

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**ESTUDIO DEL FUNCIONAMIENTO Y DISEÑO DE DETECTORES  
ÓPTICOS DE PARTÍCULAS PARA EQUIPOS AUTOMATIZADOS DE  
PRUEBAS DE EFICIENCIA DE FILTRADO**

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

**Enzo Fernando Ipanaque Pineda**

**ASESOR: Doctor Luis Alberto Vilcahuaman Cajacuri**

**Lima, diciembre de 2020**

## Resumen

La actual pandemia de la Covid-19 ha puesto al Perú, un país que no se encontraba preparado para un evento de esta magnitud, en una posición poco favorable. En el ámbito de salud se ha visto el uso de respiradores faciales como una opción para evitar el contagio masivo. Sin embargo, los medios que se tienen a nivel local para asegurar la calidad de estos insumos son poco eficaces. Es por esto por lo que en la presenta investigación se ha optado por indagar en tecnologías que permitan la rápida clasificación por medio de pruebas de estos equipos de protección.

Se investigó acerca de la actualizad de equipos automatizados de pruebas de eficiencia de filtrado y de tecnologías subyacentes de estos equipos y la actualidad de estas. Además, se indagó específicamente el funcionamiento de los detectores de partículas como una de las partes fundamentales de estos sistemas. Es así como se logró identificar los avances tecnológicos en equipos de pruebas de eficiencia de filtrado. Estas innovaciones tienen como objetivo mejorar la precisión de los instrumentos y poder llevarlos a ser utilizados en ensayos que contengan partículas más pequeñas, que pudieran asemejar el tamaño de virus. Otra innovación remarcable es la del uso de equipos para la simulación de la respiración humana y así poder someter al respirador facial a pruebas más cercanas a la realidad.

Los resultados de esta investigación lograron recabar la información necesaria para iniciar el diseño de un equipo que permita detectar partículas en el medio. Añadido a esto, se logró identificar las mejores alternativas entre las distintas opciones que se encontraron para el desarrollo de este equipo basándose en la complejidad de estas y en la capacidad que tienen para cumplir el objetivo del equipo.

Dedicado a mi madre y a mi padre, porque yo no sería quien soy si ellos no fueran quienes fueron conmigo. A mi mascota, quien me acompañó fielmente durante mis años de formación. A mi familia y amigos por depositar su confianza en mí.



Agradecimiento por su apoyo incondicional durante esta etapa a mi asesor el Doctor Luis Vilcahuaman. A mis amigos en esta etapa Alejandra, Valeria, Alexis y Rodrigo.  
A mis padres que me dieron la oportunidad de cumplir mis sueños.



“Nunca debes rendirte a la desesperación. Si te permites ir por ese camino, te rendirás a tus instintos más bajos. En tiempos oscuros, la esperanza es algo que te das a ti mismo. Ese es el significado de la verdadera fuerza interior”

- Aaron Ehasz



## Índice

<b>Introducción</b> .....	1
<b>Capítulo 1. Marco Problemático</b> .....	2
1.1    Problemática .....	2
1.1.1    Coyuntura .....	2
1.1.2    Definición del Problema.....	3
1.2    Estado del Arte.....	5
1.2.1    TSI 8130 A .....	5
1.2.2    Detector de Partículas .....	6
1.2.3    Variación de Flujo .....	8
1.2.4    Generación de Aerosol .....	9
1.3    Justificación .....	10
1.4    Objetivos.....	10
1.4.1    Objetivo General .....	10
1.4.2    Objetivos Específicos .....	10
<b>Capítulo 2. Fundamentos de pruebas de filtrado e instrumentación</b> .....	11
2.1    Protectores personales: máscara respiradora N95 .....	11
2.2    Normas y criterios asociados a las pruebas de eficiencia de filtrado.....	13
2.3    Principios para la detección de partículas.....	16
2.3.2    Lentes Asféricas y Colimadores .....	18
2.3.3    Técnicas para el procesamiento de imágenes .....	23
2.3.4    Sensores para detección óptica.....	25
2.3.5    Propuesta de Solución .....	28
<b>Recomendaciones y trabajos futuros</b> .....	30
<b>Bibliografía:</b> .....	31

## Índice de figuras

Figura 1. Métodos de filtración mecánicos de un respirador (elaboración propia).....	12
Figura 2. Comparación de la potencia de la luz dispersada por luces con distintas longitudes de onda. (-- luz láser de 405 nm, ... luz láser de 532 nm, __ luz láser de 635 nm, elaboración propia).....	17
Figura 3. Resultados de simulación de dispersión.....	18
Figura 4. Efecto de una lente esférica en un haz de luz (elaboración propia).....	19
Figura 5 Efecto de aberración cromática (elaboración propia) .....	20
Figura 6. Par de lentes acromático (elaboración propia).....	21
Figura 7. Efecto de aberración esférica (elaboración propia).....	21
Figura 8. Efecto de corrección de una lente esférica (elaboración propia) .....	22
Figura 9. Efecto de un lente colimador en un haz de luz (elaboración propia).....	22
Figura 10. Imagen de procesamiento de foto utilizando thresholding binario (elaboración propia).....	23
Figura 11. Imagen de detección de bordes por medio de Canny Edge Detection (elaboración propia).....	24
Figura 12. Gráfica de eficiencia cuántica en modo monocromático y policromático en sensor Canon (extraído de [42] ) .....	26
Figura 13. Gráfica de eficiencia cuántica de sensor monocromático Micron ( extraído de [43] ).....	26
Figura 14. Gráfica de eficiencia cuántica de sensor policromático Sony ( extraído de [44] )	26
Figura 15. Diagrama de bloques de la solución propuesta (elaboración propia) .....	28
Figura 16. Bosquejo de detector óptico (elaboración propia) .....	28

## Índice de tablas

Tabla 1. Importación de mascarillas en Perú en el mes de abril .....	4
Tabla 2. Importación de mascarillas N95 en Perú el mes de abril .....	4
Tabla 3. Comparación de normas y estándares .....	15



## Introducción

Actualmente la población global está viviendo la pandemia ocasionada por la Covid-19, una enfermedad causada por el virus del SarsCov-2. Perú no es la excepción, inclusive el nuestro es un país que no se encontraba preparado para afrontar una pandemia. Es así como en el contexto de la Covid-19 se dictan medidas dirigidas a prevenir el contagio masivo de esta enfermedad. Las medidas dictadas fueron el distanciamiento social, higienización de manos constante y el uso de respiradores faciales.

Este último elemento es el que genera más controversia debido a la variedad de calidad y procedencias que tiene en el mercado peruano. Sin embargo, el país cuenta con métodos propuestos por INACAL para medir la eficiencia de filtrado de estos equipos de protección. La desventaja del método propuesto por esta institución es un método que requiere de la participación humana y requiere ser dirigido por profesionales en la materia. Es por esto por lo que se considera que no es un método viable para el volumen masivo de respiradores o mascarillas que ingresan al país.

En vista de esto se propone el uso de equipos automatizados para pruebas de eficiencia de filtrado. Siendo esta una solución compleja en el documento presenta se ahonda solo en una de las partes del equipo, la cual es el detector de partículas. En el capítulo 1 del documento se puede ver que se ha recopilado información de distintas tecnologías actuales y propuestas tecnológicas en cuanto a los equipos automatizados para pruebas de eficiencia de filtrado. En el capítulo 2 se pueden ver los fundamentos técnicos que fueron necesarios definir para llevar a cabo el diseño del sistema de detección óptica propuesto en la tesis. Finalmente, en la sección de propuesta de solución es posible ver la propuesta de trabajo para un posible documento de diseño e implementación.

## Capítulo 1. Marco Problemático

En el presente capítulo se hará descripción de la coyuntura respecto a la Covid-19 y como este ha afectado al país. Así mismo, se mencionarán las alternativas de protección adquiridas para enfrentar la pandemia. Luego se explicará la problemática con relación a estas medidas tomadas por el gobierno peruano. Posteriormente, basándose en lo descrito se determinará el objetivo general y los objetivos específicos para poder enfrentar el problema expuesto. Precedentemente, se expresará la justificación por la cual es necesario resolver el problema anteriormente expuesto. En este segmento se describirá la solución de manera concisa. Una vez presentada la solución se expondrán los limitantes de la propuesta. Finalmente, se mencionará el sector o segmento al que se dirige la propuesta.

### 1.1 Problemática

En este subcapítulo se describe la situación tanto global como local del avance del covid-19 y cuales han sido los esfuerzos del Perú para poder evitar su proliferación. Los problemas relaciones a lo comentado anteriormente son descritos a continuación.

