2024-06-07 00:05:20 UTC	19.1	82.8	1000.00	2.789084	0
13	2024-06-07 00:05:51 UTC	19.8	80.9	1000.10	2.789084	0
14	2024-06-07 00:06:22 UTC	19.1	79.1	1000.00	2.789084	0
15	2024-06-07 00:06:53 UTC	19.1	77.2	1000.00	2.789084	0
16	2024-06-07 00:07:24 UTC	19.1	75.4	1000.00	2.789084	0
17	2024-06-07 00:07:55 UTC	19.1	74	1000.10	2.789084	0
18	2024-06-07 00:08:26 UTC	19.7	73.7	1000.00	2.789084	0
19	2024-06-07 00:08:57 UTC	19.1	74.1	1000.10	2.789084	0
20	2024-06-07 00:09:28 UTC	19.1	74.6	1000.00	2.789084	0
21	2024-06-07 00:09:59 UTC	19.6	72	1000.10	2.789084	0
22	2024-06-07 00:09:59 UTC	19.3	69	1000.15	2.789084	0
23	2024-06-07 00:09:59 UTC	19.9	66	1000.10	2.789084	0
24	PROMEDIO	19.31818182	78.77727273	999.92	2.408754364	0

**Nota:** con el control apagado los datos evidencian que prototipo está contaminado con los parámetros medidos fuera del rango deseado. Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, se hizo una muestra en diferentes horarios por 4 horas al día y en 5 días consecutivos, se observa que el promedio de la temperatura es de 22.28°C, lo que indica una estabilidad en la medición del ambiente. La humedad tiene un promedio de 58.81%, lo que sugiere que la humedad relativa del entorno también es bastante constante. La presión atmosférica registra un promedio de 1000.18 hPa, el cual indica un diferencial de presión de 18 pascales. En cuanto a la concentración de partículas (material particulado), se muestra un valor constante de 0 ug/m<sup>3</sup>, indicando que la sala se mantiene clínicamente limpia. Asimismo, la luz UV mantiene un promedio de 3.12 mW/cm<sup>2</sup>, lo que implica que el sensor UV detecta la presencia de radiación ultravioleta en el filtro de aire. Dando validez a los resultados deseados en base al estándar internacional ISO 14644 para salas limpias. La Figura 39 sustenta los datos medidos.



**Figura 40**

Gráfica de medición para el control de corpúsculos infecciosos



**Nota:** Los parámetros medidos de temperatura y humedad se mantienen continuos en el tiempo dentro del rango recomendado, el material particulado muestra los cambios significativos en un rango de 0 a 222  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en cada encendido y apagado de la sopladora de aire. Fuente: elaboración propia.

## **CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE COSTO Y BENEFICIO**

## 4.1. ANÁLISIS DE COSTOS

### 4.1.1. Recursos humanos

En el ámbito de la gestión de recursos humanos, se evaluaron varios aspectos fundamentales que respaldan la elaboración de esta tesis. Estos aspectos incluyeron el diseño y desarrollo del algoritmo, la exhaustiva revisión de diversas fuentes bibliográficas utilizadas, la planificación logística para la movilidad en la recopilación de datos e investigación, la asignación de personal para la ejecución del proyecto de tesis y, finalmente la mano de obra para la realización de la presente tesis, como se detalla en la Tabla 8.

**Tabla 8**

*Presupuesto de gestión de recursos humanos*

<b>Presupuesto de gestión de recursos humanos</b>	
Desarrollo del algoritmo de monitoreo y control de corpúsculos infecciosos	S/. 3500
Fuentes bibliográficas	S/. 200
Movilidad	S/. 45
Mano de obra	S/. 3000
Costo total 1	S/. 6745

**Nota:** el costo total 1 asciende a S/. 6,745, lo que indica una inversión considerable en la etapa de desarrollo, particularmente en los aspectos tecnológicos y en la remuneración del equipo involucrado. Fuente: elaboración propia.

### 4.1.2. Recursos de *hardware*

Para los recursos de *hardware* de desarrollo se consideró la compra de una fuente de alimentación, microcontrolador ESP 32, cinta led ultravioleta, filtro de aire, maqueta en material acrílico, sensor de material particulado, presión, humedad, temperatura, luz ultravioleta, modulo Relay, pantalla Oled, kid de refrigeración con celda Peltier y

soplador de aire para el monitoreo y control de partículas nosocomiales. De acuerdo con lo presentado en la Tabla 9.

**Tabla 9**

*Presupuesto de hardware*

<b>Presupuesto de hardware</b>		
<b>Descripción del material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio</b>
Fuente de alimentación	1	S/. 180
Laptop MSI (Core i7 8. <sup>a</sup> generación)	1	S/. 5,300
Filtro de aire	1	S/. 20
Maqueta en material acrílico	1	S/. 165
Microcontrolador ESP 32 - WROOM	1	S/. 40
Tira led UV	1	S/. 15
Sensor UV ML8511	1	S/. 45
Pantalla OLED 96"	1	S/. 35
Módulo Relay 2Ch 5VDC	1	S/. 15
Sensor BME 280	1	S/. 35
Sensor de material particulado	1	S/. 55
Kit de refrigeración con Celda Peltier Tec1-12706	1	S/. 85
Herramientas de implementación	1	S/. 240
Soplador de aire DCA AQF 32	1	S/. 180
Costo total 2		S/. 6,410

**Nota:** la tabla presenta el desglose del presupuesto necesario para la adquisición de componentes de hardware para un proyecto específico. El costo total 2, que asciende a S/. 6,410, muestra una inversión sólida en *hardware*, con un equilibrio entre componentes electrónicos y materiales de apoyo que resalta un enfoque integral para la implementación del proyecto, considerando tanto el hardware principal como los elementos auxiliares para su correcto funcionamiento.

#### **4.1.3. Recursos software**

Para los recursos de *software* se consideró el costo de una suscripción anual de los *softwares* en diseño de la familia de *Autodesk* al

AutoCAD, Revit en sus versiones 2023 y 1 año de suscripción del programa Canva. De acuerdo con lo presentado en la Tabla 10.

