

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**Estudio del diseño e implementación de un sistema de pruebas para desinfección de equipos de protección personal N95 mediante radiación ultravioleta**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**AUTOR:**

Valeria Del Rosario Calderon Avellaneda

**ASESOR:**

Ing. Donato Andrés Flores Espinoza

Lima, noviembre, 2020

# Resumen

Ante el brote de enfermedades respiratorias, las mascarillas N95 se convierten en un requerimiento indispensable para la atención médica. En el 2020, la declaración de una pandemia provocada por la COVID-19 generó el desabastecimiento de equipos de protección personal para el personal de salud, entre ellos los respiradores desechables con filtro. Ante esta problemática, el Centro de Control y Prevención de Enfermedades (CDC) de Estados Unidos sugiere el uso de la radiación ultravioleta (UV) para inactivar los virus sobre las mascarillas N95. Siguiendo esta recomendación, el presente trabajo de investigación estudia el uso de la radiación UV como germicida y los desarrollos previos que utilizaron este método. De esta manera se busca conocer los requerimientos para el desarrollo de un sistema de pruebas que permita conocer la dosis UV efectiva para inactivar el virus de la COVID 19, la distancia hacia la superficie a descontaminar y el tiempo de exposición necesario.

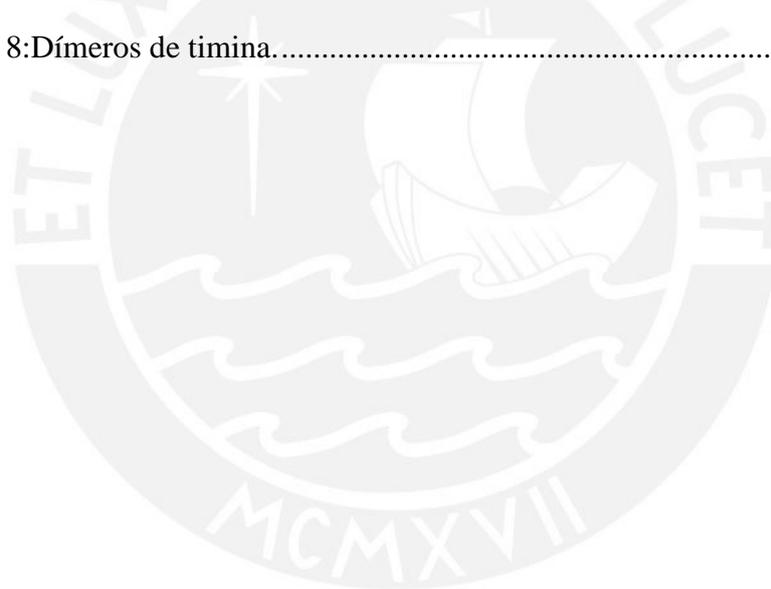
# Índice

Introducción.....	7
Capítulo 1: Marco problemático.....	8
1.1 Pandemia y problemática .....	8
1.1.1 El desabastecimiento de EPP.....	9
1.1.2 Personal de salud en el Perú .....	10
1.1.3 El respirador desechable N95 .....	11
1.2 Estado del arte .....	11
1.3 Justificación de la investigación.....	17
Capítulo 2: Marco teórico.....	19
2.1 La radiación UV en el espectro electromagnético.....	19
2.2 Principios físicos y de generación de la luz UV.....	20
2.2.1 Arranque de la lámpara .....	25
2.2.2 Salida de la radiación UV .....	27
2.3 Acción de la luz UV sobre microorganismos.....	29
2.3.1 Estructura del ADN/ARN.....	29
2.3.2 Reacción de los microorganismos frente a la UVGI.....	29
2.4 Modelamiento de la UVGI .....	30
2.4.1 Modelo de la decadencia microbiana y dosis UV .....	31

2.4.2 Comparación genética de los virus Sars – Cov .....	32
2.4.3 Determinación del tiempo mínimo de exposición.....	32
2.5 Requerimiento de componentes y materiales .....	34
2.5.1 Lámparas UV.....	34
2.5.2 Balasto .....	36
2.5.3 Material de la cabina .....	38
2.5.4 Instrumentos de medición.....	39
2.5.5 Microcontrolador.....	40
2.6 Respiradores desechables con filtro .....	40
Conclusiones.....	43
Recomendaciones y trabajos futuros .....	44
Bibliografía.....	45

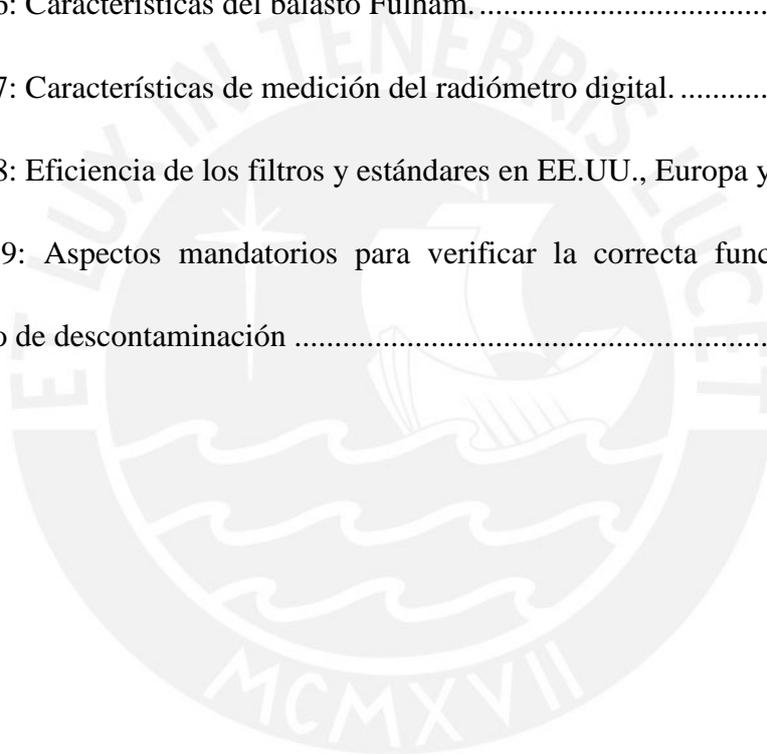
# Índice de figuras

Figura 1: Gráfica de tiempo de exposición vs. Recuperación de virus viable. ...	12
Figura 2: Diagrama de bloques del prototipo .....	13
Figura 3: Prototipo utilizado para la desinfección de mascarillas N95 .....	15
Figura 4: Diagrama de bloques de la cabina de radiación UV .....	16
Figura 5: Espectro electromagnético y división del rango UV .....	20
Figura 6: Componentes de los diferentes tipos de lámparas UV.....	22
Figura 7: Salida UV vs longitud de onda para lámparas LP y MP.....	28
Figura 8: Dímeros de timina.....	30



# Índice de tablas

Tabla 1: Características típicas de las lámparas UV. ....	21
Tabla 2: Recopilación de dosis UV para inactivación del Sars - CoV -1.....	32
Tabla 3: Significado de los identificadores de las lámparas germicidas. ....	35
Tabla 4: Listado de lámparas UV seleccionables.....	36
Tabla 5: Comparación entre balasto magnético y balasto eléctrico. ....	37
Tabla 6: Características del balasto Fulham.....	38
Tabla 7: Características de medición del radiómetro digital. ....	39
Tabla 8: Eficiencia de los filtros y estándares en EE.UU., Europa y China.. ....	42
Tabla 9: Aspectos mandatorios para verificar la correcta funcionalidad del método de descontaminación .....	42



# Introducción

A través de los años, las enfermedades altamente contagiosas dejaron clara la necesidad de un método de descontaminación para los equipos de protección personal (EPP) del personal de salud. Esto debido a la alta demanda que se presenta dentro de los centros de salud. La pandemia provocada por la COVID-19 durante el 2020, propició la escasez de mascarillas N95 en distintos países. Debido a la dificultad de acceso a estos EPP, el personal de salud se vio vulnerable a contraer la enfermedad.

Como medida de solución ante el desabastecimiento, distintas investigaciones utilizan la radiación UV como método para inactivar virus y bacterias sobre la superficie de diferentes marcas de mascarillas N95. Estos experimentos tienen la finalidad de encontrar la dosis UV que inactive un microorganismo específico, como por ejemplo el virus de la gripe H1-N1 o el virus Sars-Cov, anterior al coronavirus responsable de la COVID-19. Este procedimiento de descontaminación permite reutilizar las mascarillas sometidas a la radiación UV.

El presente estudio busca conocer los parámetros necesarios para el desarrollo de un equipo de pruebas que permita descubrir, a través de múltiples ensayos, la dosis UV adecuada para inactivar el virus Sars-Cov-2, causante de la COVID-19. Con dicha finalidad, el capítulo uno aborda el estado del arte de los desarrollos previos probados sobre mascarillas N95. En el segundo capítulo se desarrolla la teoría de la radiación germicida UV y se presentan las ecuaciones para el cálculo de la dosis. Finalmente se exponen las conclusiones y recomendaciones.

# Capítulo 1: Marco problemático

El presente capítulo expone el desabastecimiento de equipos de protección personal ocasionado por la pandemia producida por la enfermedad COVID-19. Además, muestra los estudios previos respecto al uso de métodos de descontaminación. Finalmente, se tienen la justificación y los objetivos del presente trabajo de investigación.

## 1.1 Pandemia y problemática

El 11 de marzo del 2020, durante una rueda de prensa, la Organización Mundial de la Salud, declara una pandemia global provocada por el coronavirus SARS-CoV-2 que produce la enfermedad conocida como COVID-19, la cual se caracteriza por los síndromes respiratorios que ocasiona. Esta delimitó un antes y un después en la vida cotidiana. Desde que se reportó el primer caso hasta pasados los primeros tres meses del 2020, el número de muertes seguía creciendo alrededor del mundo [1][2].

Un solo paciente con COVID-19 confirmado puede contagiar alrededor de 6 personas más, por lo que la rápida propagación y los viajes internacionales generaron que la enfermedad llegara a distintos países, en los cuales se empezaron a presentar problemas de desabastecimiento. Surgió la necesidad de contar con más espacios para la atención a pacientes, camas de cuidados intensivos, ventiladores mecánicos y afloró la falta de equipos de protección personal (EPP) suficientes para proteger a los profesionales de la salud [2].