#### 1.1.1 Coyuntura

La Covid-19 es una enfermedad que es causada por el virus del Sars-Cov-2. El primer contagio de esta enfermedad se dio a finales de diciembre en la ciudad de Wuhan en China [1]. Actualmente las investigaciones intentan definir de forma fehaciente cual fue el medio de transmisión de este virus zoonótico (esto quiere decir que se presenta tanto en animales como en personas), ya que se han manejado distintas versiones relacionadas a la ingesta de animales exóticos en mercados de la antes mencionada, ciudad de Wuhan. Entre las especies que eran dirigidas al consumo humano se señaló de forma enfática a serpiente y murciélagos. Según investigaciones de [1] se ha podido determinar que los murciélagos son la especie portadora del virus y que por el consumo de estos como alimento el virus pudo desarrollar las proteínas que le permiten adherirse a las paredes de los pulmones y reproducirse en ellos.

No es la primera vez que un coronavirus genera una enfermedad a la población. En el año 2003 en China se presentó el SARS-CoV muy parecido al actual [1], este coronavirus tuvo un saldo mucho menor si se refiere a la cantidad de infectados y fallecidos. Esto deja entrever que esto es cíclico y que eventualmente puede volver a desarrollarse un coronavirus con aún mayor agresividad o con un comportamiento que haga que su contagio sea aún más fácil.

Debido a la expansión del Covid-19, el día 11 de marzo del 2020 la OMS (Organización Mundial de la Salud) declara a esta enfermedad como una pandemia [2]. Esto solo hace alusión a lo extenso de su expansión y no a la letalidad de la enfermedad en sí. A la fecha de 09 de julio de 2020 la Covid-19 está presente en más de 200 países habiendo infectado a más de 11 millones y medio de personas y habiendo generado más de 500 mil muertes[3]. En Perú la Covid-19 ha infectado a más de 312 mil personas y hay 11 133 fallecidos [4]. Esto posiciona al país como quinto país con mayor cantidad de infectados en el mundo [5].

El contagio de este coronavirus se da por medio del contacto o la cercanía con una persona que está infectada, al inhalar el virus en forma de tos, estornudos, gotas o aerosol [1]. Esto lleva a la conclusión de que la mejor manera de evitar el contagio es protegiendo la zona de la cara en la que se encuentran la boca y la nariz. Esto se logra por medio del uso de respiradores que puedan filtrar el virus.

#### 1.1.2 Definición del Problema

El día 16 de marzo del 2020 el gobierno peruano declara el inicio de la cuarentena. Durante esta cuarentena la población peruana podría salir a realizar actividades como comprar medicinas y alimentos. Una de las condiciones impuestas para la circulación fue el uso obligatorio de mascarillas.

Según [6] se tiene la información presentada en las tablas 1.1 y 1.2. Estas muestran que durante el mes de abril en el Perú se importaron más de 400 mil mascarillas de las cuales más de 380 mil no tenían marca. Esto representa un problema ya que muchas de estas mascarillas no son

equipos de protección confiables. Del total importado el considerable número de 27 200 mascarillas se comercializan bajo el nombre de N95.

Tabla 1. Importación de mascarillas en Perú en el mes de abril

Marcas de mascarillas	Cantidad de Mascarillas Importadas	Porcentaje del total
LANGYIN	20000	4.93%
MOLDEX	5	0.00%
TRUPER	96	0.02%
MOLDEX	18	0.00%
s/m	385128	94.97%
TRUPER	300	0.07%
Total	405547	100.00%

Tabla 2. Importación de mascarillas N95 en Perú el mes de abril

Modelo de mascarillas	Cantidad de Mascarillas Importadas	Porcentaje del total
KN95	20000	73.53%
DISPOSABLE N95	7200	26.47%

Esto deja entrever que actualmente en el mercado peruano hay un número considerable de respiradores que están circulando bajo un nombre que representa confiabilidad. Cuando se hace

referencia a respiradores de calidad estos cuentan con certificación de entidades como el *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) [7]. Esta entidad ofrece un listado de marcas que cuentan con su aprobación y en entre las marcas de respiradores que se puede ver en la tabla 1.1 solo Moldex es aprobada por NIOSH [7], [8].

El Instituto Nacional de Calidad (INACAL) define una norma para la especificación y la evaluación de respiradores en la norma NTP 329.201. En estos procedimientos se mide la fuga interna total. Esta medición se da basada en la prueba de eficiencia de penetración y la prueba de ajuste del respirador a la cara. Este procedimiento se apega a estándares internacionales, sin embargo, es necesario un sujeto de prueba y un especialista realizando las distintas etapas de la prueba [9].

Es por esto por lo que se define el problema como la falta de procesos automatizados para la validación de la calidad y fiabilidad de los equipos de protección entrantes al país.

## 1.2 Estado del Arte

Desde el año 1974 la *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) muestra su preocupación por la salud de los trabajadores en ambientes con alta presencia de partículas dañinas para la salud. Es por esto por lo que se publica el CFR 42 parte 84, en este se especificaron las nomenclaturas para distintos tipos de mascarillas [10]. Estas no están asociadas con el sector de la salud, si no con la salud ocupacional. De este modo se han dado avances tecnológicos que permiten detectar errores en modelos pasados y han llevado a que se diseñen nuevos y mejores métodos que permitan hacer pruebas más parecidas a la realidad.

### 1.2.1 TSI 8130 A

El TSI 8130 A es un equipo automatizado de pruebas de filtrado. Este equipo es comercializado y producido por la empresa TSI. Este equipo está diseñado para realizar pruebas de eficiencia de filtrado que cumplan con la norma como la CFR 42 parte 84 o los estándares ISO 16900-3 e ISO 23328-1 [11]. La solución que TSI ofrece no es un producto unificado, este sistema es

personalizable para cumplir los requerimientos del consumidor, de esta manera sus componentes internos pueden ser variados para apuntar a una norma específica y a las exigencias de esta. Esto es porque la empresa TSI no solo comercializa el equipo, sino que también tiene entre sus productos los distintos componentes como detectores de partículas o generadores de aerosol utilizados en la fabricación del TSI 8130 A. El generador de aerosol que se usaría para cumplir con la norma CFR 42 Parte 84 sería el *Electrospray Aerosol Generator 3482* ya que genera el rango de tamaños de partículas especificado por esta norma ( $75 \pm 20$  nm) [12]. TSI también cuenta con equipos que permiten cumplir con exigencias mayores como el TSI 3160 el cual está diseñado para hacer mediciones de rangos más pequeños el TSI 8130 A, esto es debido a la inclusión de un *condensation particle counter* (CPC) [13]. Cabe mencionar que estos equipos también son utilizados para realizar experimentos y por lo tanto se pueden considerar como equipos aceptados por la comunidad científica [14].

### 1.2.2 Detector de Partículas

Una parte crucial de los equipos para medir la eficiencia de filtrado de mascarillas es el detector de partículas. La relevancia de esta pieza recae en que es por medio de esta que conocemos la concentración de partículas en el medio. Existen distintos tipos de detectores, los más relevantes son los fotómetros y los contadores de partículas por condensación (CPC) [15]. Se ha podido ver por medio de experimentos que la eficacia de los fotómetros baja cuando se intenta medir rangos por debajo de los 100 nm a diferencia de los contadores de partículas por condensación los cuales llegan a medir partículas de hasta 1 nm. Se realizaron pruebas sobre 12 modelos distintos de mascarillas. Los resultados indicaron que en todos los casos existe una variación porcentual considerable entre las mediciones realizados con fotómetros del sistema TSI 8130 A y las mediciones obtenidas de un CPC. Esto se debe a lo mencionado antes de que los fotómetros tienden a despreciar partículas por debajo de los 100 nm por su masa.

Desde otra perspectiva también es relevante mencionar que se han hecho esfuerzos por desarrollar e implementar detectores ópticos de costos más bajos o que sean más compactos. Se implementó y probó un contador de partículas basado en fibras ópticas [16]. Este sensor fue probado para contar partículas, mas no para medir el tamaño de las partículas que son contadas. Funciona de una forma lógica, una luz proveniente de un láser es enviada a través de una fibra y canalizada para evitar su dispersión en el aire, en un ambiente sin partículas la luz viajaría a través del aire y llegaría a una segunda fibra la cual está conectada a un fotodiodo. De esta manera, cuando una partícula pase entre las terminaciones de la fibra habrá una caída de energía en el fotodiodo y se podrá detectar a la partícula pasando. Se menciona que el rango de este sensor es amplio y que podría ser llevado a un rango nanométrico con ayuda de una célula de condensación. Lo más importante es que el diseño de este sensor es mejorable, esto se debe a que su desempeño depende de los equipos usados, como el láser o el fotodiodo, con su circuito de instrumentación incluido. También es relevante que es un sensor compacto que permite la medición de partículas con un tamaño desde los 2  $\mu\text{m}$ .