**Tabla 10**

*Presupuesto de gestión de Software*

<b>Presupuesto de Software</b>		
<b>Descripción del material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio</b>
Software de diseño AutoCAD 2023	1	S/. 825
Software de diseño Canva	1	S/. 210
Software de diseño Revit 2023	1	S/. 1,200
Costo total 3		S/. 2,235

**Nota:** la tabla detalla el presupuesto destinado a la adquisición de *software* necesario para el proyecto. Incluye tres programas de diseño: AutoCAD 2023 (S/. 825), Canva (S/. 210), y Revit 2023 (S/. 1200). Estos programas son fundamentales para el diseño y modelado en diversas etapas del proyecto. El costo total de la inversión en *software* asciende a S/. 2,235, reflejando el compromiso con herramientas profesionales que aseguran precisión y calidad en el desarrollo y diseño del prototipo.

#### **4.1.4. Otros gastos**

Por otro lado, se incluyeron como gastos adicionales las capacitaciones y la adquisición de fuentes bibliográficas, con el objetivo de favorecer el óptimo desarrollo de esta tesis y la formación del autor. Según lo indicado en la Tabla 11.

**Tabla 11**

*Gastos adicionales*

<b>Otros gastos</b>	
Capacitaciones	S/. 1,000
Adquisición de fuentes bibliográficas	S/. 450
Costo total 4	S/. 1,450

**Nota:** las capacitaciones están relacionadas con la ventilación y el aire acondicionado en entornos hospitalarios, la programación en *Python* para microcontroladores, y AutoCAD para proyectos de salud. Además, se adquirieron fuentes bibliográficas de diversas revistas científicas, como EBSCO HOST, Elsevier e IEEE.

Finalmente, se realizó la sumatoria de los 4 gastos del monto total para la implementación del dispositivo electrónico para el monitoreo y control de corpúsculos infeccioso dando como resultado el monto total de dicha sumatoria.

**Tabla 12**

*Sumatoria de costos*

<b>Sumatoria de presupuestos</b>	
Costo total 1	S/. 6,745
Costo total 2	S/. 6,410
Costo total 3	S/. 2,235
Costo total 4	S/. 1,450
<b>Monto total</b>	<b>S/. 16,840</b>

**Nota:** el desglose de costos en diferentes categorías permite una mejor planificación y control del presupuesto, asegurando que todos los aspectos relevantes del proyecto se cubran de manera adecuada. El monto total asciende a S/. 16,840, lo que refleja una inversión considerable, en áreas como adquisición de hardware, desarrollo de software, capacitaciones, y mano de obra. El cual se utilizará para el análisis de sensibilidad.

## **4.2. ANÁLISIS DE BENEFICIOS**

### **4.2.1. Beneficios tangibles**

La implementación del presente proyecto de control y monitoreo de partículas nosocomiales en salas críticas de los establecimientos de salud conlleva beneficios tangibles significativos. Este enfoque mejora la calidad del aire al reducir la concentración de partículas infecciosas, disminuyendo así el riesgo de infecciones hospitalarias y mejorando la seguridad y bienestar de los pacientes. Además, contribuye al cumplimiento de normativas y estándares de salud, protege al personal médico, optimiza la eficiencia operativa, genera confianza en

los pacientes, y puede resultar en un ahorro de costos a través de la reducción de tratamientos adicionales y hospitalizaciones prolongadas. En última instancia, la gestión efectiva de partículas nosocomiales no solo fortalece la salud y seguridad en entornos hospitalarios críticos, sino que también promueve la sostenibilidad y la eficacia en la prestación de servicios de atención médica.

#### **4.3.2. Beneficios intangibles**

Entre estos beneficios se encuentran la tranquilidad emocional de los pacientes y sus familias al estar en un entorno más seguro y limpio, la mejora de la percepción de calidad y compromiso por parte del personal de salud al trabajar en un ambiente más saludable, y la construcción de una reputación positiva para la institución hospitalaria en la comunidad. Además, la sensación de confianza y bienestar que se crea puede contribuir a un ambiente más colaborativo y eficaz en el equipo médico, promoviendo así una cultura hospitalaria centrada en la atención y la seguridad del paciente. Estos aspectos intangibles son fundamentales para fortalecer la relación entre pacientes, personal médico y la comunidad en general.

### **4.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD**

#### **4.3.1. Desarrollo del flujo de caja**

Durante la elaboración del análisis de flujo de caja, como primera etapa se procedió a reconocer la asignación presupuestaria global, que corresponde al gasto anual destinado a la ejecución del prototipo de monitoreo y control de corpúsculos infecciosos. En la Tabla 13 se presentan de manera detallada los valores correspondientes a los ingresos y egresos, evidenciando así el flujo de caja, que refleja el ingreso neto y la relación costo-beneficio.

**Tabla 13***Flujo de caja del proyecto*

Año	0	1	2	3	4	5
<b>Ingresos</b>						
Venta del producto		S/.96,324.80	S/.96,324.80	S/.96,324.80	S/.96,324.80	S/.96,324.80
<b>Total, de Ingresos</b>		S/.96,324.80	S/.96,324.80	S/.96,324.80	S/.96,324.80	S/.96,324.80
<b>Egresos</b>						
Inversión inicial	S/.87,568.00					
Gastos por recursos humanos	S/.6,745.00					
Gastos en <i>hardware</i>	S/.6,410.00					
Otros gastos	S/.1,450.00					
Mantenimiento		S/.950.00	S/.950.00	S/.950.00	S/.950.00	S/.950.00
Gasto en <i>software</i>	S/.2,235.00	S/.2,235.00	S/.2,235.00	S/.2,235.00	S/.2,235.00	S/.2,235.00
Producción			S/.87,568.00	S/.87,568.00	S/.87,568.00	S/.87,568.00
<b>Total, de egresos</b>	S/.87,568.00	S/.3,185.00	S/.90,753.00	S/.90,753.00	S/.90,753.00	S/.90,753.00
<b>Flujo de caja (ingreso neto)</b>	- S/.87,568.00	S/.93,139.80	S/.5,571.80	S/.5,571.80	S/.5,571.80	S/.5,571.80
<b>Costo beneficio</b>	- S/.87,568.00	S/.5,571.80	S/.11,143.60	S/.16,715.40	S/.22,287.20	S/.27,859.00

**Nota:** la inversión inicial es de S/.16,840, a ese monto se le añadió un 30% de ganancia obteniendo un valor ascendente de S/. 21,892, con ese monto inicial se desarrolló todo el flujo de caja. El costo beneficio para el año 0 es negativo porque es el monto recién invertido, para los próximos años en adelante el costo beneficio asciende a S/.5,571.80 anualmente.