### 1.1.1 El desabastecimiento de EPP

Un artículo del “*American Journal of Infection Control*” menciona que suponiendo que el 20% a 30% de la población de EE.UU. se enfermara en una pandemia de influenza, se requerirían entre 1.7 mil millones a 7.3 mil millones de respiradores desechables N95. Esta estimación hace evidente la necesidad urgente de respiradores con filtro para evitar la propagación del virus y proteger a los agentes en primera línea: el personal de salud. Frente a esta situación, el Centro de Control y Prevención de enfermedades (CDC) de EE.UU. sugiere la descontaminación de los EPP para su reutilización ante un posible desabastecimiento de estos, pese a que los respiradores desechables son de único uso [3]. Los protocolos tomados para contener la propagación de la enfermedad como la paralización de ciertos sectores de producción, el cierre de fronteras en algunos países y la compra de respiradores desechables por el público en general, provocaron una escasez de las mascarillas N95 [4][5].

El 5 de marzo del 2020 se realizó una encuesta en EE.UU., en la cual el sindicato Nacional de Enfermeros Unidos informó que solo un 30% de una cantidad aproximada de 6500 encuestados respondió que sus organizaciones tenían suficientes EPP para afrontar el aumento de pacientes y un 38% desconocía si se contaba con el inventario necesario [6].

En Italia, se experimentaron altas tasas de infección y muertes del personal de salud en sus propios centros de atención debido al limitado acceso al uso de equipos de protección. La falta de estos materiales pone en peligro el sistema de salud, ya que no

es únicamente el personal el que queda desprotegido, sino también son los pacientes atendidos a diario en los centros de emergencias quienes quedan vulnerables. Esta problemática sumada a la falta de ventiladores mecánicos puede desembocar en la misma situación que se vivió en ese país, cuando los médicos debían decidir quien recibe atención y quien no [5].

Ante este suceso, los médicos y enfermeras solicitan se estudie un método de solución, ya sea la descontaminación o el cambio de material usado para la fabricación de mascarillas con la finalidad de que sean reutilizables. Además, el uso y la producción masiva de respiradores desechables es un factor de incremento de la contaminación ambiental. Añadiendo este motivo, la pronta búsqueda de soluciones de desinfección y reutilización se vuelve un tema más urgente [6].

### **1.1.2 Personal de salud en el Perú**

Durante los meses en los que se desarrolló la cuarentena nacional, la precariedad del sistema de salud se hizo notoria. Lo cual se ha evidenciado en los distintos medios de comunicación nacionales e internacionales [7][8].

A las afueras de distintos centros de salud, se registraron protestas del personal debido a la falta de EPP, en las cuales se resaltó la escasez de mascarillas. “Hacen falta mascarillas simples, mascarillas N95. Usamos mascarillas N95 que reciclamos, que lavamos en casa”, comenta la médica Norma Trujillo, jefa de residentes de Medicina Interna del Hospital Regional de Loreto en su declaración para BBC mundo. No solo evidencia la falta de respiradores desechables, sino también da a conocer que reutilizan

los equipos que tienen, luego de lavarlos. Este método es ineficiente, ya que puede reducir o anular la efectividad del filtro de la mascarilla [4] [8].

Según el lineamiento 6 de la resolución del Ministerio de Salud del Perú (MINSA) emitida el 7 de abril del 2020, se dispondrá de personal de salud suficiente para poder atender emergencias de COVID -19. Es decir, son ellos quienes realizan las pruebas de descarte y tratan a los pacientes, por lo cual tienen contacto con gran cantidad de personas. Considerando los datos mencionados anteriormente que sugieren que al menos 6 personas contraen la enfermedad por estar en contacto con un portador del virus, es importante proteger a médicos y enfermeros con los equipos adecuados, ya que ellos son necesarios para la recuperación de los pacientes [9].

### **1.1.3 El respirador desechable N95**

Según la recomendación V.D.4.a. y V.D.4.a.i. del CDC se debe usar un respirador N95 o de mayor nivel al entrar a la habitación o tener contacto con un paciente con enfermedades respiratorias, con la finalidad de prevenir la inhalación de partículas infecciosas. Este respirador desechable (N95) puede filtrar hasta el 95% de partículas del aire. La norma que lo regula es la 42 CFR 84, aprobada por el Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) en EE.UU. [10].

## **1.2 Estado del arte**

En el 2003 se dio el primer brote de SARS, enfermedad provocada por el Sars-Cov, antecedente al Sars-Cov-2. Para la fecha, la OMS sugirió que se hiciera uso de laboratorios con protocolos de bioseguridad nivel 3 para el estudio del virus, lo cual

motivó la investigación de distintos métodos de inactivación de virus para hacer más seguro el lugar de trabajo. Entre los métodos estudiados se encuentran la desinfección con radiación UV y radiación gamma. Los resultados fueron que la radiación UV presentó mayor efectividad de inactivación que la radiación gamma, como se puede apreciar en la figura 1. Además, se comprobó que los rayos UV-C tienen mayor efectividad que los rayos UV-A durante una exposición de 15 minutos [11].

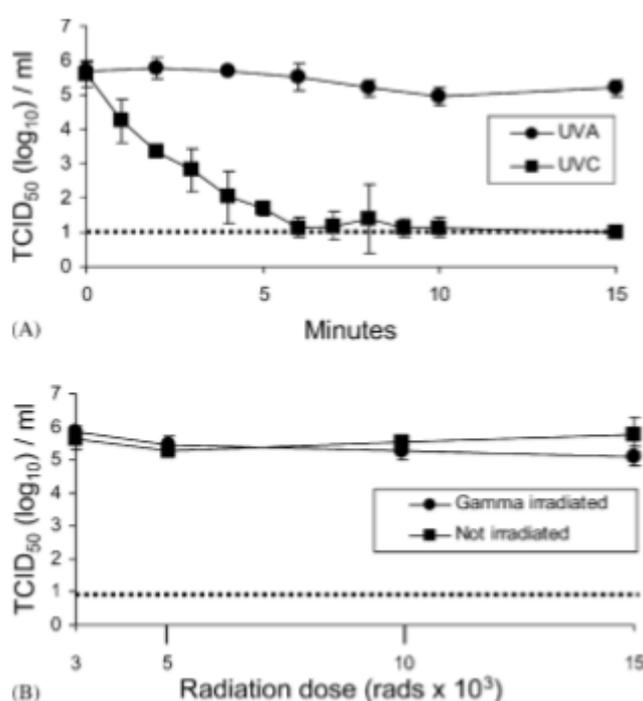


Figura 1: (A) Gráfica de tiempo de exposición vs. Recuperación de virus viable. (traducido al español)  
 (B) Gráfica de radiación gamma vs. Recuperación de virus viable (traducido al español) [10]

Para el 2007, un artículo reconoce que la radiación UV es un método efectivo para inactivar microorganismos. Esta investigación tenía como propósito demostrar la efectividad de la radiación UV como germicida, aplicándolo sobre superficies. Para ello, evalúa sus efectos sobre virus con distintos tipos de ácidos nucleicos. Se usaron para el experimento, lámparas UV con una radiación de longitud de onda pico de 253.7 nm.

Estas se ubicaron a 30.5 cm sobre la superficie de la placa a desinfectar. Se midió la radiación UV con un radiómetro, a lo que se sumó un sensor de 254 nm (la construcción de la cabina se puede apreciar en la figura 2). Finalmente, quedó demostrado que cada tipo de virus necesita una dosis diferente de radiación UV y; además, la humedad relativa (RH) guarda relación con la eficacia del método. La susceptibilidad del virus a la radiación ultravioleta se vio comprometida con la RH aplicada, ya que la cantidad de agua absorbida por la superficie a medida que el porcentaje de RH aumentaba, era mayor. Esto brindaba protección al virus ante el método utilizado. En adición, se hace la observación de que los microorganismos crecen en grietas, por lo que al usar este método se debe tener especial cuidado con las sombras sobre superficies [12].

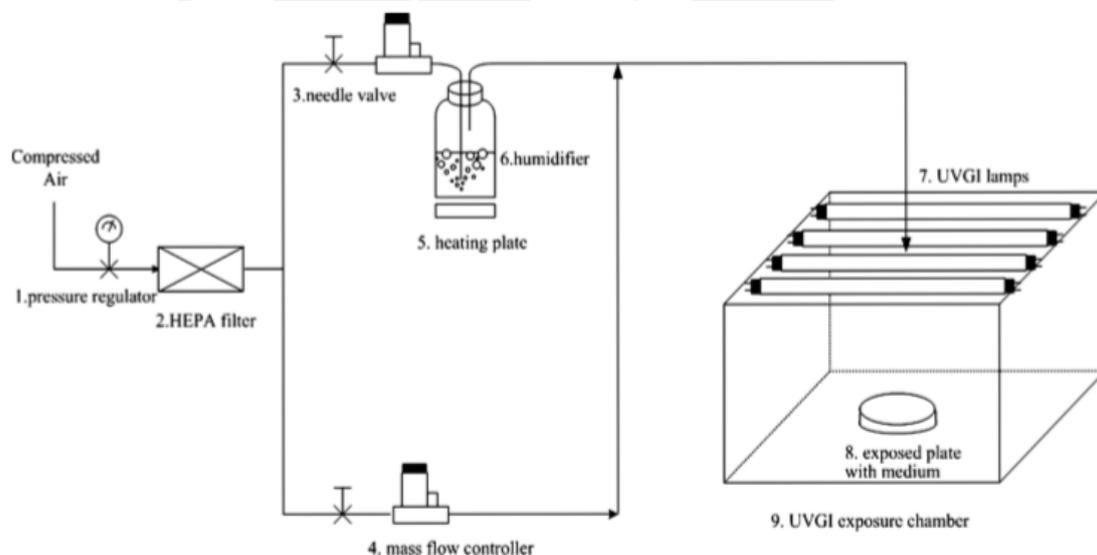


Figura 2: Diagrama de bloques del prototipo implementado: 1. Regulador de presión, 2. Filtro de aire de alta eficiencia (HEPA), 3. Válvula aguja, 4. Controlador de flujo de masa, 5. Plato de calor, 6. Humidificador, 7. Lámparas de irradiación germicida ultravioleta (UVGI), 8. Placa con la muestra, 9. Cabina de exposición UVGI [12]

En el 2015, se hizo un estudio comparativo para dos métodos de desinfección UV: con lámparas de xenón (PX-UV) y con lámparas de mercurio (UV-C). Ambos experimentos fueron realizados a 122 cm de distancia de la superficie a desinfectar y

con un tiempo de exposición de 10 minutos. Estos se realizaron en habitaciones de distintos hospitales con diferentes dispositivos controlados remotamente. Se encontró que con la radiación UV-C se obtuvo una reducción de virus mayor a la que se generó con la radiación PX-UV. Además, se comprobó que la efectividad de la radiación UV en ambos casos, disminuía a medida que se aumentaba la distancia hacia el objetivo [13].