Siguiendo con esta línea de abaratar costos en la siguiente investigación se propuso el acondicionamiento de un sensor de polvo para mejorar su funcionalidad a nivel tal que pudiera compararse al de equipos sofisticados [17]. Se usó el sensor GP2Y1010 con una disposición que permitía que la suposición de que una sola partícula sería detectada a la vez fuese válida. El resultado es un sensor que no solo puede contar partículas y medir la concentración del aerosol en el aire, este sensor también puede medir el tamaño de las partículas y su distribución, esto gracias al cumplimiento de las asunciones antes hechas. Para hacer que esto funcione no solo fue necesario una modificación física de la entrada de aire del sistema. El circuito necesitaba un SNR más alto, ya que existía la posibilidad de que la señal obtenida de una sola partícula fuese menos al ruido, esto se logra por medio de la correlación de señales. Para concluir, este diseño es puesto a prueba por medio de la medición de dos talcos, cuya

distribución, valor promedio y desviación estándar eran conocidos. En este experimento se obtuvieron resultados satisfactorios con errores porcentuales en valor promedio de  $\pm 0.7\%$  y en desviación estándar de  $\pm 2.6\%$ .

Finalmente en [18] se llevó a cabo un diseño utilizando este mismo sensor. En estas pruebas se compararon los resultados generales con los obtenidos en un CPC, realizando dichas pruebas con distintos tamaños de partículas con un error promedio máximo del  $5.95\%$ . El inconveniente de este diseño es que está dirigido a aplicaciones comerciales y que dado los niveles de errores no podría ser considerado dadas las rigurosas escalas de medición de los estándares internacionales.

### 1.2.3 Variación de Flujo

En el estándar ASTM F2299 se declara que las mascarillas deben ser probadas en ensayos de flujo constante y con determinadas magnitudes de flujo [19]. Sin embargo, se han hecho experimentos que miden la eficacia de las mascarillas al enfrentarse a flujos cíclicos. Esto se hace con la justificación de que ofrece al ensayo un escenario realista, en este se simula la respiración de una persona adulta [20]. Los resultados obtenidos de este ensayo muestran como la penetración en las mascarillas varía dependiendo de varios factores como la intensidad del flujo, la magnitud pico del flujo, la frecuencia del flujo e incluso la forma de la onda. En este ensayo se hizo la prueba de eficiencia con señales como una rampa, un trapecio y una onda sinusoidal. Los resultados obtenidos en estas pruebas demostraron que el porcentaje de partículas penetrantes variaba en proporción a la variación de parámetros como la intensidad de respiración pico, la frecuencia de respiración y el tipo de onda que se le aplicaba, siendo la onda sinusoidal la que generaba la mayor variación de penetración.

Este es un primer avance en la variación de flujo, sin embargo, en [21] se da un avance distinto. Si bien el flujo variable se aproxima a la realidad los autores consideraron que no era suficiente con esto, por lo cual, desarrollaron un equipo capaz de grabar y reproducir variaciones de flujos

correspondientes a respiraciones humanas. El dispositivo desarrollado tenía un sistema con variación de flujo con capacidades estándar de generación de flujos variables con varias formas de onda (triangular, trapezoidal o sinusoidal), pero su cualidad más resaltante era que por medio de transductores de presión se podía obtener información de la respiración de un trabajador y se podía reproducir el flujo generado por el trabajador para realizar distintas pruebas en los respiradores. Sus motivos eran que de esta manera los resultados del respirador serían los más reales, además que ofrecía la ventaja de poder evaluar al respirador con partículas dañinas sin necesidad de exponer a sus trabajadores. Este equipo fue probado grabando la respiración de tres soldadores durante su jornada de trabajo, esto les ofreció más información que podría ser usada para analizar la relación entre la carga de trabajo y la respiración, y los resultados obtenidos presentaban errores con un máximo del 5%.

#### 1.2.4 Generación de Aerosol

Desde el año 1973 en el que se inventó la generación de aerosol por vibración de orificio, esta técnica ha sido usada como un estándar para la generación de aerosol mono disperso. El problema con esta técnica es que la boquilla del generador de aerosol es comúnmente muy pequeña (unos 20  $\mu\text{m}$ ) y por lo tanto es propensa a atascarse. El segundo problema es que tiene una limitación en cuanto a la cantidad de tamaños que se pueden generar y para ampliar este rango es necesario hacer un cambio en la boquilla. Se propuso un nuevo diseño que tomaría en cuenta la vibración del orificio, pero también se tomará en cuenta el flujo [22]. Por medio de la combinación de estas dos técnicas se podría obtener un generador de aerosol mono disperso, con un rango de tamaños de partículas más amplio y una boquilla con menos propensión a atascarse. Durante las pruebas realizadas se obtuvieron tamaños de partículas desde los 0.7  $\mu\text{m}$  hasta los 15  $\mu\text{m}$  con una sola boquilla de 100  $\mu\text{m}$ . La limitación de este sistema está en el tamaño de partículas que puede crear, ya que estas no están dentro del rango que se desea

estudiar, sin embargo, el hecho de que pueda variar con relación a parámetros controlables genera un acercamiento hacia la automatización.

### 1.3 Justificación

Dada la actual coyuntura y en vista de que el país no se encontraba preparado para una pandemia como se muestra en [23], es necesario un método que permita a la población verificar la fiabilidad de los equipos de protección.

Sin embargo, se cuenta únicamente con métodos complejos y poco eficientes. Es por esto por lo que un equipo automatizado que permita realizar esta verificación de forma diligente resulta oportuno para mejorar la respuesta del país ante eventos como este.

### 1.4 Objetivos

#### 1.4.1 Objetivo General

Diseñar un detector óptico de partículas de 100 nm, basada en luz láser y detector CMOS para determinar la eficiencia de filtrado aplicado a respiradores N95, cumpliendo con las normas CFR 42 parte 84 y las ISO 16900-3 e ISO 23328-1.

#### 1.4.2 Objetivos Específicos

- a) Determinar las características funcionales cuantitativas y cualitativas del equipo de prueba de eficiencia de filtrado
- b) Aprender sobre software de procesamiento de imágenes y detección de partículas
- c) Realizar el diseño y selección de componentes adecuada de los bloques del detector óptico tomando en cuenta los requerimientos del CFR 42 parte 84
- d) Validar el diseño por medio de la interpretación de resultados y comparación con software especializados

## **Capítulo 2. Fundamentos de pruebas de filtrado e instrumentación**

En el presente capítulo se pueden observar los fundamentos teóricos que permiten entender el funcionamiento de los dispositivos de detección de partículas. Además, este capítulo ahonda en los bloques se serán presentados como parte de la propuesta de solución para poder llevar a cabo su diseño.

### **2.1 Protectores personales: máscara respiradora N95**

El objeto de estudio del presente documento son los respiradores y su eficiencia en el filtrado de partículas. Para esto, en primer lugar los definiremos como una interfaz respiratoria de ajuste ceñido con capacidad de cubrir la boca, nariz y mentón [24]. Estos deben ser utilizados como una medida de protección contra partículas y solo deben ser usados en atmósferas que no sean peligrosas para la vida o la salud y además que contengan la cantidad adecuada de oxígeno [10]. Estos medios de protección no son fabricados por medio tejido o costura, si no, por medio de procesos mecánicos, térmicos o químicos [14].

Como lo muestra la figura 1 los respiradores ofrecen varios mecanismos de filtración de partículas y la filtración total del respirador puede aproximarse como la suma de estos métodos independientes. En primer lugar, el mecanismo de difusión el cual ocurre cuando una partícula se mueve de forma aleatoria hasta chocar con la fibra, este movimiento también es llamado movimiento browniano. El siguiente mecanismo por mencionar es el de intercepción, el cual se da cuando el centro de una partícula que estaba siendo transportada por un flujo de aire pasa a una distancia menor al radio de la partícula de la fibra, generando así que la partícula sea interceptada por la fibra. A continuación, se tiene el mecanismo de impacto inercial, el cual se da cuando una partícula que estaba siendo transportada por un flujo se resiste al cambio abrupto en la dirección de este y sigue su camino para chocar con la fibra.