#### 4.3.2. Análisis del VAN

En el análisis del Valor Actual Neto (VAN), se tiene en cuenta como primer componente la inversión inicial, que asciende a S/.21,892.00. En este escenario, se contempla la comercialización de 4 sistemas por año, resultando en un valor final de inversión total de S/.87,568.00. Posteriormente, se considera el segundo factor, denominado tasa de interés exigida a la inversión, establecida en un 15% para el proyecto durante un período de 5 años después de la implementación del sistema. El tercer factor consiste en los flujos de efectivo, detallados en la Tabla 13. La ecuación 3 ilustra el procedimiento para calcular el VAN de manera efectiva.

$$VAN = \frac{F1}{(1+i)^1} + \frac{F2}{(1+i)^2} \dots \dots \frac{Fn}{(1+i)^n} - I_0 \quad (3)$$

Donde:

F1, F2 y Fn: Flujos de dinero para cada periodo.

i: Tasa de descuento o de interés exigido a la inversión

n: Número de periodos de tiempo.

En base a la ecuación 6, se obtuvo el valor del VAN siendo este S/13,073.21, por tanto, el VAN es positivo siendo mayor a 0 y con ello se demuestra que el presente proyecto es rentable, dando lugar a que la inversión se logra recuperar, aun después de ajustarlo con la tasa de interés.

#### 4.3.3. Análisis del TIR

Para determinar la viabilidad del proyecto en términos porcentuales, se emplea la tasa interna de rentabilidad, según la formulación proporcionada en la ecuación 7.

$$\frac{F1}{(1+TIR)^1} + \frac{F2}{(1+TIR)^2} \dots \dots \frac{Fn}{(1+TIR)^n} - I_0 = 0 \quad (4)$$

La TIR se calcula de manera análoga a la ecuación del Valor Actual Neto (VAN), igualándola a cero y expresándola como un valor porcentual. En este caso específico, el resultado obtenido mediante la ecuación 7 es del 40.399%, considerado un indicador óptimo dado que supera la tasa de interés asociada al VAN.

#### 4.3.4. Análisis del ROI

Denominado en inglés como *Return On Investment* (ROI), este indicador cuantifica el rendimiento de una inversión y se determina mediante la aplicación de la ecuación 8.

$$ROI = \frac{(\textit{Beneficio} - \textit{Inversión})}{\textit{Inversión}} \quad (5)$$

El cálculo específico utilizando la ecuación 5 arrojó un valor del 10%. Este resultado positivo indica la rentabilidad del proyecto, ya que los ingresos superan a la inversión realizada.

## Conclusiones

- La infraestructura actual de los hospitales nivel III en Lima presenta deficiencias críticas en el monitoreo y control de infecciones, aumentando el riesgo de infecciones nosocomiales.
- El diseño del dispositivo electrónico es innovador y efectivo en la detección y el monitoreo en tiempo real de corpúsculos infecciosos , contribuyendo a la mejora de las condiciones de seguridad en ambientes hospitalarios.
- Los componentes electrónicos seleccionados destacan por su alta calidad, lo que garantiza la precisión y durabilidad del dispositivo, manteniendo un costo optimizado para su implementación.
- El algoritmo desarrollado es eficiente y adaptable, permitiendo el procesamiento en tiempo real y la detección precisa de los corpúsculos infecciosos mediante la medición de los parámetros de temperatura, humedad, material particulado, intensidad de luz UV y presión.
- La implementación y validación del prototipo demostraron una reducción significativa en la tasa de infecciones nosocomiales en un ambiente controlado a escala de una sala de operaciones basado en las normas ISO 14644 y ASHRAE 170.

## Recomendaciones

- Implementar un sistema integral de monitoreo continuo, acompañado de mejoras en la infraestructura de ventilación y filtración en las salas de operaciones multifunción de los establecimientos de salud nivel III en el Perú.
- Proceder con la creación de prototipos y realizar pruebas de campo exhaustivas para validar la efectividad del diseño en entornos hospitalarios reales.
- Establecer acuerdos con proveedores confiables y llevar a cabo pruebas rigurosas de los componentes seleccionados para garantizar su calidad y desempeño en pruebas de campo.
- Someter el algoritmo desarrollado a evaluaciones rigurosas bajo diversas condiciones operativas, además de capacitar al personal técnico en su programación y ajuste.
- Planificar una expansión gradual del dispositivo en más hospitales de Lima y establecer un sistema de monitoreo continuo para evaluar su rendimiento a largo plazo.

## Glosario

**ACH (Air Changes Per Hour):** tasa de recambio de aire por hora, utilizada para garantizar la renovación continua del aire en salas críticas.

**ASHRAE:** la Asociación de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado es una organización que establece estándares y guías para sistemas de climatización y ventilación.

**Coronavirus:** microorganismo de tamaño aproximado de 0.123 micrones, se menciona en relación con los filtros HEPA y la retención de partículas.

**EPA, HEPA y ULPA:** tipos de filtros de aire utilizados en salas críticas, con diferentes eficiencias para retener partículas de distintos tamaños.

**ESP32:** microcontrolador económico con conectividad Wi-Fi y Bluetooth integrada, utilizado para proyectos que requieren conectividad inalámbrica e

**Filtros HEPA (High Efficiency Particulate Air):** filtros de alta eficiencia que se utilizan para atrapar partículas finas, con una eficiencia de retención que varía del 99.97% al 99.99% para partículas de 0.3 micrones de tamaño.

**Flujo aerodinámico unidireccional:** un patrón de flujo de aire controlado en una sola dirección para evitar la contaminación cruzada en salas críticas.

**Inyectores y extractores:** dispositivos que pueden introducir o eliminar aire o sustancias en la sala crítica, según las instrucciones del microcontrolador.

**IoT (Internet de las cosas):** tecnología que permite la conexión de dispositivos a la red, lo que facilita el monitoreo y control remoto de los datos y operaciones del prototipo.

**ISO 14644-4:** norma internacional de la Organización Internacional de Normalización que establece los criterios de diseño para salas críticas clínicamente limpias, incluyendo requisitos para la calidad del aire, sistemas de filtración, velocidades de aire y presión en la habitación.

**UNE (Una Norma Española):** norma española que menciona la aplicación de filtros absolutos de alta eficiencia y ultrafiltros en la ventilación de salas críticas clínicamente limpias.