Si bien la radiación UV es un método de desinfección propicio, esta también es capaz de degradar polímeros, lo que provocaría un deterioro del objeto expuesto. Por este motivo, durante el año ya mencionado, se desarrolla un análisis sobre el efecto que tiene este método de desinfección sobre las mascarillas N95. Fueron utilizados 4 respiradores N95 de diferentes marcas, a los cuales se expuso a dosis UV de [120-950] J/cm<sup>2</sup>. Luego se hicieron pruebas de penetración de partículas, resistencia al flujo de aire y fuerza de ruptura de las correas de las mascarillas, con la finalidad de comparar los resultados entre las condiciones iniciales y las halladas luego del experimento. Los resultados indicaron que incrementó la penetración de partículas hasta en 1.25% y el impacto no fue significativo para la resistencia al flujo. Sin embargo, las correas del respirador perdieron su fuerza hasta en más del 90% cuando fueron expuestas a la dosis de 920 J/m<sup>2</sup>. Como conclusión, los investigadores aseguran que la descontaminación con rayos UV para respiradores desechables puede ser utilizada, mientras se limiten la cantidad de ciclos de desinfección y la dosis UV de acuerdo a la marca de estos [14].

En el año 2018, se realizó una investigación de desinfección con luz UV posteriormente publicada en el “*American Journal of Infection Control*”. En esta se

determina que la aplicación de dosis UV más eficiente para la inactivación de virus sobre la superficie de una mascarilla tipo N95 es de  $1\text{J}/\text{cm}^2$  aplicada durante 1 minuto. Para la experimentación se hace uso del virus artificial de la influenza H1N1, este es inoculado en 15 mascarillas N95 de distintas marcas. Los resultados fueron los siguientes: las superficies de 12 de las 15 mascarillas fueron desinfectadas satisfactoriamente. Entre las tres que no obtuvieron los mejores resultados, se observó que el virus inoculado había sido absorbido por la superficie hidrofílica de las mascarillas y estas contaban con pliegues, dificultando la exposición completa a la radiación UV. En la figura 3 se puede observar el prototipo utilizado para el experimento. Este utiliza lámparas UV que irradian  $0.39\text{ W}/\text{cm}^2$  y tienen una longitud de onda de  $254\text{nm}$ , lo cual corresponde a la radiación tipo UV-C. Además, cuenta con un sistema de control de humedad y temperatura, y un sistema de ventilación. El método utilizado sigue las recomendaciones del NIOSH, por lo tanto, se tomaron todas las precauciones necesarias para mantener la integridad del EPP [3] [10].

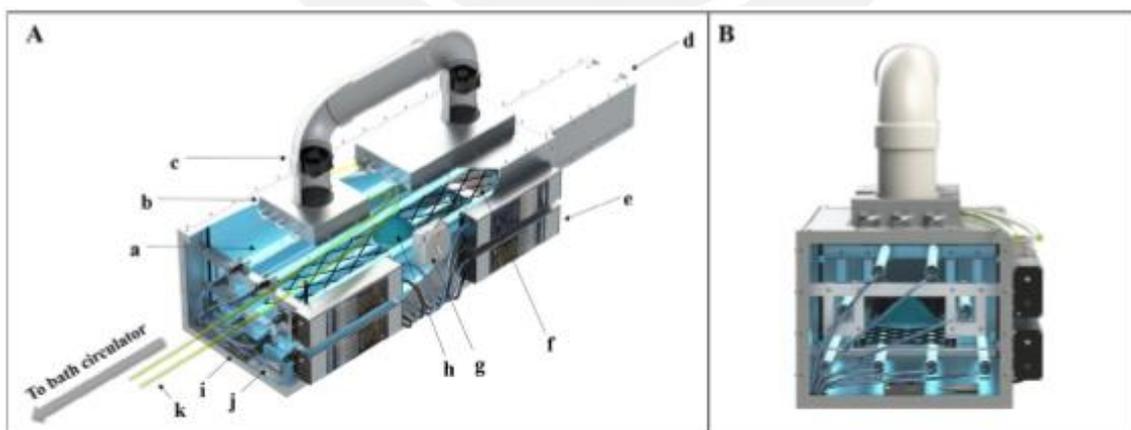


Figura 3: Prototipo utilizado para la desinfección de mascarillas N95 [3]

Como una alternativa más, en el mismo año, se hicieron pruebas con lámparas UV de  $222\text{nm}$ . Para este experimento se utilizó un aerosol que contenía el virus de la

influenza H1N1. En la figura 4, se puede observar el diagrama de bloques de la cabina de radiación UV. Para su construcción se utilizaron bombas, las cuales servían para presurizar el nebulizador que generaría el aerosol. Además, estas servían para controlar el flujo a través del sistema. Se incluyeron filtros de partículas en el aire de alta eficiencia (HEPA por las siglas en inglés) en las entradas y salidas de aire. La ventana de salida, por donde se emitía la luz de las lámparas, contaba con un filtro pasa banda que descartaba las ondas que no tenían una longitud de 222nm. Se utilizó para la calibración de la onda un espectrómetro UV para garantizar que esta siempre tenga la longitud de onda deseada. Al final del prototipo, se encontraba un recolector de muestras biológicas. Los virus atravesaban la cabina de forma horizontal, mientras eran expuestos a la radiación UV. Finalmente, el bio recolector tomó las muestras finales para las respectivas pruebas, en las cuales se reportó que las lámparas eran capaces de inactivar el virus de la influenza H1N1. Además, se reveló, que esta longitud de onda no causa daños severos a la piel u ojos [15].

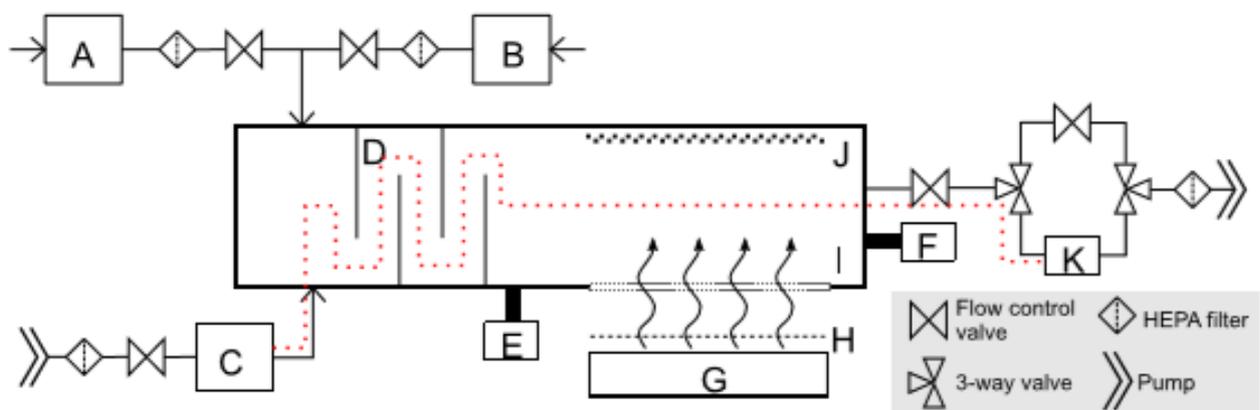


Figura 4: Diagrama de bloques de la cabina de radiación UV. (A) Creador de burbujas de agua para humedecer entrada de aire, (B) entrada de aire seco, (C) nebulizador, (D) deflectores, (E) medidor de temperatura, (F) medidor de partículas, (G) lámparas UVC, (H) filtros pasa banda, (I) ventana por donde atraviesa la luz UV, (J) superficie de aluminio que refleja la onda, (K) muestreador de partículas. La línea punteada en color rojo indica el movimiento de las partículas [15]

Según el CDC, los métodos más prometedores para la desinfección de mascarillas son el peróxido de hidrógeno vaporoso, la irradiación germicida ultravioleta y el calor húmedo. En el 2020, estos métodos son llevados a cabo experimentalmente para conocer su efectividad. Un estudio realizado durante el mismo año concluye que el peróxido de hidrógeno vaporoso es rápido, efectivo y conserva la integridad de la mascarilla. La radiación UV elimina los virus gradualmente; sin embargo, mantiene considerablemente el respirador y puede utilizarse hasta 3 veces. El calor húmedo inactiva los microorganismos a casi la misma velocidad que la radiación UV, pero este método solo puede ser aplicado 2 veces como máximo, ya que si se sobrepasa esa cantidad de veces, la forma del EPP puede verse afectada [4][16].

### **1.3 Justificación de la investigación**

Anteriormente, según distintos estudios, había quedado demostrada la necesidad de buscar soluciones que inactiven los virus en ambientes médicos y equipos de protección personal durante brotes de enfermedades altamente contagiosas por medio de vías respiratorias. Ante la aparición del virus Sars-Cov-2, el rápido esparcimiento de la enfermedad causada por este, COVID-19, provocó una pandemia de carácter mundial. La cantidad de contagios vulnerabilizó los sistemas de salud en distintos países y puso en grave peligro a los trabajadores de salud. Lo cual motivó e hizo necesaria la investigación de métodos de desinfección del virus, como se propuso en los distintos artículos que contienen los desarrollos mencionados anteriormente. Como alternativas, el CDC sugiere 3 métodos de desinfección eficientes, entre ellos el estudiado en el

presente trabajo de investigación: la inactivación de virus mediante radiación UV en equipos de protección personal [3][4][5][11][14].



## **Capítulo 2: Marco teórico**

El capítulo a continuación explicará la teoría detrás del funcionamiento de las lámparas UV y su aplicación germicida. Se darán a conocer las fórmulas matemáticas que se requieren para hallar la dosis UV que se debe aplicar la inactivación de microorganismos.