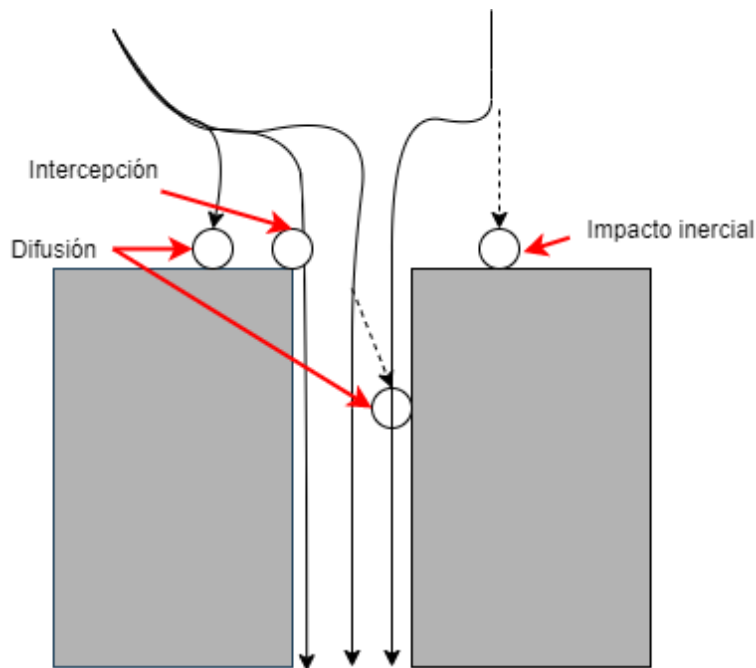


Figura 1. Métodos de filtración mecánicos de un respirador (elaboración propia)

Hay dos mecanismos más que son el de asentamiento por gravedad y el electroestático. El primero, se da cuando una partícula se separa del flujo de aire por su propia gravedad lo cual genera que choque con la fibra. Este es muy poco notorio para partículas nanométricas y puede llegar a despreciarse. El segundo, se da cuando las cargas entre las partículas y las fibras generan que estas se atraigan. Existen tipos de respiradores que toman este tipo de mecanismo como parte de su diseño, sin embargo, en los respiradores N95 no sucede esto y este es el motivo por el que durante las pruebas de eficiencia de filtrado este tipo de mecanismo es anulado por la neutralización de cargas en las partículas.

Cuando se hace referencia a tecnologías de captura de imágenes se tienen dos opciones principales. La tecnología CCD y la tecnología CMOS. En [25] y [26] se presentan definiciones y comparaciones de ambas tecnologías. La tecnología CMOS basa su principio de funcionamiento en la captura de la Figura por medio de fotodiodos para convertirla en una señal eléctrica la cual luego es cargada a un elemento de memoria. Esta tecnología tiene la ventaja de aprovechar el 100% del área del chip. Las desventajas que puede presentar este tipo

de sensor están en el hecho de que necesita electrónica añadida para procesar la señal lo cual puede añadir complejidad respecto de los sensores CMOS. Los sensores CMOS incorporan este procesamiento de la señal en el chip. Esto trae la primera desventaja comparativa que es el hecho de que estos sensores solo utilizan el 40% del área del chip para la captura de la Figura y el resto para los componentes necesarios para la adaptación de la señal. Sin embargo, la ventaja del sensor CMOS respecto del sensor CCD es que este tiene un rango dinámico mucho más amplio. En el sensor CMOS los valores obtenidos a la salida dependen directamente del tiempo de exposición el cual puede ser variado para poder determinar si es que el valor obtenido es una medida real o si es que se ha alcanzado el límite del sistema, mientras que para el caso del CCD esto no es posible.

## 2.2 Normas y criterios asociados a las pruebas de eficiencia de filtrado

En el año 1995 el gobierno de Estados Unidos de Norteamérica publica el 42 Code of federal Regulation [10]. En este documento se especifican los aún vigentes tipos de mascarilla y sus distintos niveles de eficiencia de filtrado. Estos factores son identificables por medio de una nomenclatura conformada por una letra y un número. Las letras que definen el tipo de respirador son N, R y P. Cada uno de estos nombres tiene un significado y hacen alusión al tipo de partículas para el que se dirige la protección del respirador. Las mascarillas tipo N son mascarillas Not resistant to oil y están hechas para proteger al usuario contra partículas sólidas y no son resistentes a partículas en aerosoles aceitosos. Las mascarillas tipo R son mascarillas Resistant to oil y están hechas para proteger al usuario contra partículas contenidas en aerosol aceitoso por un periodo no mayor a una jornada de trabajo de 10 horas. Finalmente, las mascarillas tipo P son mascarillas oil Proof y están hechas para proteger al usuario contra partículas contenidas en aerosol aceitoso y se puede utilizar por periodos mayores a una jornada laboral de 10 horas. Para el número tenemos 3 niveles de eficiencia de filtrado: 95, 99 y 100.

Cada uno de estos niveles hace alusión a un porcentaje de eficiencia de filtrado. Los niveles de eficiencia 95, 99 y 100 representan el 95%, el 99% y el 99,7% respectivamente.

Esta norma define los ensayos que serán realizados en los equipos de protección para determinar su aprobación. Entre estos ensayos están el ensayo de resistencia al flujo y el ensayo de eficiencia de filtrado. En el ensayo de resistencia al flujo se somete al respirador a un flujo de  $85 \pm 2$  litros por minuto. El criterio de aprobación es que la resistencia al flujo en la inhalación sea menor a una presión de 35 milímetros de agua columna y en la exhalación con una resistencia menor a una presión de 25 milímetros de agua columna. Para el ensayo de eficiencia de filtrado se mencionan pasos previos al ensayo en sí, estos para acondicionar los respiradores. Estos pasos previos incluyen el almacenamiento durante 24 horas en un ambiente con una humedad y temperatura específicas. Además, ser selladas en un contenedor por hasta 10 horas.

Para la prueba de eficiencia de filtrado en respiradores destinados a partículas sólidas se definen los siguientes parámetros. La temperatura y la humedad del aerosol generado para el ensayo deben ser de  $25 \pm 5$  °C y  $30 \pm 10$  por ciento respectivamente. Las partículas del aerosol generado deben ser neutralizadas hasta alcanzar el estado de equilibrio de Boltzman. Estas partículas deben tener un diámetro promedio de  $0.075 \pm 0.020$  micrómetros. La concentración máxima que enfrentará el respirador es de  $200 \text{ mg} / \text{m}^3$ . La prueba será realizada hasta que se pueda medir la eficiencia mínima o hasta que una masa de  $200 \pm 5$  mg haya contactado al respirador.

Sin embargo, esta norma no es la única en haber definido estas mismas condiciones para llevar a cabo las pruebas de eficiencia de filtrado. El estándar ISO 16900-3 especifica valores similares para la mayoría de los parámetros antes mencionados [27]. El estándar ISO 23328-1 está fuertemente ligada a lo que dice el CFR 42 parte 84 ya que como se puede ver en la tabla 2 los valores fijados para los parámetros de las pruebas son idénticos [28].

Para el caso peruano tenemos la norma NTP 329.201 [9]. Esta norma actualizada en el año 2020 y al igual que en el caso de las normas antes mencionadas tiene bases en la CFR 42 parte 84, sin embargo, en esta norma el ensayo es distinto al especificado anteriormente. La disposición del sistema de este ensayo incluye a una persona que participe como usuario del respirador, de esta forma se realiza el ensayo de eficiencia de filtrado total. Esta eficiencia de filtrado total incluye la eficiencia de filtrado por el respirador y la eficiencia de filtrado por el factor de ajuste al rostro de este. Además, este es un proceso no automatizado ya que al haber un sujeto de prueba es necesaria la presencia de especialistas que puedan dirigir la prueba.

Tabla 3. Comparación de normas y estándares

	ISO 16900-3	ISO 23328-1	NTP 329.201	CFR 42 PARTE 84
Temperatura	$(22 \pm 3) ^\circ\text{C}$	$(25 \pm 5) ^\circ\text{C}$	$(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$	$(25 \pm 5) ^\circ\text{C}$
Humedad Relativa	[0;40] %	$(30 \pm 10) \%$	$(45 \pm 15) \%$	$(30 \pm 10) \%$
Presión	-	$(96 \pm 10) \text{ kPa}$	-	-
Neutralización	Sí	Sí	No	Sí
Concentración de partículas en el aerosol	$[8;35] \text{ m g/m}^3$	$[10;20] \text{ m g/m}^3$	$(8 \pm 4) \text{ m g/m}^3$	$<200 \text{ m g/m}^3$
Tamaño medio de partículas	$[0,06;0,10] \mu\text{m}$	$(0,075 \pm 0,020) \mu\text{m}$	$[0,02;0,2] \mu\text{m}$	$(0,075 \pm 0,020) \mu\text{m}$
Desviación estándar	[1,4;1,8]	$< 1,86$	-	$< 1,86$

### 2.3 Principios para la detección de partículas

En la sección a continuación se definirán los conceptos necesarios para entender el funcionamiento de los detectores de partículas. También se presentarán los conceptos necesarios que permitan entender el motivo del sistema usado.

#### Láser y la teoría de dispersión de luz

Se define al láser como un dispositivo de emisión de luz [29]. Una de las características más relevantes de este tipo de luz es que es una onda coherente. Esto significa que los fotones emitidos por un láser se mueven con la misma longitud de onda, es por esto por lo que la luz proveniente de un láser es monocromática. Actualmente Existen distintos métodos para la obtención de luz laser y la luz obtenida de estos se diferencia en el rango de longitud de onda que se puede generar y, además, en la potencia que se puede alcanzarse con cada método. Algunos de estos métodos son por medio de semiconductores, gases e incluso por medio de minerales como el rubí.