## Referencias

- Abed, A. B., Korcan, S. E., & Güngör, S. (2023). Antibiotics profile map of clinical *A. baumannii* strains isolated from health institutions in Turkey: a database search study and analysis of publications from 2011 to 2022. *Bulletin Of The National Research Centre/Bulletin Of The National Research Center*, 47(1). <https://doi.org/10.1186/s42269-023-00982-6>
- Airtécnicos (2021, 27 de abril de). *¿Qué es una unidad de tratamiento de aire (UTA)?* <https://www.airtecnicos.com/es/noticias/que-es-una-unidad-de-tratamiento-de-aire-uta>
- Aldazábal, L. (2022). *Diseño del sistema de climatización del área de fabricación galénicos para laboratorio farmacéutico*. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/19301>
- Alsaqqa Duwairi, A. (2024). *Securización protocolo MQTT*. [Tesis para obtener el grado en Ingeniería Informática, Universitat Jaume I]. Repositorio UJI. <http://hdl.handle.net/10234/207984>
- American National Standards Institute y Sociedad Americana de Aire Acondicionado, Refrigeración y Calefacción (2022). *Method of testing general ventilation air-cleaning devices for removal efficiency by particle size*. (2.<sup>a</sup> ed.). (ANSI/ASHRAE Standard 52.2:2022). <https://www.ashrae.org/about/news/announcing-the-new-ashrae-org>
- Sociedad Americana de Aire Acondicionado (2020). UVGI Short Course: One-Hour. UVGI Course. ASHRAE. <https://www.ashrae.org>
- Asociación Española de Normalización y Certificación. (2020). *Filtros absolutos (EPA, HEPA Y ULPA) (UNE-EN 1822-1:2020)*. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=n0063134>
- Baqer, N. S., Mohammed, H. A., & Albahri, A. S. (2023). Development of a real-time monitoring and detection indoor air quality system for intensive care unit and emergency department. *Signa Vitae*, 19(1), 77–92. <https://ezproxy.ucsm.edu.pe:2089/10.22514/sv.2022.013>

- Bermeo Sosoranga, A. S. (2024). *Construcción de 2 módulos didácticos para medir la luz y radiación ultravioleta (UV) utilizando el entorno Simulink de Matlab y Arduino*. [Tesis para la obtención del Título de Tecnólogo superior en Electromecánica, Escuela Politécnica Nacional]. BIBDIGITAL, Repositorio Digital Institucional de la Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/25655>
- British Broadcasting Corporation News Mundo. (31 de mayo de 2021). Perú duplica las muertes por covid-19 tras una revisión de cifras y se convierte en el país con la mayor tasa de mortalidad per cápita del mundo. *BBC*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-57310960>
- Cao, G., Kvammen, I., Hatten, T. A. S., Zhang, Y., Stenstad, L.-I., Kiss, G., & Skogås, J. G. (2021). Experimental measurements of surgical microenvironments in two operating rooms with laminar airflow and mixing ventilation systems. *Energy and Built Environment*, 2(2), 149–156. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.08.003>
- Castelblanco Angarita, D. y Marroquín Hidalgo, A. (2020) *Sistema de monitoreo remoto de variables medioambientales en las salas de cirugía de una clínica de cuarto nivel de complejidad mediante el uso de internet de las cosas (IoT)*. [Tesis de licenciatura, Universidad del Rosario]. Repositorio Institucional E-docUR <https://repository.urosario.edu.co/handle/10336/24441>
- Confederación Médica Latinoamericana y del Caribe. (13 de julio de 2023). *Médicos fallecidos por COVID-19 en Iberoamérica*. Consejo Nacional. Observatorio Colegio Médico del Perú. <https://www.cmp.org.pe/medicos-fallecidos-por-covid-19-en-iberoamerica/>
- Cordero, V. y Mendoza, R. (2022). *Diseño de un sistema IoT para el monitoreo remoto de la calidad del aire en ambientes interiores de la Facultad de Ingeniería de la universidad Privada de Tacna*. [Tesis de licenciatura, Universidad Privada de Tacna]. Repositorio de la Universidad Privada de Tacna. <https://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/2630>
- COSAPI, ingeniería y construcción. (2010). Nueva Consulta Externa y Emergencia del Hospital Nacional Guillermo Almenara [AutoCAD]. <https://www.cosapi.com.pe/Site/Index.aspx?aID=61>

- Energet. (2019, 18 de marzo). *¿Sabes lo que son las unidades de tratamiento de aire (UTAS)?* <https://enertec.es/sabes-lo-que-son-las-unidades-de-tratamiento-de-aire-utas/>
- Erazo, J. (2019). *Diseño e implementación del sistema de ventilación mecánica de áreas productivas y laboratorios de la empresa NEFROCONTROL S.A.* [Tesis de licenciatura, Escuela Politécnica Nacional]. BIBDIGITAL, Repositorio EPN. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20423>
- EsSalud. (11 de julio de 2024). *Nuestras redes asistenciales.* <https://www.essalud.gob.pe/nuestras-redes-asistenciales/>
- Fassbinder, M., & Abernathy, J. H. (2024). Redesigning the operating room for safety. En *Elsevier eBooks*, 231-244. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-66179-9.00010-5>
- Garlasco, J., Beqiraj, I., Bolla, C., Marino, E., Zanelli, C., Gualco, C., Rocchetti, A., & Gianino, M. (2023). Impact of septic episodes caused by *Acinetobacter baumannii*, *Klebsiella pneumoniae* and *Pseudomonas aeruginosa* in a tertiary hospital: clinical and economic considerations in years 2018–2020. *Journal of Infection and Public Health*, 16(4), 475-482. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2023.02.007>
- Grasselli, G., Zangrillo, A., Zanella, A., Antonelli, M., Cabrini, L., Castelli, A., Cereda, D., Coluccello, A., Foti, G., Fumagalli, R., Iotti, G., Latronico, N., Lorini, L., Merler, S., Natalini, G., Piatti, A., Ranieri, M. V., Scandroglio, A. M., Storti, E., Cecconi, M., ... COVID-19 Lombardy ICU Network (2020). Baseline Characteristics and Outcomes of 1591 Patients Infected With SARS-CoV-2 Admitted to ICUs of the Lombardy Region, Italy. *JAMA*, 323(16), 1574-1581. <https://doi.org/10.1001/jama.2020.5394>
- Infecciones intrahospitalarias disfrazadas de COVID 19. (16 de agosto 2021). *Diario médico.* <https://www.diariomedico.pe/reportaje-infecciones-intrahospitalarias-disfrazadas-de-covid-19/>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2023). Población ocupada de lima metropolitana alcanzó 5 millones 102 mil personas de diciembre 2022 a febrero