### **2.1 La radiación UV en el espectro electromagnético**

La radiación UV se encuentra en la región del espectro electromagnético limitada entre 100 nm y 390 nm. Se puede apreciar la división de este rango en la figura 5. Este lo conforman la UV de vacío (100 nm – 200 nm), la cual es rápidamente absorbida por el aire; radiación UV-C (200 nm – 280 nm), esta es utilizada comúnmente como germicida; UV-B (280 nm – 320 nm), también funciona como germicida con un nivel menor de eficiencia que la UV-C; UV-A (320 nm – 380 nm), es débilmente absorbida por el ADN y ARN, por lo que es menos efectiva que la UV-B y UV-C y se necesitaría un mayor tiempo de exposición para que tenga efecto descontaminante. Por los motivos expuestos, solamente la radiación UV-C y la UV-B son consideradas radiación germicida ultra violeta, UVGI por sus siglas en inglés y como se les denominará más adelante en el presente documento. La radiación UV-A no es considerada como UVGI debido a su baja efectividad. Sin embargo, la acción germicida tiene sus pico en 260 nm, cuya base teórica se expondrá en el presente capítulo [17][18][19].

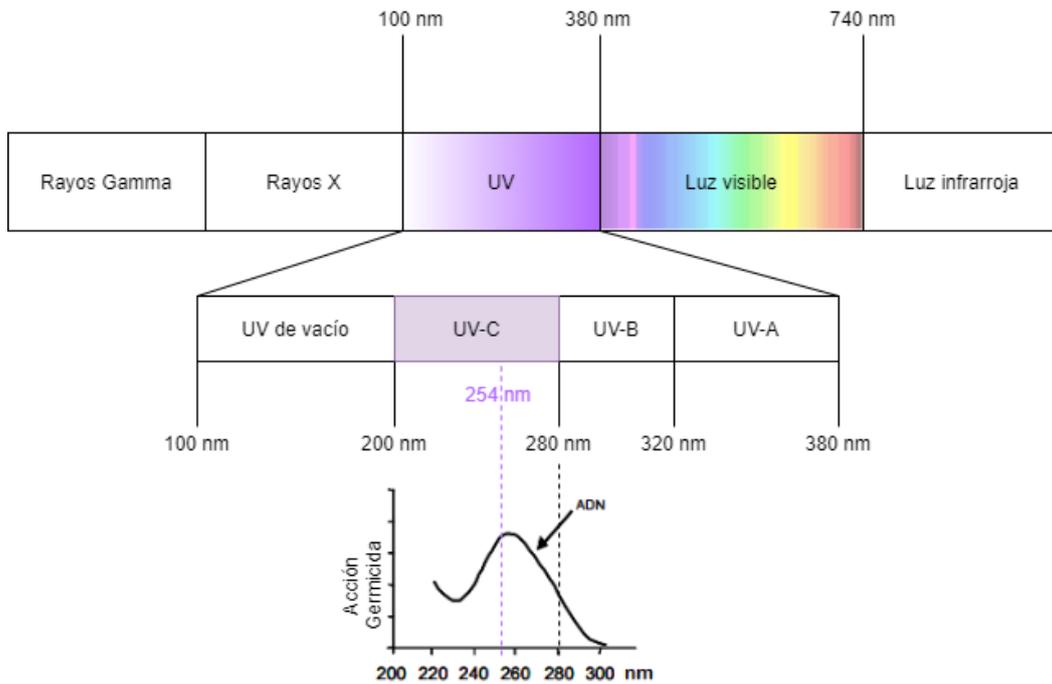


Figura 5: Espectro electromagnético y división del rango UV. Adaptado [17][18].

## 2.2 Principios físicos y de generación de la luz UV

La lámpara UV es el elemento más crítico en un sistema UVGI. De esta depende la generación de luz UV artificial que tenga la longitud de onda y potencia deseadas, las cuales permitirán desinfectar correctamente la superficie en cuestión.

Existen varios tipos de lámparas UV para aplicaciones de desinfección de superficies: Las lámparas UV estándar de presión media (MP) que producen longitudes de onda UVC y/o UVB de banda ancha, las lámparas UV de baja presión (LP) que producen radiación UVC de banda estrecha y diodos emisores de luz (LED). En la tabla 1 se presentan 3 tipos de lámparas UV con recubrimiento de vidrio, las cuales son más comunes en el mercado y han sido utilizadas durante años para la descontaminación del agua. Para esta aplicación, se usan típicamente las lámparas LP que producen solo

longitudes de onda UVC, descartando las lámparas MP, que, a diferencia de las LP, producen longitudes de onda UVC o UVB de banda ancha [19].

Tabla 1: Características típicas de las lámparas UV. Adaptado [17] [18].

Parámetro	Baja Presión (LP)	Baja Presión Alto rendimiento (LPOH)	Presión media (MP)
Luz germicida UV	Monocromático en 254 nm	Monocromático en 254 nm	Policromático, incluye rango germicida (200 – 300 nm)
Presión de vapor de mercurio (Pa)	Aproximadamente 0.93 (1.35x10 <sup>-4</sup> psi)	0.18 – 1.6 (2.6x10 <sup>-5</sup> – 2.3x10 <sup>-4</sup> psi)	40 000 – 4 000 000 (5.8 – 580 psi)
Temperatura de funcionamiento (°C)	Aproximadamente 40	60 – 100	600 – 900
Entrada eléctrica [vatios por centímetro (W/cm)]	0.5	1.5 – 10	50 – 250
Salida de UVGI (W/cm)	0.2	0.5 – 3.5	5 – 30
Eficiencia de conversión eléctrica a UVGI (%)	30 – 31	30 – 35	10 – 20
Longitud de arco (cm)	10 – 150	10 – 150	5 – 120
Número relativo de lámparas necesarias para una dosis dada	Alto	Intermedio	Bajo
Tiempo de vida [horas(h)]	8000 – 10 000	8000 – 12 000	4000 – 8000

Las lámparas UV de baja presión tienen similitudes con las lámparas fluorescentes, ambas son lámparas de descarga de mercurio de baja presión y también necesitan balastos para su activación. Las lámparas LP consisten en un envase hecho de vidrio de cuarzo u otro vidrio transmisor de UV, un par de electrodos en ambos extremos y una amalgama de mercurio, la cual es una aleación de mercurio con otro elemento, como el indio o el galio. Esta diferencia entre los distintos componentes de las lámparas UV se presenta en la figura 6 [19].

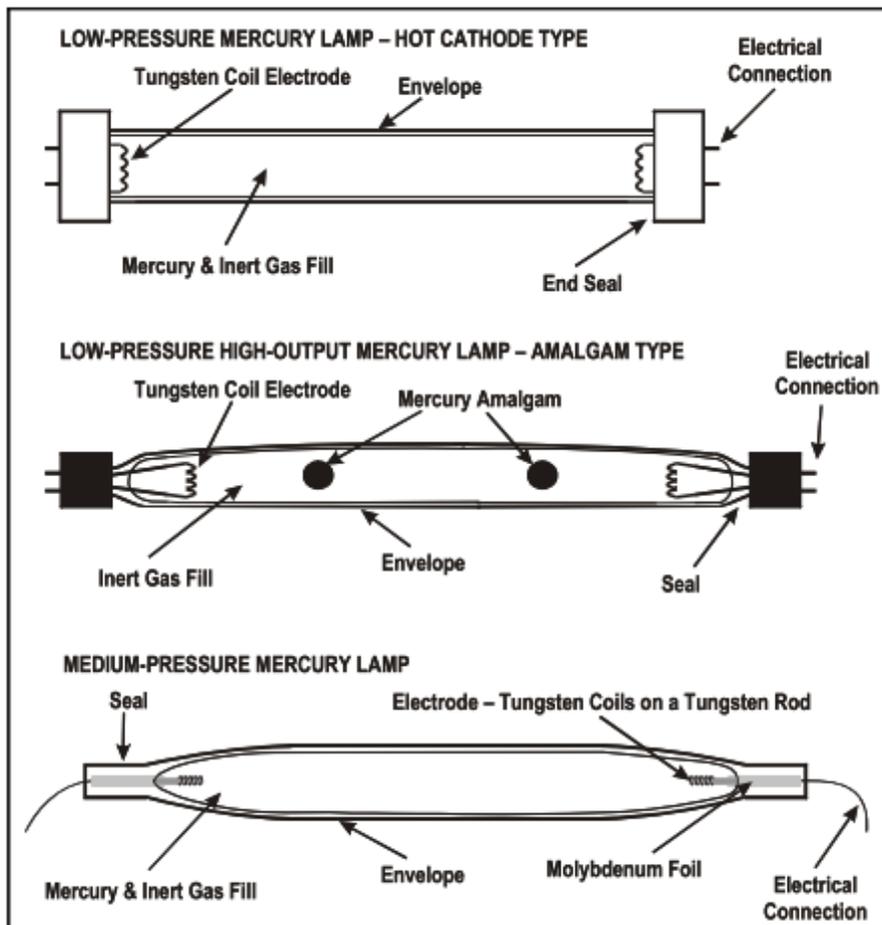


Figura 6: Componentes de los diferentes tipos de lámparas UV [17].

## LED UV

Los diodos emisores de luz (LED) UV tienen mayores ventajas sobre las lámparas de vidrio. Estos son más pequeños y no requieren de un balasto para su arranque, esto les permite ubicarse en espacios reducidos donde una lámpara no puede instalarse. Además, estos dispositivos no utilizan mercurio, lo que evita el riesgo de generación de ozono que presentan algunas lámparas UV. Los LED utilizan semiconductores P-N polarizados directamente, los cuales generan un flujo de electrones que emanan energía en forma de luz. La potencia de salida que generan está en el rango de mW para los Deep-UV LED. Sin embargo, estos se pueden instalar en conjuntos de gran cantidad para generar la potencia suficiente para la desinfección. Adicionalmente, los LED UV

pueden generar una longitud de onda entre 265nm y 270nm, lo cual resulta ideal para la inactivación de microorganismos según lo que se explicará en la sección 2.2 del presente capítulo. A pesar de las ventajas que posee esta tecnología, aún no existen estándares regulatorios dentro de la industria de fabricación, a diferencia de las lámparas germicidas con las que ya se vienen trabajando en proyectos de descontaminación del agua durante años [18][19].

### **Carcasa de la lámpara**

La carcasa de la lámpara está diseñada para transmitir luz ultravioleta germicida, actuar como un aislante eléctrico y no reaccionar con los gases dentro de esta. Comúnmente se usa un tubo no cristalino, hecho de cuarzo, debido a su resistencia a las altas temperaturas. La transmitancia UV (UVT) del material, que es el porcentaje de luz que pasa a través de este, afecta la salida espectral de las lámparas, especialmente el de las lámparas MP en longitudes de onda más bajas. Debido a esto, la carcasa de la lámpara puede estar hecha de cuarzo dopado, el cual se altera para absorber longitudes de onda específicas y evitar reacciones fotoquímicas indeseables. El revestimiento tiene un grosor aproximado de 1 a 2 milímetros (mm) [17].