La dispersión de luz es el efecto de desviación de la luz generado por la interacción de esta con un medio heterogéneo [30]. En este caso las partículas representan dicha heterogeneidad. La luz puede ser medida por un detector óptico colocado en un ángulo de incidencia. Este ángulo puede variar dependiendo del tamaño de partícula que deseamos medir, correspondiendo un ángulo más corto a la partículas de mayor tamaño y un ángulo más amplio a las partículas de menor tamaño [31].

Cuando se refiere a dispersión de luz esta puede ser dividida de dos formas, cuando las partículas son pequeñas en relación con la longitud de onda de la luz o cuando las partículas son comparables en relación con esta. Estos efectos son descritos en las teorías de dispersión de Rayleigh y de Mie respectivamente. En este caso la luz común es la luz roja la cual tiene una longitud de onda aproximada de 660 nm y como las partículas a ser estudiadas estarán en

el rango de  $75 \pm 20$  nm se desarrollará su comportamiento por medio de la teoría de dispersión de Rayleigh, cuya formula se observa en la ecuación (1).

$$I_s = \frac{8 \cdot \pi^4 \cdot a^6}{\lambda^4 \cdot r^2} \cdot \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right| \cdot (1 + \cos^2 \theta) \cdot I_o \quad (1)$$

Donde  $I_s$  es la intensidad de la luz dispersada en un ángulo  $\theta$  con un radio  $a$  y un índice de refracción  $m$ .  $I_o$  y  $\lambda$  son la irradiancia y la longitud de onda de la luz incidente. Cabe resalta que  $m$  es un número complejo con parte real  $n$  que representa una medida de refracción en el medio de la partícula y con parte imaginaria  $k$  que mide la atenuación y absorción de la luz de esta.

Esta ecuación nos permite comparar los efectos de distintas potencias en distintas longitudes de ondas para poder observar y comparar los resultados en cada uno de estos casos como en la siguiente figura.

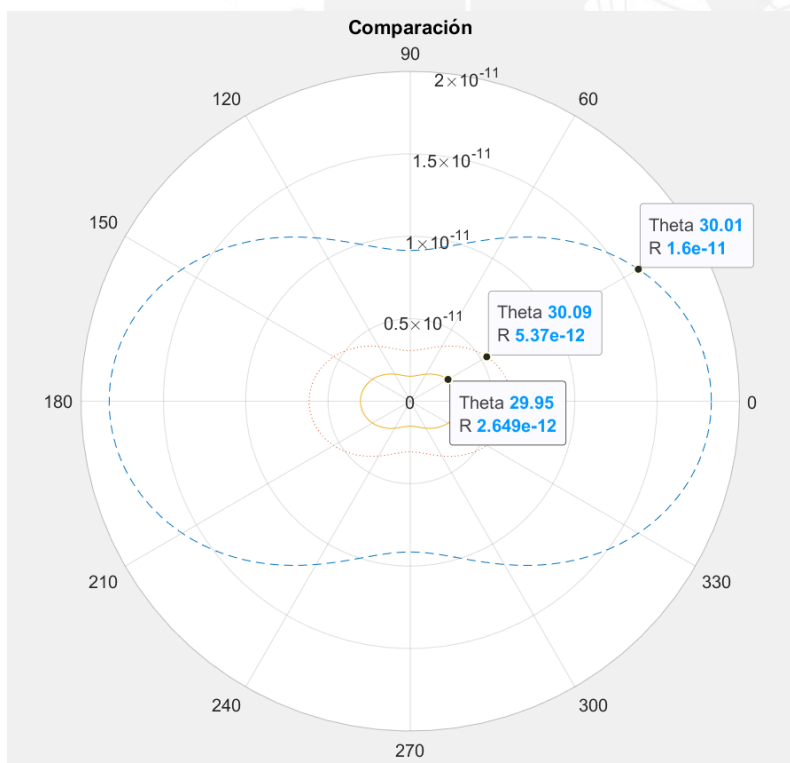


Figura 2. Comparación de la potencia de la luz dispersada por luces con distintas longitudes de onda. (- - luz láser de 405 nm, ... luz láser de 532 nm, \_\_ luz láser de 635 nm, elaboración propia)

En esta figura se puede observar la variación entre las distintas longitudes de onda siendo la interior la longitud de onda correspondiente a un color rojo, la intermedia a un color verde y la exterior a una luz color azul. Mientras que en la siguiente figura se puede explorar la potencia de luz que dispersa un láser verde de 3W.

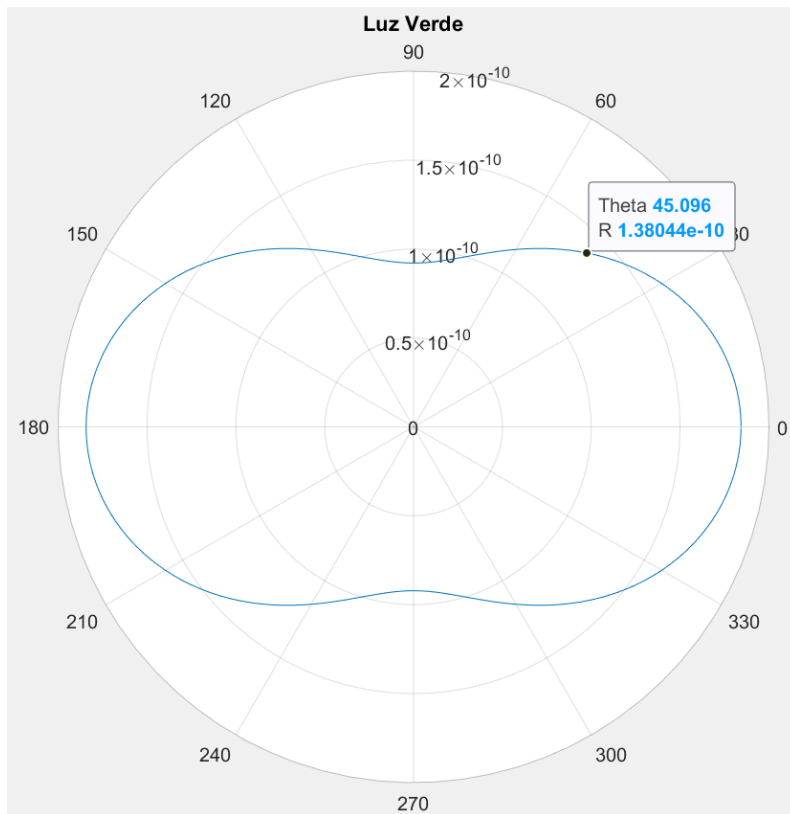


Figura 3. Resultados de simulación de dispersión

En esta gráfica se puede observar de forma aproximada la potencia dispersada que es de 138 pW, según los valores que se pueden obtener de la simulación a un ángulo de aproximadamente 45°, el cual es interesante para la aplicación por ser un valor típico en estas aplicaciones [32], [33].

### 2.3.2 Lentes Asféricas y Colimadores

Se define a un lente como un objeto fabricado con un material transparente que permite desviar la trayectoria de la luz para formar imágenes [34]. Este cambio de dirección se explica por

medio de la ley de Snell la cual relaciona la dirección de la luz y el índice de refracción en dos medios con la ecuación (2) [35] [36].

$$n_1 \cdot \sin(\alpha_1) = n_2 \cdot \sin(\alpha_2) \quad (2)$$

Donde  $n$  es el índice de refracción del medio y  $\alpha$  es el ángulo del haz de luz en el medio con referencia al plano de intersección entre los medios.

De esta ecuación se puede derivar la ecuación de la refracción en un objeto esférico la cual lleva finalmente a la ecuación conocida como the lensmaker equation.

$$\frac{1}{f} = (n \cdot 1) \cdot \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (3)$$

Siendo  $f$  la distancia focal del lente,  $n$  el índice de refracción del lente y  $R_1$  y  $R_2$  los radios de curvatura de las superficies del lente. Sin embargo, esta ecuación considera un lente de grosor despreciable. En caso se considere un lente real, el grosor del lente se introduce en la siguiente ecuación.

$$\frac{1}{f} = (n \cdot 1) \cdot \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n-1)d}{nR_1R_2} \right) \quad (4)$$

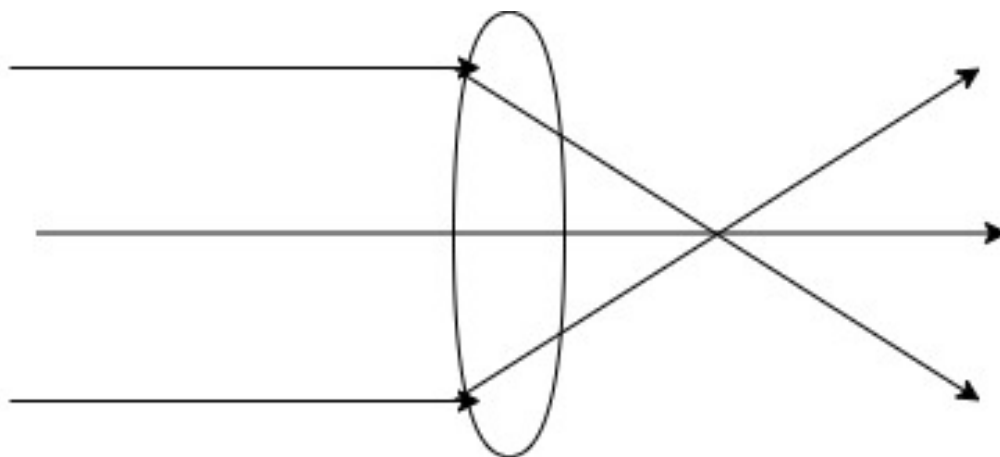


Figura 4. Efecto de una lente esférica en un haz de luz (elaboración propia)

En la figura 2 se puede observar de forma gráfica el efecto de un lente sobre los rayos de luz. Este puede tener efectos como hacer que una imagen se pueda ver más grande, pequeña o deformarla.