2023 [Nota de prensa].  
<https://m.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/noticias/nota-de-prensa-no-037-2023-inei.pdf>

International Organization for Standardization (2022) Cleanrooms and associated controlled environments – Part 4: Design, construction and start-up (ISO 14644-4:2022). <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14644:-4:ed-2:v1:en>

International Organization for Standardization (2022) High-efficiency filters and filter media for removing particles in air - Part 5: Test method for filter elements (ISO 29463-5:2022). <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/d3ff27d5-1613-495e-8770-c3fd3b11f80c/en-iso-29463-5-2022>

Kenarkoohi, A., Noorimotlagh, Z., Falahi, S., Amarloei, A., Mirzaee, S. A., Pakzad, I., & Bastani, E. (2020). Hospital indoor air quality monitoring for the detection of SARS-CoV-2 (COVID-19) virus. *The science of the total environment*, 748(141324).<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141324>

Khanal, A., & Kharel, N. (2023). Optimizing Commercial Building HVAC System through Accurate Load Calculation and Efficient Ducting Design. *Computational Research Progress In Applied Science & Engineering*.  
<https://doi.org/10.52547/crpase.9.3.2861>

Lakshminarayana, S., Praseed, A., & Thilagam, P. S. (2024). Securing the IoT application layer from an MQTT protocol perspective: Challenges and research prospects. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 26(4), 2510-2546.  
<https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3372630>

Leandro, P. (2022a). Inversión Pública En Infraestructura Hospitalaria En Estado De Emergencia Nacional. *Revista Científica de Enfermería*. 2071-5080, 11(3), 44-66. *EBSCOHost*.  
<https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Aagcd%3A8%3A17202664/detailv2?sid=ebsco%3Aplink%3Ascholar&id=ebsco%3Aagcd%3A162571815&crl=c>

Leandro, P. (2022b). Inversión Pública En Infraestructura Hospitalaria En Estado De Emergencia Nacional. *Revista Científica de Enfermería (2071-5080)*, 11(3), 44-66. *EBSCOHost*.

<https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A8%3A17202664/detailv2?sid=ebsco%3Aplink%3Ascholar&id=ebsco%3Agcd%3A162571815&crl=c>

Ley N° 26842. (15 de julio de 1997) *Ley general de la salud*.  
<https://www.gob.pe/institucion/minsa/normas-legales/256661-26842>

Ley N° 27657. (28 de enero de 2002) *Ley del Ministerio de Salud*.  
<https://www.diresacallao.gob.pe/wdiresa/documentos/baselegal/Ley27657.pdf>

Light World Solutions (2020) *LWS: Active Count Microbiological*  
<https://www.golighthouse.com/en/knowledge-center/topics/lws-equipment-training/>

Lin, T., Zargar, O., Lin, K., Juiña, O., Sabusap, D., Hu, S., & Leggett, G. (2020). An experimental study of the flow characteristics and velocity fields in an operating room with laminar airflow ventilation. *Journal of Building Engineering*, 29(101184). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101184>

Maryani, S., Kusumanto, R. D., & Carlos, R. S. (2023). Solar Panel Optimization Using Peltier Module TEC1-12706. *Journal of Mechanical, Civil and Industrial Engineering*, 4(3), 43–50. <https://doi.org/10.32996/jmcie.2023.4.3.6>

Ministerio de Salud. (2015a). *NTS N°119-MINSA/DGIEM-V.01*. Norma Técnica de salud “Infraestructura y equipamiento de los establecimientos de Salud del tercer nivel de atención”  
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1817584/Norma%20T%C3%A9cnica%20de%20Salud%20N%C2%B0%20119-MINSA-DGIEM-V.01.pdf>

Ministerio de Salud. (2015b). *NTS N°119-MINSA/DGIEM-V.01*. Norma Técnica de salud “Infraestructura y equipamiento de los establecimientos de Salud del tercer nivel de atención”  
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1817584/Norma%20T%C3%A9cnica%20de%20Salud%20N%C2%B0%20119-MINSA-DGIEM-V.01.pdf>

Ministerio de Salud. (2015c). *NTS N°119-MINSA/DGIEM-V.01*. Norma Técnica de salud “Infraestructura y equipamiento de los establecimientos de Salud del tercer nivel de atención”  
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1817584/Norma%20T%C3%A9cnica%20de%20Salud%20N%C2%B0%20119-MINSA-DGIEM-V.01.pdf>

- Ministerio de Salud. (2023). *Relación de hospitales el Perú*  
<https://www.gob.pe/institucion/minsa/informes-publicaciones/3872726>
- Ministerio de Salud. (2024). *Resolucion Ministerial. N°. 432-2024/MINSA.*  
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/6509862/5678236-resolucion-ministerial-n-434-2024-minsa.pdf>
- Ministerio de Salud. (2024a). *Boletín pidemiologico del Perú. Vol. 32 – SE. 12*  
[https://www.dge.gob.pe/epublic/uploads/boletin/boletin\\_202311\\_28\\_120903.pdf](https://www.dge.gob.pe/epublic/uploads/boletin/boletin_202311_28_120903.pdf)
- Ministerio de Salud. (2024b). *Boletín pidemiologico del Perú. Vol. 32 – SE. 12*  
[https://www.dge.gob.pe/epublic/uploads/boletin/boletin\\_202311\\_28\\_120903.pdf](https://www.dge.gob.pe/epublic/uploads/boletin/boletin_202311_28_120903.pdf)
- Ministerio de Salud. (6 de febrero de 2023) *Relación de hospitales el Perú*  
<https://www.gob.pe/institucion/minsa/informes-publicaciones/3872726>
- Ministerio de Salud. (30 de mayo de 2024). *¿Qué es el primer nivel de atención?* <https://www.gob.pe/16727-que-es-el-primer-nivel-de-atencion-de-salud>
- Muhamad, R. (2023). *Rancang bangun alat dan sistem monitoring kualitas udara nitrogen dioksida.* Fakultas matetmatika dan ilmu pengetahuan alam, universitas lampung. [Tesis de licenciatura, Universitas Lampung]. Repositorio Institucional UNILA. <http://digilib.unila.ac.id/id/eprint/74626>
- Nascar, I. & Pal, A. K. (2021). Automatic Indoor Air Quality Control of COVID -19 Patient Facilities Using Type-2 Fuzzy Controller. *Journal of Physics: Conference Series*, 1937(1), 1-13. <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1937/1/012035>
- National Air Filtration Association (2016). *Recomended Practices for Filtration for airborne infections containment rooms in health care facilities.* <https://www.nafahq.org/best-practice-guidelines/>
- Nourozi, B., Wierzbicka, A., Yao, R., & Sadrizadeh, S. (2024). A systematic review of ventilation solutions for hospital wards: Addressing cross-infection and patient safety. *Building and Environment*, 247(110954). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110954>.