### **Electrodos**

El diseño y la operación de los electrodos son importantes para el funcionamiento confiable y duradero de las lámparas. Los electrodos provocan la transferencia de calor para que las lámparas funcionen a la temperatura correcta. Los electrodos en las lámparas LP están conformados por una bobina de alambre de tungsteno incrustado con óxidos de calcio, bario o estroncio. En las lámparas MP, los electrodos tienen una composición distinta, estos consisten en una varilla de tungsteno envuelta en una bobina

de alambre del mismo material. Las lámparas UV pueden tener uno de los dos tipos de cátodos: cátodos calientes o cátodos fríos. Los cátodos fríos son de arranque instantáneo, permiten un arranque frecuente sin afectar la vida útil de la lámpara y mantienen un alto rendimiento. La caída de voltaje en el cátodo frío es mayor que con las lámparas de cátodo caliente, lo que produce una mayor pérdida de potencia y, por ende, una menor eficiencia. Las lámparas de cátodo caliente utilizan filamentos de tungsteno en espiral impregnados con materiales que emiten electrones en cada extremo. Estos son los que se utilizan para la fabricación de las lámparas LP. Tienen una eficiencia general más alta que las lámparas de cátodo frío. Estos son los más utilizados en aplicaciones germicidas [17][19].

#### **Relleno de mercurio**

El relleno de mercurio presente en las lámparas UV puede estar en fase sólida, líquida o de vapor. Las amalgamas se usan típicamente en lámparas de baja presión y alto rendimiento (LPOH), mientras que las lámparas LP y MP contienen mercurio líquido. A medida que las lámparas se excitan, aumenta la presión de vapor del mercurio. Las lámparas LP y LPHO funcionan a temperaturas más bajas, por lo tanto, tienen presiones de vapor de mercurio más bajas que las lámparas MP. En las lámparas MP, la concentración de mercurio en la fase de vapor está limitada por la cantidad de mercurio en la lámpara. En las lámparas LPHO, se coloca un excedente de mercurio y la cantidad de este elemento que ingresa a la fase de vapor está controlada por una amalgama unida al revestimiento de la lámpara, un punto frío en la pared de esta o una cámara de condensación de mercurio ubicada detrás de cada electrodo [17].

### **Llenado de gas inerte**

Además del mercurio, las lámparas se llenan con un gas inerte, generalmente argón. Este ayuda a iniciar la formación del arco eléctrico y reduce el deterioro del electrodo. La presión de vapor del argón tiene un rango de valores entre [0.02 – 1] psi [17].

### **Balasto**

El balasto realiza dos funciones: proporcionar el pulso de voltaje de arranque para ionizar el gas en el tubo de la lámpara UV y limitar la corriente. Este aparato proporciona el alto voltaje inicial requerido para crear el arco de arranque, y luego limita la corriente para controlar la temperatura del gas y, por ende, la presión del vapor de mercurio. Los balastos pueden ser magnéticos o electrónicos. El factor de balasto (BF) es un término que especifica el porcentaje de potencia nominal de la lámpara que se requerirá cuando la lámpara se opere con un balasto comercial particular. Un factor BF del 95% significa que la lámpara producirá aproximadamente el 95% de su potencia nominal cuando se utilice ese balasto. Las eficiencias de diferentes balastos se comparan con el factor de eficiencia del balasto (BEF). El BEF se define como la relación de BF con la potencia de entrada en vatios en porcentaje [19].

#### **2.2.1 Arranque de la lámpara**

Existen tres tipos de arranques: arranque de precalentamiento, arranque instantáneo y arranque rápido. Las lámparas germicidas de precalentamiento utilizan precalentamiento eléctrico para excitar electrones e ionizar el gas. Esto genera el voltaje necesario para producir el arco. El proceso de precalentamiento, puede demorar unos

segundos. Después de precalentar los cátodos, un temporizador apaga el precalentador y se aplica el voltaje generado entre los cátodos para crear el arco. Con la lámpara funcionando, el arco se encarga de mantener la temperatura del cátodo. Las lámparas de arranque instantáneo, también llamadas lámparas de arranque en frío, son capaces de funcionar a varias intensidades de corriente, dependiendo de los balastos que se usen, lo que hace que estas lámparas tengan un rango de potencias nominales, en lugar de una sola. Las lámparas de encendido instantáneo funcionan sin precalentador o arrancador. Dado que el precalentamiento es innecesario, solo se necesita un balasto en cada extremo de la lámpara. Las lámparas de arranque rápido utilizan electrodos de baja o alta resistencia que se calientan frecuentemente. Esto se logra a través de devanados de baja tensión integrados en el balasto. El voltaje de arranque es similar al de las lámparas de precalentamiento y generalmente comienzan a funcionar en aproximadamente 1 s. Los balastos de arranque rápido son más reducidos, menos costosos y tienen una pérdida de potencia menor que los balastos de arranque instantáneo.

Al encender la lámpara, se produce una serie de eventos para generar un arco voltaico, el cual permitirá finalmente el rango longitud de onda deseado. El inicio del arco en una lámpara de encendido instantáneo depende de la aplicación de un alto voltaje (400–1000 V). Los balastos se encargan de proporcionar el voltaje de arranque que requieren los electrodos y la corriente adecuada para el funcionamiento continuo de lámpara. Los primeros electrones, que son emitidos a través del electrodo, se estrellan con los átomos del gas inerte dentro del tubo. Esto calienta el vapor de

mercurio, haciendo que el gas se ionice. De esta manera la corriente empieza a fluir, calentando el gas. El gas caliente permite que el mercurio se vaporice, es entonces que las colisiones entre este último y los electrones hacen que se alcance uno de los estados excitados del mercurio. A medida que el mercurio cambia del estado excitado al estado fundamental, se libera energía, la cual provoca la emisión de luz ultravioleta visible en el rango de la longitud de onda mencionada anteriormente. Este rango depende de la composición de los gases encerrados y la potencia que entrega la lámpara. La diferencia con las lámparas fluorescentes es que en ellas el vidrio está recubierto por dentro con fósforo que absorbe los rayos UV y emite la energía como luz visible. En las lámparas UV, no hay fósforo, y el vidrio, generalmente vidrio de cuarzo, no impide el paso de las longitudes de onda UV. El vidrio de cuarzo es capaz de absorber una pequeña fracción de la luz incidente y convertirla en calor [17][19].

El arranque frecuente puede acelerar el fin de la vida útil de la lámpara. Este se alcanza cuando el recubrimiento desaparece por completo de alguno de los electrodos [19].

### **2.2.2 Salida de la radiación UV**

La luz que emiten las lámparas LP es sustancialmente monocromática a la longitud de onda de 253.7 nm, lo cual se encuentra dentro del rango UV y está cerca del máximo del espectro de acción microbiana (260 nm). Estas lámparas también emiten pequeñas cantidades de luz en rangos de [185, 313, 365, 405, 436, 546] nm, debido a la transición de electrones de mercurio de mayor energía. La longitud de onda

de 185 nm producida por la lámpara, provoca la formación de ozono, el cual es corrosivo y tóxico para los seres vivos. Las lámparas LP y LPHO utilizadas en aplicaciones de desinfección de agua son fabricadas específicamente para reducir la producción a 185 nm, las cuales se pueden utilizar para otro fin germicida. En la figura 7, se puede apreciar la diferencia de longitudes de onda que emite cada tipo de lámpara, dejando en evidencia que las lámparas LP tienen una menor variación de este parámetro, lo cual las hace más eficientes para fines germicidas [17][19].

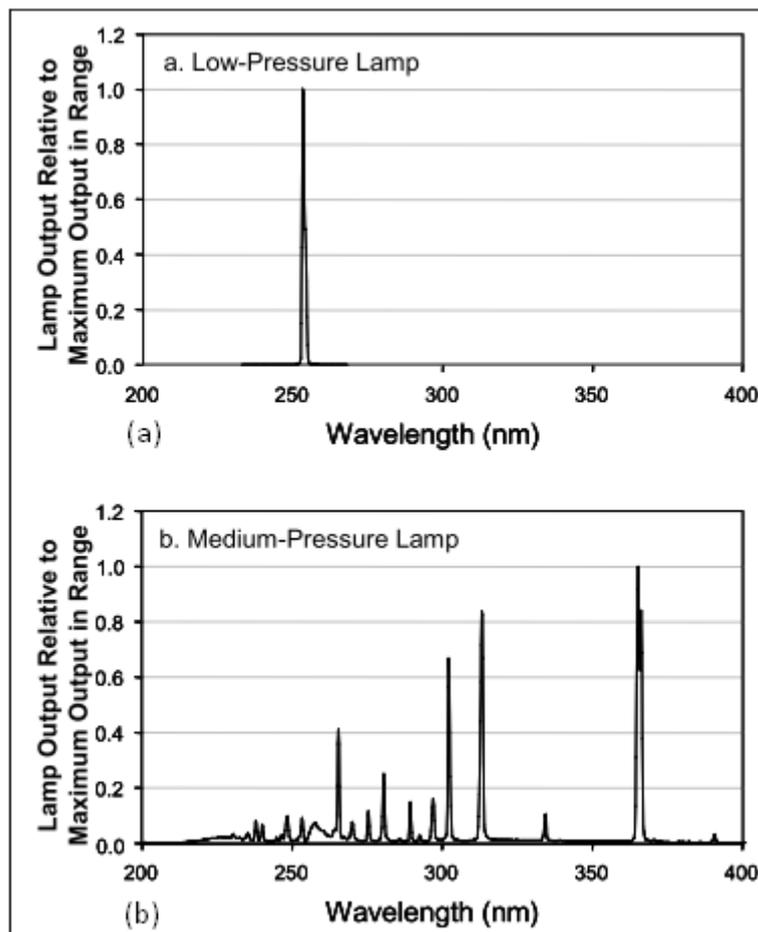


Figura 7: Salida UV vs longitud de onda para lámparas LP (a) y lámparas MP (b) [17].

## **2.3 Acción de la luz UV sobre microorganismos**

La luz UV inactiva los microorganismos al causar cambios fotoquímicos en su ácido nucleico, evitando que estos se repliquen. Un microorganismo, ya sea virus o bacteria, que no puede replicarse no es capaz de infectar a un huésped. Es decir, al exponer a los microorganismos a la dosis adecuada de UV, estos perderán la propiedad de infectar células vivas [17].