Además, es posible definir la magnificación del lente con las siguientes ecuaciones.

$$m = \frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} \quad (5)$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s'} - \frac{1}{s} \quad (6)$$

Siendo en estas ecuaciones  $m$  el factor de magnificación,  $y'$  la imagen virtual, y la imagen real,  $s'$  la distancia entre la imagen virtual y el centro óptico del lente,  $s$  la distancia entre la imagen virtual real y el centro óptico del lente.

A pesar de las ventajas presentadas de este instrumento es posible encontrar de igual manera desventajas. Estas son los distintos tipos de aberraciones que estos pueden presentar. En primer lugar, se tiene la aberración cromática, la cual se presenta cuando un lente es afectado por rayos de distintas longitudes de onda. Estas ondas actúan de forma independiente generando así que la imagen se separe por colores.

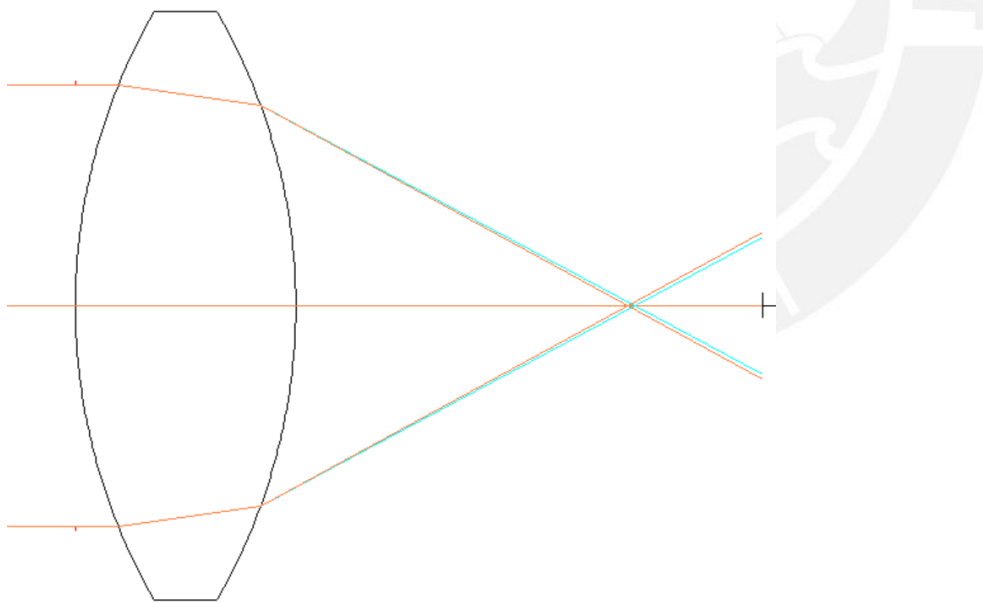


Figura 5 Efecto de aberración cromática (elaboración propia)

En la figura 3 se puede observar cómo las líneas de distintas longitudes de onda que deberían cruzarse en el mismo punto encuentran el punto de cruce (foco) en distintos lugares. Esto genera un desenfoque entre los colores de la imagen.

La mejor forma de corregir este error utilizando lentes es utilizando un par de lentes acromático.

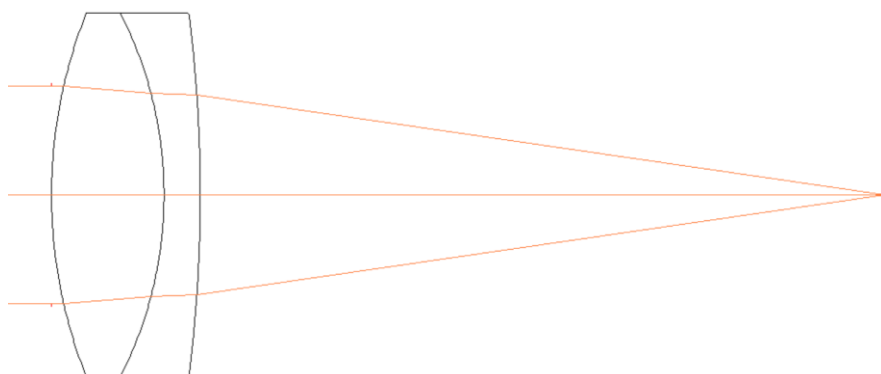


Figura 6. Par de lentes acromático (elaboración propia)

En la figura 4 se puede observar como el error mostrado en la figura 3 ha sido corregido. En esta imagen se simula la misma cantidad de longitudes de onda que en la figura anterior. Sin embargo, se puede observar cómo estas se concentran en un solo punto. Es decir, tienen un mismo foco.

En segundo lugar, se tiene la aberración esférica. Esta es una aberración causada por el efecto esférico del lente. Al ser totalmente esférico los rayos de luz a los bordes del lente se comportan de forma distinta a los que están más cercanos al eje óptico.

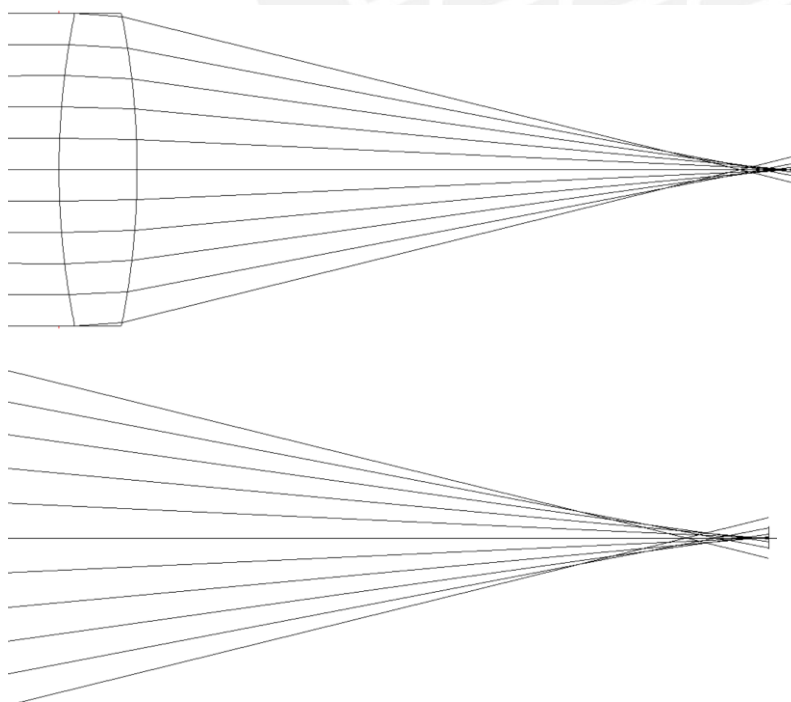


Figura 7. Efecto de aberración esférica (elaboración propia)

En la figura 5 es posible observar como el lente genera el error antes mencionado obteniendo que el foco es distinto a media que los rayos se alejan del centro óptico del lente.

Una opción para la corrección de la aberración esférica son las lentes asféricas. Estos lentes son instrumentos ópticos que han logrado una alta relevancia en las ciencias actuales [37]. Estos lentes presentan curvaturas que generan que la luz que las atraviesa cambie su dirección logrando así reducir el error.