- Odoyo, E., Matano, D., Tiria, F., Georges, M., Kyanya, C., Wahome, S., Mutai, W., & Musila, L. (2023). Environmental contamination across multiple hospital departments with multidrug-resistant bacteria pose an elevated risk of healthcare-associated infections in Kenyan hospitals. *Antimicrobial Resistance and Infection Control*, 12(1), 2-9. <https://doi.org/10.1186/s13756-023-01227-x>
- Pistoria, M. J. (2022). *Hospital-Acquired Infections*. MSD Manual Consumer Version. <https://www.msdmanuals.com/home/special-subjects/hospital-care/hospital-acquired-infections>
- Rath, K. C., Khang, A., & Roy, D. (2024). The Role of Internet of Things (IoT) Technology in Industry 4.0 Economy. En *CRC Press eBooks*, 1-28. <https://doi.org/10.1201/9781003434269-1>
- Robayo Botiva, D. M. (2021). *Medidas de dispersión con Microsoft Excel*. Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia. <http://hdl.handle.net/20.500.12494/41189>
- Sadrizadeh, S., Aganovic, A., Bogdan, A., Wang, C., Afshari, A., Hartmann, A., Croitoru, C., Khan, A., Kriegel, M., Lind, M., Liu, Z., Melikov, A., Mo, J., Rotheudt, H., Yao, R., Zhang, Y., Abouali, O., Langvatn, H., Sköldenberg, O., & Cao, G. (2021). A systematic review of operating room ventilation. *Journal Of Building Engineering*, 40(102693). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102693>
- Schumann, L., Lange, J., Cetin, Y., & Kriegel, M. (2023). Experimental analysis of airborne contaminant distribution in an operating room with different ventilation schemes. *Building and Environment*, 244(110783). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110783>
- Scozzina, M., Toledo, P. S., y Roatta, S. (2022). Internet de las Cosas y sistemas embebidos Smartband reminder. *Concurso de Trabajos Estudiantiles (EST 2022) - JAIIO 51 (Modalidad virtual y presencial (UAI), octubre 2022)*. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/151731>
- Sekhar, C. C., Vijayalakshmi, V. V., Sahaai, M. B., Rao, A. S., & Murugan, S. (2023). Cloud-based water tank management and control system. En *2023 Second International Conference On Smart Technologies For Smart Nation*

- (SmartTechCon) (pp. 641-646). Singapore, Singapore.  
<https://doi.org/10.1109/SmartTechCon57526.2023.10391730>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2024). *Pronóstico meteorológico* - Lima. SENAMHI.  
<https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=lima&p=pronostico-meteorologico>
- Sophonsri, A., Kelsom, C., Lou, M., Nieberg, P. y Wong-Beringer, A. (2023). Risk factors and outcome associated with coinfection with carbapenem-resistant *Klebsiella pneumoniae* and carbapenem-resistant *Pseudomonas aeruginosa* or *Acinetobacter baumannii*: a descriptive analysis. *Frontiers In Cellular And Infection Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2023.1231740>
- Souza, M., Destro, G., Vieira, B., Lima, A., Celdas, L., Hakansson, A., Darrieux, M., & Converso, T. (2022). *Klebsiella pneumoniae* biofilms and their role in disease pathogenesis. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 12, 877995. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2022.877995>
- STEEngipharm. (25 de noviembre de 2021). *¿Qué es una sala blanca? Normativa ISO 14644*. STE Engipharm. <https://www.steengipharm.com/que-es-sala-limpia-iso-14644/>
- Strohmayr, J. y Kampel, M. (2023). WiFi CSI-Based Long-Range Through-Wall Human Activity Recognition with the ESP32. En *Lecture notes in computer science*, 2023, 41-50. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-44137-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44137-0_4)
- Thalman, R. (2024). Development and Testing of a Rocket-Based Sensor for Atmospheric Sensing Using an Unmanned Aerial System. *Sensors*, 24(6), 1768. <https://doi.org/10.3390/s24061768>
- Torres Pantoja, J. L. (2019). Diseño e implementación de un sistema de control electrónico para filtros hepa en una cabina de bioseguridad clase II para el laboratorio Bermanlab de Trujillo [Trabajo de suficiencia para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico, Universidad Tecnológica del Perú]. Repositorio Institucional de la UTP. <https://hdl.handle.net/20.500.12867/3306>
- Tuon, F., Dantas, L., Suss, P., y Tasca, V. (2022). Pathogenesis of the *Pseudomonas aeruginosa* biofilm: A review. *Pathogens*, 11(3), 300. <https://doi.org/10.3390/pathogens11030300>

- Velilla Recio, J. (2021). *Diseño e implementación de un sistema de electroestimulación con fines terapéuticos*. [Tesis para obtener el grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática]. UPCommons, Portal de acceso abierto al conocimiento de la UPC, Universitat Politècnica de Catalunya. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/345629>
- VentDepot. (s. f.). *Información Técnica: Tablas de Conversión y Escalas: Factores de corrección por temperatura y altitud*. <https://enertec.es/sabes-lo-que-son-las-unidades-de-tratamiento-de-aire-utas/>
- Vera, E. (17 de abril de 2020). Coronavirus en Perú: las muertes se desbordan en el antiguo hospital de Ate. *El Comercio*. <https://elcomercio.pe/lima/sucesos/coronavirus-en-el-peru-las-muertes-se-desbordan-en-el-antiguo-hospital-de-ate-noticia/>
- Villasis, G. (25 de julio de 2020). Mueren 30 pacientes con COVID-19 por bacterias en hospital de Ate. *El Comercio*. <https://especiales.elcomercio.pe/?q=especiales/mas-muertes-en-el-hospital-de-ate-ecpm/index.html>
- Wang, Y., Xiao, M., Xia, Z., Li, P., & Gao, L. (2023). From Computer-Aided Design (CAD) toward Human-Aided Design (HAD): An isogeometric Topology Optimization approach. *Engineering*, 22, 94-105. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.07.013>
- World Health Organization. (2003). *Prevención de las infecciones nosocomiales : guía práctica*. 2.<sup>a</sup> ed. Organización Mundial de la Salud. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/67877>
- World Health Organization. (2022). *Global report on infection prevention and control*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240051164>