### **2.3.1 Estructura del ADN/ARN**

El ácido desoxirribonucleico (ADN) está compuesto por subunidades denominadas nucleótidos. Cada nucleótido contiene tres partes: desoxirribosa, fosfato y una de las cuatro bases nitrogenadas del ácido nucleico. Las cuatro bases son: timina (T), adenina (A), citosina (C) y guanina (G). Con estas cuatro bases se forman pares de timina y adenina, y guanina con citosina. Las bases que conforman cada par tienen cantidades iguales a las de su complemento. En el ADN, los nucleótidos anteriormente mencionados se clasifican como purinas (adenina y guanina) o pirimidinas (timina y citosina), mientras que en el ARN, las purinas son las mismas que en el ADN, pero las pirimidinas son uracilo y citosina. Las bacterias y los hongos tienen ADN, mientras que los virus pueden tener ADN o ARN. Estos dos ácidos nucleicos son responsables de la replicación microbiana [17][19].

### **2.3.2 Reacción de los microorganismos frente a la UVGI**

Las longitudes de onda UV inactivan microorganismos al cruzar enlaces entre nucleótidos. La absorción de los rayos UV puede provocar la formación de dímeros de

timina en el ADN, que pueden conducir a mutaciones o muerte celular. Este proceso se explica gráficamente en la figura 8. Principalmente a esto se debe el efecto letal de la radiación UV, pero los dímeros de citosina también producen daños secundarios [19].

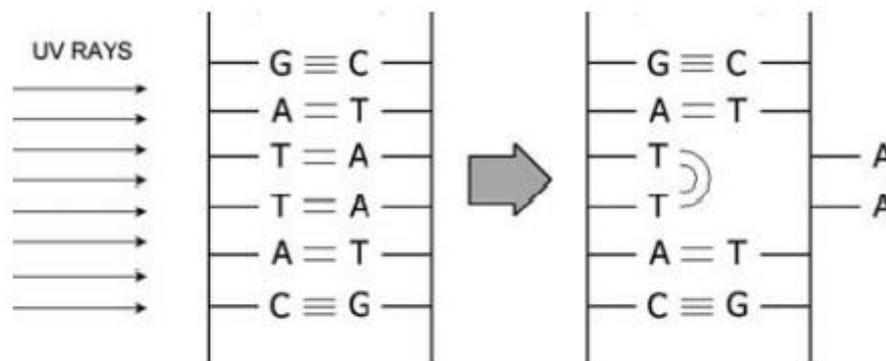


Figura 8: Dímeros de timina formados luego de que la radiación UV altere dos pirimidinas [19].

El rango UVC es absorbido por los ácidos nucleicos, por este motivo es dañino para los microorganismos. La efectividad germicida pico sobre estos es de aproximadamente 260-265 nm. Este pico corresponde al pico de absorción UV por el ADN bacteriano como se puede apreciar en la curva presentada en la figura 1. Las lámparas de vapor de mercurio de baja presión irradian su energía a una longitud de onda aproximada de 253.7 nm, la cual se encuentra bastante cerca del pico de absorción de ADN. Esto provoca una alta efectividad germicida [18][19].

## 2.4 Modelamiento de la UVGI

La distancia a la superficie a desinfectar, la potencia e irradiación de la lámpara seleccionada y el tiempo de exposición son los factores clave para conocer la dosis UV necesaria que permitirá un resultado exitoso. Sin embargo, es importante conocer la capacidad del microorganismo para reproducirse. Para las bacterias, se cuantiza la

capacidad del microorganismo para dividirse y formar colonias. Para los virus, se mide la capacidad del microorganismo para formar placas en las células de prueba que toma por huésped. En base a conocimientos y resultados adquiridos durante el brote de Sars-CoV-1 en el 2003, se tienen ecuaciones que permitirán aproximar los parámetros UV necesarios para la desinfección del Sars-CoV-2 perteneciente a la misma familia [19][20].

#### 2.4.1 Modelo de la decadencia microbiana y dosis UV

Según Kowalski, la decadencia de la población microbiana luego de la acción de cualquier método biocida se puede modelar con la siguiente ecuación exponencial clásica:

$$S = e^{-kIt} \quad (1)$$

Donde S: Fracción sobreviviente de la población microbiana inicial

k: Constante estándar de velocidad ( $\text{cm}^2/\text{uJ}$ )

I: Intensidad UV ( $\text{uW}/\text{cm}^2$ )

t: Tiempo de exposición (segundos)

con  $1\text{uJ} = 1\text{uW}\cdot\text{s}$

Esta fracción hallada teóricamente es aproximadamente igual a la relación entre la muestra de microorganismos sobrevivientes luego de la desinfección y la muestra inoculada sobre la superficie al inicio del experimento. La constante estándar de velocidad k define la sensibilidad del microorganismo a la exposición UV y este es exclusivo de cada especie. En la ecuación (1), k es la constante estándar para una intensidad (I) de  $1\text{ uW}/\text{cm}^2$  y se puede hallar dividiendo la constante de velocidad medida entre la intensidad (I) de prueba [19].

Se puede relacionar la dosis UV expresada en  $\text{J}/\text{m}^2$  (D) de:

$$D = \frac{-\ln(S)}{K} \quad (2)$$

Entonces de (1) y (2) se obtiene la siguiente ecuación que relaciona el tiempo y la dosis:

$$D = It \quad (3)$$

Este método ha sido aplicado en diferentes estudios para aproximar la dosis necesaria para la inactivación del Sars – CoV – 1. A continuación, en la tabla 2 se muestran las dosis calculadas en J/m<sup>2</sup> al 90%, 99.9%, 99.99% y 99.999% de efectividad. Estas han sido recolectadas de distintas investigaciones [20].

Tabla 2: Recopilación de valores de dosis UV para inactivación del Sars - CoV -1 [20]

Investigación	D <sub>90</sub>	D <sub>99.9</sub>	D <sub>99.99</sub>	D <sub>99.999</sub>
Walker, 2007	7	-	-	-
Duan, 2003	9	-	-	-
Kariwa, 2006	-	134	-	-
Erickman, 2020	-	5000	10000-15000	-
Darnell, 2004	2410	6020	12050	36144

#### 2.4.2 Comparación genética de los virus Sars – Cov

La justificación para el uso de las ecuaciones propuestas en base a los parámetros hallados para el Sars-CoV-1, se debe a su alto parecido genético con el virus a tratar: Sars-CoV-2. Se reunieron las secuencias del genoma de ambos virus de la base de datos genética del Instituto Nacional de la Salud (NIH) de EE.UU. Con esto se determinó que los patógenos son genéticamente similares en un 79% y la probabilidad de dimerización de ambos difería solo en 1.49%. Con estos resultados, se deduce que el Sars-CoV-2 podría tener parámetros de inactivación UV muy cercanos al de su antecesor [20].

#### 2.4.3 Determinación del tiempo mínimo de exposición

Para la determinación del tiempo mínimo de exposición, Arguelles presenta una estimación para expresar las ecuaciones en términos conocidos como la potencia de la

lámpara y la distancia hacia la muestra. Este último es un parámetro importante para considerar en el dimensionamiento de la cabina. Para estos cálculos se utilizó la dosis más alta que resultó efectiva para el Sars-CoV-1:  $D = 36144 \text{ J/m}^2$ .

Dado  $D$ , la intensidad en la superficie que será desinfectada se puede calcular de:

$$I = \frac{P_{UVC}}{A_{Exposed}} = \frac{\eta P}{4\pi r^2} \quad (4)$$

Donde P: Potencia nominal de la lámpara UVGI (W)

$\eta$ : Factor de atenuación  $\eta < 1$

r: Distancia de la lámpara a la muestra

Para las lámparas de 15 W, solo la tercera parte de la potencia es disipada como radiación UV-C. Adicionalmente, la geometría de la lámpara no permite que esta radiación llegue a la muestra en su totalidad, por lo que considerar un  $\eta \approx 10\%$  es razonable.

De (3) y (5) se logra la siguiente ecuación que permite hallar el tiempo de exposición mínimo para lograr una dosis de  $D = 36144 \text{ J/m}^2$ .

$$t \approx 1.5 \times 10^6 \left( \frac{\pi r^2}{P} \right) \quad (6)$$

El Centro para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC) recomienda una dosis mínima de UV-C de  $10000 \text{ J / m}^2$  para la esterilización de las mascarillas N95. Esto en base a estudios que informan una inactivación viral efectiva de  $\geq 3$ -log se da a esta dosis [20].

## 2.5 Requerimiento de componentes y materiales

### 2.5.1 Lámparas UV

La potencia de la lámpara UV se define en términos de potencia de entrada nominal y potencia de salida UV total nominal. La potencia nominal de salida UV representa una suma de la distribución de potencia espectral, lo cual difiere entre las lámparas de baja presión (LP) y alta presión (HID). La eficiencia de la lámpara se obtiene de la relación entre la potencia de entrada y la potencia de salida. Típicamente, lámparas de LP tienen eficiencias entre 30% a 31% como se puede observar en la tabla 1. Las lámparas UV se identifican por números de modelo, estos incluyen información sobre la lámpara. Las abreviaturas que se usan para lámparas fluorescentes, especificadas en ANSI\_IEC C78.81-2005, son en gran medida aplicables a las lámparas UV, existiendo algunas excepciones. Conocer las abreviaturas de la lámpara permite entender la hoja de datos. Estas se componen de seis partes:

- i. Potencia nominal de la lámpara
- ii. Longitud de la lámpara
- iii. Diámetro de la bombilla
- iv. Forma de la lámpara
- v. Base de la lámpara
- vi. Circuito o descripción especial

Por lo general, la longitud se especifica en pulgadas. Inmediatamente después, se coloca el diámetro. El diámetro nominal del tubo se coloca como "T-x" donde x está en unidades de octavos de pulgada. Los diámetros típicos para lámparas cilíndricas son T5 (5/8' o 16 mm), T6 (6/8' o 19 mm), T8 (1' o 26 mm) y T12 (1'-1 / 2' o 38 mm). La letra G se usa para indicar la potencia. Siguiendo este modelo, una lámpara G8T5 sería una lámpara de 8 W y de 5/8' de diámetro. El código que indica las medidas de la base también se puede incluir y esta proporcionado según ANSI C81.61-2005. Para separar estos indicadores se usa una barra oblicua. Los identificadores para las especificaciones sobre el tipo de lámpara son los que se ubican en la tabla 3.