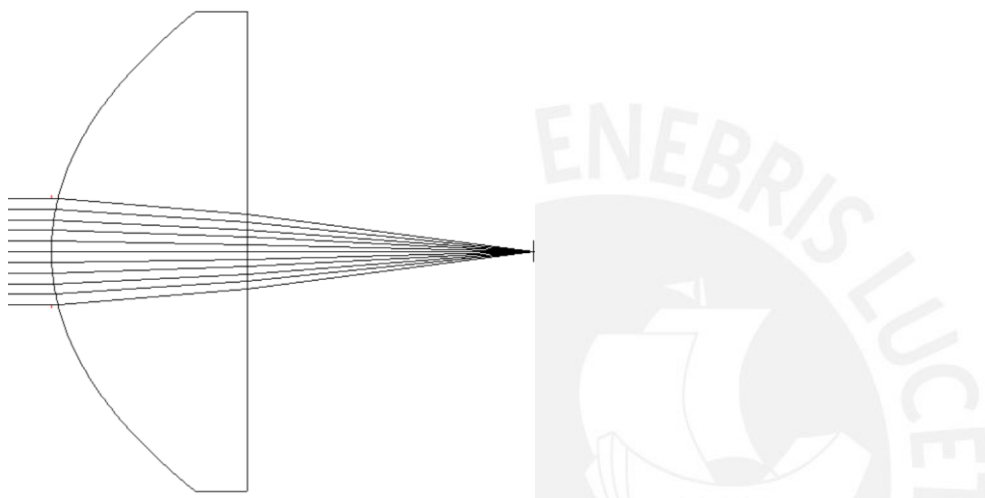


Figura 8. Efecto de corrección de una lente asférica (elaboración propia)

Existen otros errores como el de curvatura de campo o el de coma, sin embargo, estos no son tan críticos para la calidad de la imagen, en caso se desee ahondar en el tema consultar [38].

Habiendo mencionado ya la forma de funcionamiento y los errores típicos de los lentes es oportuno mencionar el efecto de colimación que puede tener un lente sobre un haz de luz.

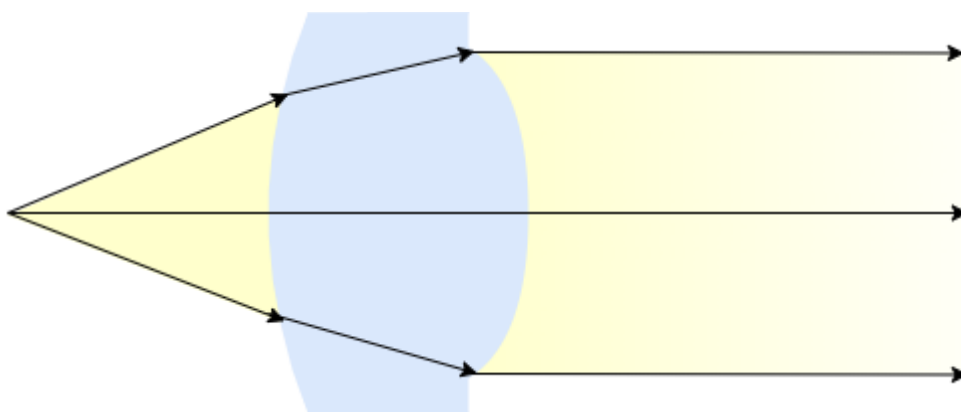


Figura 9. Efecto de un lente colimador en un haz de luz (elaboración propia)

Como puede observarse en la figura 7 un lente colimado tiene como efecto paralelizar los rayos entrantes a este lente. Esto se logra por medio de diseñar un lente con el foco puesto en el infinito.

### 2.3.3 Técnicas para el procesamiento de imágenes

Existen distintos métodos para la identificación de partículas en imágenes. Los dos principales son el método de binario y el método por contorno. Para el método binario se le asigna un valor a cada píxel de la Figura y si este valor pasa cierto límite se considera como partícula. Este método es útil para medir la concentración de partículas en la Figura.

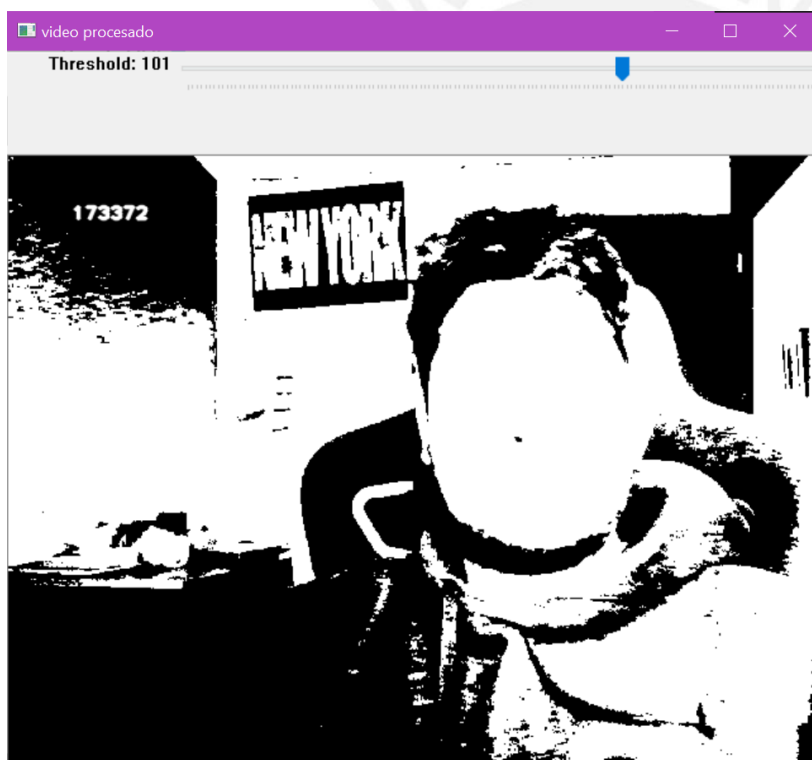


Figura 10. Imagen de procesamiento de foto utilizando thresholding binario (elaboración propia)

El método por contorno trabaja por medio de una comparación en el contraste de la Figura para definir el contorno de la partícula. Este método es útil cuando se desea medir el tamaño de la partícula.

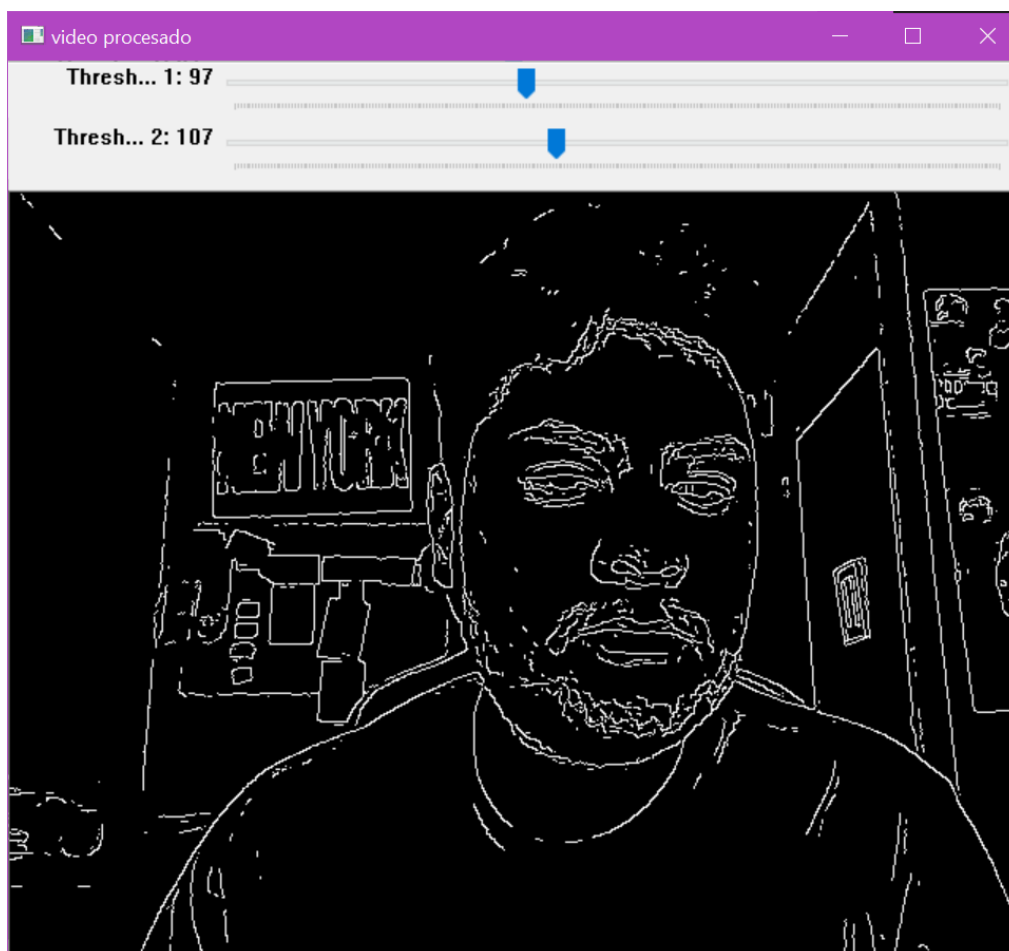


Figura 11. Imagen de detección de bordes por medio de Canny Edge Detection (elaboración propia)

Por otro lado, se tiene al machine learning, esta es una rama de las ciencias computacionales que se enfoca en lograr que una computadora aprenda un comportamiento basándose en información empírica. En [39] se definen y comparan cinco técnicas de machine learning. Se pudo concluir de esta investigación que los modelos que ofrecen mejor desempeño son los basados en la técnica del árbol de decisiones. En métricas de precisión destaca el algoritmo de Random Forest. En [40] se puede ver como se usa esta técnica para predecir el tamaño de las partículas y corregir la información obtenida de la Figura de un sensor CMOS. La técnica consiste en la clasificación por medio del uso de múltiples arboles de decisiones donde cada árbol de decisión depende de un vector aleatorio y son independientes entre sí [41].