## Anexos

### Anexo A. Matriz de consistencia

PROBLEMÁTICA	PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	OBJETIVO GENERAL	PREGS DE INVESTIGACIÓN	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACCIONES	MARCO TEÓRICO	MARCO PRÁCTICO	EVALUACIÓN	CONCLUSIONES	RECOMENDACIONES
<p>A nivel mundial, la contaminación del aire en centros de salud es una amenaza significativa, especialmente por el riesgo de infecciones nosocomiales debido a la transmisión aérea de partículas infecciosas. Una de las principales causas es la deficiencia en los sistemas de ventilación hospitalaria. Para mitigar este problema, se recomienda un análisis exhaustivo de las estrategias de ventilación y el uso de tecnologías como purificadores de aire.</p> <p>En Lima, hospitales antiguos como el Hospital 2 de Mayo y el Loayza, con más de un siglo de antigüedad,</p>	<p>¿Como monitorear en tiempo real y controlar la cantidad de corpúsculos infecciosos en sala de operaciones de hospitales nivel III de Lima Metropolitana?</p>	<p>Desarrollar un dispositivo electrónico para el monitoreo en tiempo real y control de corpúsculos infecciosos en sala de operaciones de hospitales nivel III de Lima Metropolitana</p>	<p>¿Cuál es la situación actual de las cifras por infecciones de corpúsculos infecciosos asociadas a la atención en salud, así como los sistemas de monitoreo y control en sala de operaciones de hospitales nivel III en Lima Metropolitana?</p>	<p>Analizar la situación actual de infecciones asociadas a la atención en salud e infraestructura actual para el control y monitoreo de corpúsculos infecciosos involucrados en sala de operaciones de hospitales nivel III en Lima Metropolitana.</p>	<p>Revisar el boletín epidemiológico de Perú a partir del 2020 hasta el 2023 y la infraestructura hospitalaria en hospitales nivel III de Lima Metropolitana</p>	<p>Niveles de atención en salud *Infecciones adquiridas en atención en salud</p>	<p>Análisis de datos actuales * Evaluación de infraestructura</p>	<p>Se identificaron deficiencias críticas en la infraestructura y la falta de monitoreo continuo en hospitales nivel III, mostrando la necesidad urgente de mejoras en ventilación y sistemas de filtración.</p>	<p>La infraestructura actual de los hospitales nivel III en Lima presenta deficiencias críticas en el monitoreo y control de infecciones, aumentando el riesgo de infecciones nosocomiales.</p>	<p>Implementar un sistema integral de monitoreo continuo y mejoras en la infraestructura de ventilación y filtración en las salas de operaciones multifuncionales de los establecimientos de salud nivel III del Perú.</p>
					<p>Investigar que tipos de agentes patógenos están en el rango de 0.3 micras, así como los tipos de infecciones que producen</p>	<p>*Características y tipos de agentes patógenos en IAAS</p>				
					<p>Indagar sobre las buenas prácticas, lineamientos y protocolos para la implementación de una sala clínicamente limpia hospitalaria</p>	<p>*Ventilación por flujo laminar *filtros HEPA *normas ISO14644 *ASHRAE 170 * Lampara de radiación ultravioleta UVGI</p>				
			<p>¿De qué manera se logrará el monitoreo y control de los corpúsculos infecciosos en sala de operaciones de los hospitales de</p>	<p>Diseñar el dispositivo electrónico para el monitoreo y control de corpúsculos infecciosos en sala de</p>	<p>Realizar un análisis de requisitos</p>	<p>*Cálculo de caudal de aire, *Capacidad térmica. *Sala crítica con presión positiva. *Diseño asistido por computadora (CAD)</p>	<p>Identificar y documentar las necesidades funcionales y no funcionales del dispositivo, incluyendo los parámetros a monitorear y</p>	<p>Se desarrolló un prototipo de dispositivo con sensores multiparámetro y una interfaz intuitiva, demostrando eficacia en la</p>	<p>El diseño del dispositivo electrónico es innovador y efectivo en el monitoreo y control de corpúsculos</p>	<p>Proceder con la creación de prototipos y realizar pruebas de campo para validar la efectividad del diseño en entornos reales.</p>

<p>representan un riesgo adicional en caso de emergencias sanitarias. En 2020, un monitoreo en el hospital de Ate reveló que sus salas UCI estaban más contaminadas que el aire exterior, con presencia de bacterias peligrosas como Acinetobacter y Klebsiella. Esto derivó en infecciones graves, enmascaradas como casos de COVID-19, afectando tanto a pacientes como a personal de salud. La OMS recomienda evitar la entrada de partículas mayores a 0,3 micras en entornos hospitalarios para prevenir estas infecciones. Durante la pandemia de COVID-19, Perú registró una de las tasas de mortalidad más altas del mundo, destacando la</p>			Lima Metropolitana?	operaciones de hospitales nivel III de Lima Metropolitana.			controlar, y las condiciones ambientales de la sala de operaciones.	detección en tiempo real de corpúsculos infecciosos en pruebas preliminares de laboratorio.	infecciosos en tiempo real.		
					Desarrollar el diseño conceptual y diagrama de bloques del dispositivo		Crear esquemas y diagramas del dispositivo, definiendo la arquitectura del sistema, los módulos necesarios y las interfaces entre ellos.				
					Prototipar el diseño inicial		construcción del prototipo usando herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) y realizar simulaciones para verificar la viabilidad del diseño.				
			¿Cuáles son los componentes electrónicos adecuados para el diseño del dispositivo monitoreo y control de corpúsculos infecciosos en el prototipado?	Seleccionar los componentes electrónicos adecuados para el diseño del dispositivo de monitoreo y control de corpúsculos infecciosos.	Investigación y evaluación de componentes	*Microcontrolador ESP 32 *sensor bme 280 *sensor de polvo dust PM2.5 GP2Y1010AU0 *Celda Peltier TEC 112706	Examinar diferentes sensores, microcontroladores, y otros componentes electrónicos disponibles en el mercado que cumplan con los requisitos definidos en el diseño	Se seleccionaron componentes adecuados, incluyendo sensores precisos y microcontrolador eficientes, garantizando un balance óptimo entre rendimiento y costo.	Se seleccionaron componentes electrónicos adecuados que garantizan la precisión y durabilidad del dispositivo a un costo optimizado.	Establecer relaciones con proveedores confiables y realizar pruebas exhaustivas de los componentes para pruebas de campo.	
		Realizar pruebas de compatibilidad		Probar la integración y el funcionamiento de los componentes seleccionados en un entorno controlado para asegurar que trabajen juntos de manera eficiente.							