Tabla 3: Significado de los identificadores de las lámparas germicidas [19].

Identificador	Tipo de lámpara
RS	Arranque rápido
PH	Arranque de precalentamiento
IS	Arranque instantáneo, base de doble pin
SP	Arranque instantáneo, base de un solo pin
HF	Alta frecuencia
HO	Alto nivel de salida, arranque rápido
B	Lámpara bactericida
CC	Cátodo frío
LP	Baja presión
HP	Alta presión

Con estos parámetros podemos expresar y encontrar nominaciones como esta:

30 W/36T12/RS

30 W, 36' T12, arranque rápido

En la tabla 4, se encuentran las especificaciones técnicas de algunas de las lámparas germicidas de la línea Philips. Todas las lámparas incluidas en la tabla comparativa producen una radiación UV con longitud de onda de 257.7 nm (UV-C)

como máximo. El cristal del que está hecho el recubrimiento de la lámpara filtra la longitud de onda de 185 nm, la cual genera ozono como se menciona en 2.1.2. Por la teoría definida anteriormente, estas características hacen a las siguientes lámparas seleccionables para la implementación [21].

Tabla 4: Listado de lámparas UV seleccionables. Marca Phillips [21].

Nombre del producto	Radiación UV	Descripción del sistema	Base de casquillo
TUV 11W FAM/10X25BOX	2,8 W	-	G13 [Bi-pin]
TUV T8 F17 1SL/25	4,5 W	-	G13 [Bi-pin]
TUV 15W SLV/25	4,9 W	Vapor de mercurio a baja presión	G13 [Bi-pin]
TUV 25W 1SL/25	7 W	Vapor de mercurio a baja presión	G13 [Bi-pin]
TUV 30W 1SL/25	12 W	Vapor de mercurio a baja presión	G13 [Bi-pin]
TUV 36W SLV/6	15 W	-	G13 [Bi-pin]
TUV 75W HO 1SL/6	25,5 W	Sistema de Alto Flujo Luminoso (HO)	G13 [Bi-pin]
TUV 55W HO 1SL/6	17,5 W	Sistema de Alto Flujo Luminoso (HO)	G13 [Bi-pin]
TUV TL-D 95W HO SLV/25	22,5 W	Sistema de Alto Flujo Luminoso (HO)	G13 [Bi-pin]

### 2.5.2 Balasto

Existen dos tipos de balastos utilizados comúnmente para encender lámparas UV: balastos magnéticos y balastos eléctricos. Los balastos magnéticos son una tecnología antigua y funcional, pero no del todo eficiente. Los balastos más nuevos suelen ser electrónicos, y se pueden encontrar de varios tipos. Los balastos deben coincidir estrechamente con la lámpara en términos de potencia, longitud y diámetro del tubo, independientemente del tipo de balasto que sean.

## Balastos magnéticos

Los balastos magnéticos usan un transformador de núcleo y bobina para realizar las funciones mínimas necesarias para iniciar el arranque. Primero, el motor de arranque hará un ciclo completo hasta que el tubo se ilumine. Mientras la lámpara está funcionando, un balasto de precalentamiento es solo un inductor que, a aproximadamente 60 Hz, tiene la impedancia adecuada para limitar la corriente de la lámpara UV al valor adecuado [19].

## Balastos eléctricos

Los balastos electrónicos son básicamente fuentes de alimentación conmutadas, ya que funcionan como un inversor/conmutador integrado de alta frecuencia. La limitación de corriente se debe a un inductor muy pequeño, el cual provoca una impedancia suficiente a alta frecuencia. Los balastos electrónicos diseñados adecuadamente son muy confiables. En la práctica, su confiabilidad depende de la temperatura ambiente de operación y la ubicación con respecto al calor producido por las lámparas [19].

Tabla 5: Comparación entre balasto magnético y balasto eléctrico. Adaptación [17].

Balasto magnético	Balasto eléctrico
✓ Menos costoso	✓ Ajuste de potencia continuo y capacidad para adaptarse a niveles de potencia más bajos.
✓ El ajuste continuo de potencia ocurre con el balasto magnético basado en inductor, pero no con el balasto magnético basado en transformador.	✓ Más eficiencia de energía
✓ Más resistente a las sobretensiones.	✓ Más ligero y tamaño más pequeño
✓ Tecnología probada (en uso durante casi 70 años)	✓ Brinda una vida útil más larga a la lámpara y menos oscurecimiento en los extremos de esta

Para este caso, se está considerando el balasto eléctrico SHS14-UNV-H para tubos UV-C. Cuenta con las características mostradas en la tabla 6.

Tabla 6: Características del balasto Fulham [22].

Marca	Fulham
Tipo	Pre-Heat Arranque Programado
Luz indicadora de alimentación	Sí
Factor de Potencia	>0.98%
THD	13%
Voltaje	120V ± 10% / 50-60Hz
Factor de cresta de corriente	<1.7
Voltaje transitorio	ANSI 62.41
Protección de entrada	Fusible
Temperatura de operación	0°C - 75°C
Factor del balasto	1.08
Factor de eficiencia del balasto	2.40

### 2.5.3 Material de la cabina

Como se vio en el capítulo 1, es necesario que la luz UV cubra la superficie a desinfectar en su totalidad, evitando las sombras. Con la finalidad de obtener un resultado satisfactorio en cada sesión de descontaminación, se busca utilizar un material que permita reflejar la onda irradiada por las lámparas hacia toda la cabina y, en consecuencia, que cubra toda la superficie de la mascarilla. Esto es posible mediante el uso de materiales que son altamente reflectivos para el rango de longitud de onda UV. Las láminas de aluminio pulido son el material más común utilizado para estos fines y tiene una reflectividad UV de aproximadamente 75%. El recubrimiento de aluminio también puede ser utilizado, es económico y fácil de instalar. Sin embargo, el material más reflectante de todos es el politetrafluoroetileno expandido (ePTFE) de tecnologías Gore, con una reflectividad UV de aproximadamente el 99% [19].

## 2.5.4 Instrumentos de medición

Para conocer la longitud de onda y la potencia que irradia la lámpara que se usará para esta investigación, se requiere de un radiómetro. Este equipo es capaz de medir longitudes de onda en orden de los nanómetros [19].

Para estos fines, se ha buscado un equipo capaz de detectar específicamente las ondas UV-C. Según el fabricante, este equipo tiene las siguientes aplicaciones:

- ✓ Medición de radiación UVC
- ✓ Medición de potencia LED UVC y fuentes de luz UVC
- ✓ Medición de dosis UV
- ✓ Prueba de desinfección de la superficie

Además, la tabla 7 presenta información respecto a las características técnicas del radiómetro.

Tabla 7: Características de medición del radiómetro digital RMD de la marca OPSYTEC [23].

Rango espectral	200 - 280 nm (UVC) 230 - 400 nm (UVBB) 210 - 380 nm (for KrCl*)
Rango de medición	0 - 100 mW/cm <sup>2</sup>
Resolución	0,1 μW/cm <sup>2</sup>
Rango de dosis	0 - 100 MJ/cm <sup>2</sup>
Calibración	UVC-LP 253,7 nm UVC MP UV-LED 275 nm (UVBB)
Conversión ADC	24 bits
Sensor de temperatura	Integrado
Temperatura de operación	0 a 40 °C

### **2.5.5 Microcontrolador**

Se plantea el uso de un microcontrolador para fines de control de lámparas y tiempos. Para facilitar el uso del equipo, se considera el uso de una pantalla LCD que permita visualizar los parámetros que serán utilizados en cada sesión de desinfección. Además, debido a la peligrosidad de la radiación emitida por las lámparas UV, se ha tomado en cuenta realizar un protocolo de seguridad para el usuario. Este protocolo se encargará de impedir la apertura de puertas de la cabina mientras la luz UV se encuentre funcionando. Adicionalmente, es necesario incluir la cuenta del tiempo de cada sesión de descontaminación. La pantalla LCD tendrá el fin de entregar al usuario esta información. Se considera apropiado el uso de un microcontrolador que permita la recepción de información por parte del radiómetro, por ello se toma en cuenta la Raspberry Pi 3.

### **2.6 Respiradores desechables con filtro**

Los riesgos biológicos se pueden transmitir por el aire, en una conversación de persona a persona e incluso por el polvo que viaja a través del aire. Las enfermedades que pueden ser causadas por la inhalación de organismos biológicos que se transmiten a través del aire, incluyen los coronavirus como el SARS, MERS y otros. Es por ello que los respiradores desechables con filtro son esenciales para la protección del personal médico expuesto al virus Sars-CoV-2 [24][2].

Por lo general, los respiradores desechables utilizan un filtro fibroso no tejido para capturar partículas. Las fibras, con tamaños desde menos de 1  $\mu\text{m}$  hasta 100  $\mu\text{m}$ ,

se entrecruzan para formar una red de muchas capas que permiten el paso de líneas de corriente de aire debido a los espacios entre las fibras. Las partículas quedan atrapadas cuando fluyen con el aire a través de las capas filtrantes. Esta captura puede ocurrir a través de diferentes mecanismos, los cuales son asentamiento gravitacional, impacto inercial, intercepción, difusión y atracción electrostática. Las partículas de un tamaño mayor a 100um contenidas en corrientes de aire de movimiento lento pueden quedar atrapadas en los filtros debido a la gravedad. Sin embargo, la mayoría de las partículas respirables son más pequeñas que estas y no son capturas por asentamiento gravitacional. El impacto por inercia ocurre cuando una partícula no puede seguir una línea de aire a través de la rejilla formada por las fibras, debido a su inercia. En su lugar, impacta en la fibra. En el mecanismo de intercepción, la partícula se sigue la línea de corriente, pero esa línea de corriente la acercará lo suficiente para entrar en contacto con la fibra, la cual finalmente la capturará. En contraste, la difusión es muy eficiente para partículas menores de 0.1 um, donde se clasifica el Sars-Cov-2 con un tamaño de 100nm. Las moléculas de aire colisionan con las partículas muy pequeñas, provocando que estas vaguen a través de las líneas de corriente y en consecuencia entren en contacto con alguna de las fibras [24][25].