necesidad urgente de mejorar la calidad del aire en los hospitales. Una posible solución sería desarrollar un sistema de ventilación con tecnología IoT, capaz de medir parámetros en tiempo real y garantizar al menos 15 renovaciones de aire por hora mediante filtros HEPA y luz ultravioleta germicida, lo que permitiría mantener el aire esencialmente limpio y libre de contaminantes.					Selección y adquisición de componentes electrónicos		Evaluar el rendimiento, costo y disponibilidad de los componentes seleccionados, ajustando la selección para obtener un balance óptimo entre costo y rendimiento.								
					¿Cuáles son las acciones adecuadas del algoritmo del dispositivo electrónico para el control y monitoreo de corpúsculos infecciosos en sala de operaciones de hospitales nivel III de Lima Metropolitana?		Determinar y programar el algoritmo del dispositivo electrónico para el control y monitoreo de corpúsculos infecciosos.			Desarrollo del algoritmo de control	*Entornos de programación para microcontrolador ESP32 *Thonny Ide. *Protocolo de comunicación MQTT *almacenamiento en la nube, *Tecnología IOT	Desarrollo de algoritmos	Se desarrolló y programó un algoritmo para el procesamiento de datos en tiempo real, validado mediante simulaciones en condiciones operativas típicas.	El algoritmo desarrollado es eficiente y adaptable, permitiendo el procesamiento en tiempo real y la detección precisa de los corpúsculos infecciosos mediante la medición de los parámetros de temperatura, humedad, material particulado, intensidad de luz UV y presión.	Realizar pruebas rigurosas del algoritmo en condiciones operativas de campo y capacitar al personal técnico en su programación y ajuste.
										Programación del microcontrolador		Pasos de instalación de los drivers al esp32			
										Validación y ajuste del algoritmo		Pasos para considerar el almacenamiento en la nube y la descarga de información			
					¿Cómo validar la efectividad del funcionamiento del prototipo de monitoreo y control de corpúsculos infecciosos en sala de operaciones de hospitales nivel III de Lima Metropolitana?		Implementar y validar el prototipo de control y monitoreo de corpúsculos infecciosos.			Acoplar e integrar los componentes electrónicos del prototipo	*Ecuaciones de estadística descriptiva	pasos de ensamble, fotos, diagrama de interconexión	El prototipo se implementó en un ambiente controlado a escala mostrando el monitoreo y control basados en los estándares internacionales lo que garantizaría la reducción de IAAS.	La implementación y validación del prototipo demostraron una reducción significativa en la tasa de IAAS en un ambiente controlado a escala de una sala de operaciones basado en las normas ISO 14644 y ASHRAE 170.	Planificar las pruebas de campo para una implementación gradual del dispositivo en hospitales nivel III de Lima y lograr un sistema de monitoreo continuo para evaluar su rendimiento.
										Realizar las pruebas y control de fallas del dispositivo electrónico	*Comparación de resultados con estándares internacionales.	agregar pruebas de funcionamiento, tablas de datos			
Análisis y validación de resultados	comprar contra la media, promedio, desviación estándar, evaluación con la normativa ISO														



## Anexo C. Celda Peltier TEC 1 - 12706

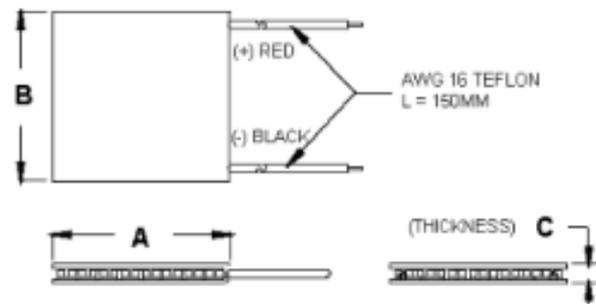


Thermoelectric  
Cooler

TEC1-12706

### Performance Specifications

Hot Side Temperature (°C)	25° C	50° C
Qmax (Watts)	50	57
Delta Tmax (°C)	66	75
I <sub>max</sub> (Amps)	6.4	6.4
V <sub>max</sub> (Volts)	14.4	16.4
Module Resistance (Ohms)	1.98	2.30



Ceramic Material: Alumina ( $Al_2O_3$ )  
Solder Construction: 138°C, Bismuth Tin (BiSn)

### Size table:

A	B	C			
40	40	3.8			

### Operating Tips

- Max. Operating Temperature: 138°C
- Do not exceed I<sub>max</sub> or V<sub>max</sub> when operating module.
- Life expectancy: 200,000 hours
- 
- Please consult HB for moisture protection options (sealing).
- Failure rate based on long time testings: 0.2%.

Copyright HB Corporation. HB reserves the right to change these specifications without notice.

Rev 2.03

## Anexo D. Sopladora de aire



**OFERTA**

### Soplador DCA AQF32 680W Ajustable

★★★★★ (No hay valoraciones aún.)

~~S/199.00~~ **S/159.00**

Soplador DCA AQF32 680W Ajustable

- 1 + **AÑADIR AL CARRITO**

f t in G+ **AÑADIR A LA LISTA DE DESEOS**

### DESCRIPCIÓN

Soplador DCA AQF32 680W Ajustable

Potencia (Watts)	680W
Velocidad sin carga	8300-16300r/min
Volumen de aire	1.6-3.2m <sup>3</sup> /min
Peso neto	1.5kg

#### INCLUYE:

- 01 Bolsa de Aire
- 01 Juego de carbones