Estos respiradores se clasifican por su porcentaje de efectividad, por ejemplo, el respirador N95 tiene un 95% de efectividad para la filtración de partículas. Existen distintas normativas que regulan la fabricación y efectividad de estos EPP, entre las cuales algunas son equivalentes con otras. En la tabla 8 se aprecia la clasificación de los respiradores existentes en el mercado.

Tabla 8: Eficiencia de los filtros y estándares en EE.UU., Europa y China. Adaptado [24].

Lugar	Norma	Clasificación	Eficiencia del filtro
EE.UU.	NIOSH 42 CFR 84	N95	$\geq 95\%$
	NIOSH 42 CFR 84	N99	$\geq 99\%$
	NIOSH 42 CFR 84	N100	$\geq 99.97\%$
Europa	EN 149:2001	FFP1	$\geq 80\%$
	EN 149:2001	FFP2	$\geq 94\%$
	EN 149:2001	FFP3	$\geq 99\%$
China	GB2626-2006	KN/KP90	$\geq 90\%$
	GB2626-2006	KN/KP95	$\geq 95\%$
	GB2626-2006	KN/KP100	$\geq 99.97\%$

Según la Administración de Drogas y Alimentos de EE.UU. (AAMI), es necesario corroborar que el método de desinfección sea compatible con la mascarilla a tratar. Para ello, se deben considerar los siguientes cuatro parámetros [26] [27]:

Tabla 9: Aspectos mandatorios para verificar la correcta funcionalidad del método de descontaminación sobre los respiradores N95 [27].

Parámetro	Descripción
Eficacia	Debe inactivar exitosamente el virus inoculado
Seguridad	El respirador debe ser seguro para el usuario aún después de la desinfección.
Filtrado	El filtrado del EPP debe ser igual que al inicio o tener una variación mínima
Ajuste	La adaptabilidad del EPP al rostro no se debe ver afectada

# Conclusiones

El marco problemático permite entender la necesidad del uso de un método de descontaminación para EPP con la finalidad de reutilizarlos en caso de pandemia. Esta necesidad se debe a los resultados de pandemias anteriores, las cuales afectaron los sistemas de salud. Además, el desabastecimiento de EPP generado por la pandemia de la COVID-19, motiva la búsqueda de un método de descontaminación efectivo.

Del estudio realizado para el marco teórico se puede concluir que son tres los parámetros esenciales para el desarrollo del sistema de pruebas: la dosis UV, la distancia hacia la superficie a descontaminar y el tiempo de exposición a la radiación UV. Cabe resaltar que este método conserva la integridad de las mascarillas y puede ser aplicado hasta tres veces para cada uno de estos EPP.

Para el diseño físico del módulo serán necesarias lámparas de baja presión, un radiómetro capaz de medir el rango de longitudes de onda UVC y la intensidad UV, una cabina con recubrimiento de aluminio para reflejar las ondas emitidas por las lámparas y un bloque de control que permita la selección de potencia y tiempo. Además, debido al riesgo que implica la exposición a los rayos UV para los seres humanos, se deduce el uso de un control remoto.

# Recomendaciones y trabajos futuros

Debido a que se busca implementar un módulo de pruebas, es importante considerar distintos niveles de potencia, distancia y tiempo, los cuales deben ser seleccionados por el usuario para realizar los ensayos.

Se sugiere incluir visualizadores fáciles de reconocer por el usuario, como por ejemplo diodos LED que indiquen la cantidad de lámparas encendidas y el tiempo de exposición seleccionado. Es prudente tomar en consideración para el diseño los tiempos y distancias revisados en el estado del arte del capítulo 1.

Se aconseja el uso de sensores de temperatura y humedad para tener conocimiento del estado de estos parámetros dentro de la cabina, ya que influyen en la efectividad del método.

Es recomendable desarrollar previamente el diseño del experimento que se llevará a cabo, esto con la finalidad de conocer la cantidad de ensayos que se pueden realizar con los parámetros a variar.

Para la comunicación con el radiómetro es sugerente el uso de la tarjeta Raspberry Pi como microcontrolador.

Para el control remoto se propone el uso de una aplicación móvil que pueda ser instalada en el celular del usuario y que permita la comunicación con el sistema por enlace Bluetooth con la finalidad de poder controlar el equipo desde fuera de la habitación.

# Bibliografía

- [1] OMS, “Alocución de apertura del Director General de la OMS en la rueda de prensa sobre la COVID-19 celebrada el 11 de marzo de 2020,” Mar. 11, 2020. <https://www.who.int/es/dg/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---11-march-2020> (accessed May 18, 2020).
- [2] Y. Yan *et al.*, “The first 75 days of novel coronavirus (SARS-CoV-2) outbreak: Recent advances, prevention, and treatment,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 7, 2020, doi: 10.3390/ijerph17072323.
- [3] Centro de control y prevención de enfermedades, “COVID-19 Descontaminación y reutilización de respiradores con máscara filtrante | Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades,” 2020. <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/hcp/ppe-strategy/decontamination-reuse-respirators.html> (accessed May 29, 2020).
- [4] D. Mills, D. A. Harnish, C. Lawrence, M. Sandoval-Powers, and B. K. Heimbuch, “Ultraviolet germicidal irradiation of influenza-contaminated N95 filtering facepiece respirators,” *Am. J. Infect. Control*, vol. 46, no. 7, pp. e49–e55, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.ajic.2018.02.018.
- [5] M. L. Ranney, V. Griffeth, and A. K. Jha, “Critical Supply Shortages — The Need for Ventilators and Personal Protective Equipment during the Covid-19 Pandemic,” *N. Engl. J. Med.*, vol. 41, no. 1, pp. 1–3, 2020, doi: DOI: 10.1056/NEJMp2009027.

- [6] D. J. Mason and C. R. Friese, “Protecting Health Care Workers Against COVID-19—and Being Prepared for Future Pandemics,” *JAMA Heal. Forum*, vol. 1, no. 3, pp. e200353–e200353, Mar. 2020, doi: 10.1001/JAMAHEALTHFORUM.2020.0353.
- [7] El Comercio, “Coronavirus Perú: médicos realizan plantón en exteriores del hospital Negreiros | FOTOS | Callao | Estado de emergencia | Cuarentena | COVID-19 NNDC Sucesos | El Comercio Perú,” Lima, Perú, Apr. 27, 2020.
- [8] BBC, “Coronavirus en Perú | ‘¡No quiero un médico más muerto!’: la súplica a las autoridades de una médica peruana en la primera línea de batalla contra covid-19 - BBC News Mundo,” May 20, 2020.
- [9] MINSA, “Resolucion Ministerial No. 182-2020-MINSA | Documento técnico: Lineamientos que refuerzan el cuidado integral de la salud en el primer nivel de atención en el contexto de la pandemia COVID-19,” Lima, Perú, 2020.
- [10] Centro de control y prevención de enfermedades, “Isolation Precautions | Guidelines Library | Infection Control | CDC.” <https://www.cdc.gov/infectioncontrol/guidelines/isolation/index.html> (accessed Jun. 03, 2020).
- [11] M. E. R. Darnell, K. Subbarao, S. M. Feinstone, and D. R. Taylor, “Inactivation of the coronavirus that induces severe acute respiratory syndrome, SARS-CoV,” *J. Virol. Methods*, vol. 121, no. 1, pp. 85–91, 2004, doi: 10.1016/j.jviromet.2004.06.006.
- [12] C. C. Tseng and C. S. Li, “Inactivation of viruses on surfaces by ultraviolet

- germicidal irradiation,” *J. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 4, no. 6, pp. 400–405, 2007, doi: 10.1080/15459620701329012.
- [13] M. M. Nerandzic *et al.*, “Evaluation of a pulsed xenon ultraviolet disinfection system for reduction of healthcare-associated pathogens in hospital rooms,” *Infect. Control Hosp. Epidemiol.*, vol. 36, no. 2, pp. 192–197, 2015, doi: 10.1017/ice.2014.36.
- [14] W. G. Lindsley *et al.*, “Effects of Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI) on N95 Respirator Filtration Performance and Structural Integrity,” *J. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 12, no. 8, pp. 509–517, 2015, doi: 10.1080/15459624.2015.1018518.
- [15] D. Welch *et al.*, “Far-UVC light: A new tool to control the spread of airborne-mediated microbial diseases,” *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1038/s41598-018-21058-w.
- [16] R. Fischer *et al.*, “Assessment of N95 respirator decontamination and re-use for SARS-CoV-2,” *medRxiv*, p. 2020.04.11.20062018, 2020, doi: 10.1101/2020.04.11.20062018.
- [17] M. Pirnie, K. G. Linden, and J. P. J. Malley, “Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule,” *Environ. Prot.*, vol. 2, no. 11, pp. 1–436, 2006.
- [18] N95DECON & MGB, “N95 Decontamination & Reuse Webinar | N95DECON & MGB - YouTube.” <https://www.youtube.com/watch?v=jRdTsh616zs> (accessed Jul. 07, 2020).

- [19] W. Kowalski, *Ultraviolet Germicidal Irradiation*, vol. 53, no. 9. Springer US, 2009.
- [20] P. Arguelles, “Estimating UV-C Sterilization Dosage for COVID-19 Pandemic Mitigation Efforts,” no. April, pp. 4–7, 2020, doi: 10.13140/RG.2.2.12837.65761.
- [21] Philips, “Lighting Philips Purificación aire y agua,” 2020.
- [22] Fulham, “SPECIFICATION SHEET: SPECIFICATION SHEET: SHS14-UNV-H,” 2014.
- [23] M. Buonanno *et al.*, “Germicidal Efficacy and Mammalian Skin Safety of 222-nm UV Light,” *Radiat. Res.*, vol. 187, no. 4, pp. 493–501, 2017, doi: 10.1667/rr0010cc.1.
- [24] 3M, “Respiratory Protection for Airborne Exposures to Biohazards,” Apr. 2020.
- [25] New Mind, “How N95 Masks Stop Viruses - YouTube,” May 12, 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=nQmZou7TaVc> (accessed Jul. 11, 2020).
- [26] 3M, “Respirador 8210 (N95) Ficha Técnica Descripción,” 2006.
- [27] AAMI, “Emergency Use Authorizations for the Decontamination of N95 Respirators (AAMI COVID-19 Webinar) - YouTube,” May 04, 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=IYxuH7weYIA&feature=youtu.be&t=883> (accessed Jul. 09, 2020).
- [28] IETSI, “MÉTODOS DE DESCONTAMINACIÓN DE RESPIRADORES N95 EN ESTADOS DE ESCASEZ (COVID-19) DIRECCIÓN,” 2020.