#### 2.3.4 Sensores para detección óptica

En referencia al sensor para la detección óptica se necesita de un sensor que sea capaz de capturar fotones y transformar esta señal de entrada a una señal analógica o digital. Los sensores fotográficos son una opción viable ya que este tipo de instrumentos contienen en sus empaquetados los circuitos necesarios para realizar el proceso de muestreo de la señal y luego convertirla en una señal de tipo eléctrica o en información digital.

Como se denota en [30] la potencia de la señal que llega a los sensores en este tipo de aplicaciones es muy pequeña, casi en el orden de femtowatts. Es por esto por lo que se definen ciertos parámetros comunes de los sensores para optimizar la detección de las partículas. El primer a ser mencionado guarda relación con la longitud de onda de la luz que es emitida hacia el sensor. Esta característica es la eficiencia cuántica y es la capacidad de transformar los fotones en electrones. Esta varía con relación a la longitud de onda y los tonos verdes son los que tienen la mayor eficiencia cuántica. Esto es debido a que el color verde es el color que mejor procesa el cerebro humano y estos sensores buscan que la imagen mostrada sea lo más parecida a la que ven las personas. Esto puede observarse en distintos datasheets de distintos sensores.

**Quantum Efficiency Plot (RGB & Mono)**

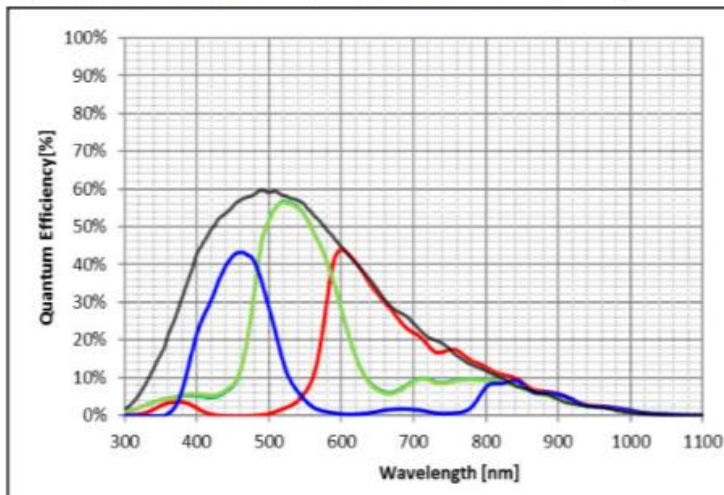


Figura 12. Gráfica de eficiencia cuántica en modo monocromático y policromático en sensor Canon (extraído de [42])

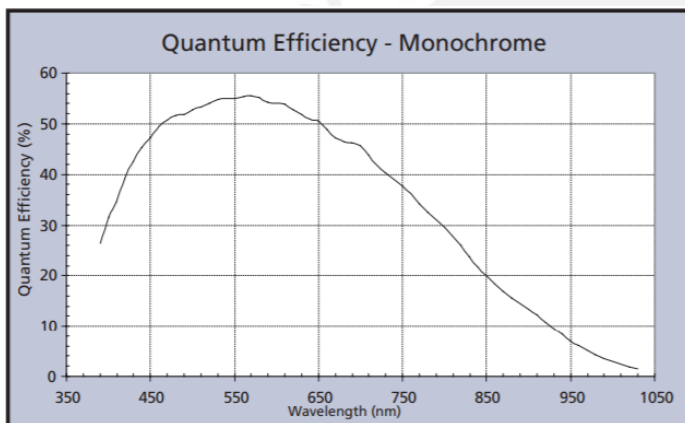


Figura 13. Gráfica de eficiencia cuántica de sensor monocromático Micron ( extraído de [43] )

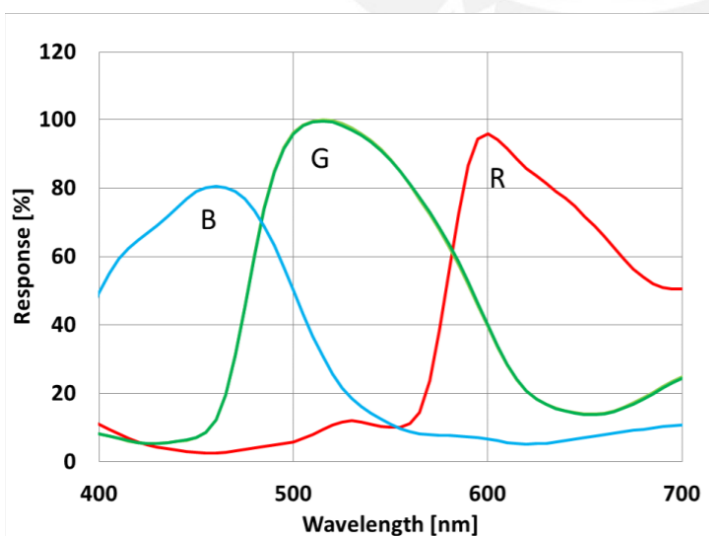
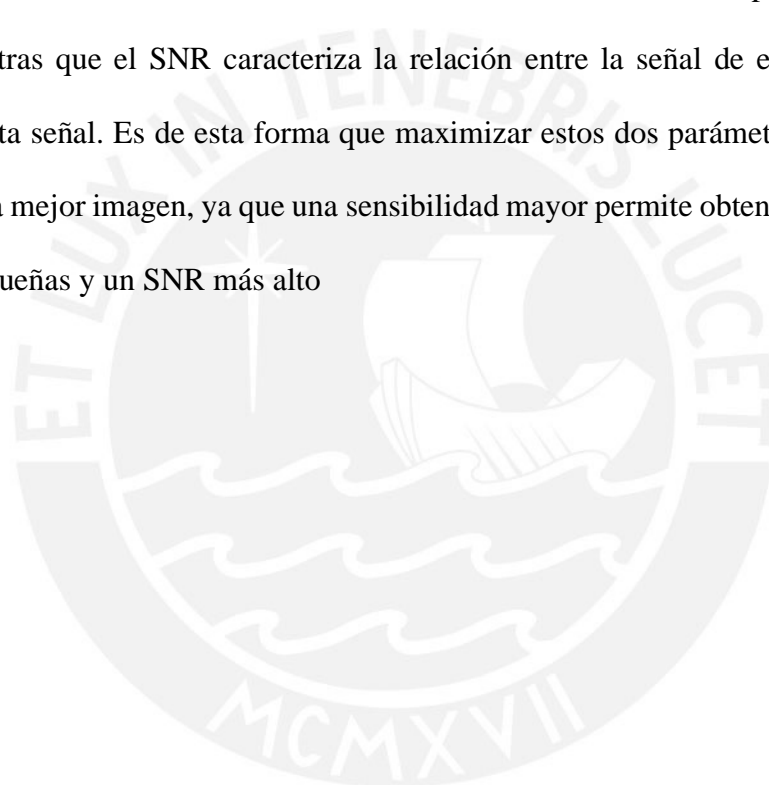


Figura 14. Gráfica de eficiencia cuántica de sensor policromático Sony ( extraído de [44] )

Como se observa en las distintas figuras es una regla general que la eficiencia cuántica se encuentra en los tonos verdes al redor de los 500 nm de longitud de onda. Esto nos da una señal de cómo debería ser seleccionado el sensor en relación con la fuente de luz para lograr la mayor eficiencia cuántica.

Otro par de parámetros a tomar en cuenta, basándose en el mismo motivo de la escasa señal a la entrada del sensor, es la sensibilidad del sensor y el ratio señal a ruido (SNR). La sensibilidad es la medida que nos da un sensor de cuanta señal de entrada es necesaria para variar la señal de salida. Mientras que el SNR caracteriza la relación entre la señal de entrada y el ruido generado por esta señal. Es de esta forma que maximizar estos dos parámetros es importante para obtener una mejor imagen, ya que una sensibilidad mayor permite obtener información de señales más pequeñas y un SNR más alto



### 2.3.5 Propuesta de Solución

Basandose en las partes estudiadas del sistema se tiene una propuesta de solución en la que tiene un instrumento para la detección de partículas basado en el concepto de detección de partículas por medio de una imagen. El diagrama de bloques propuesto para este sistema sería el siguiente.

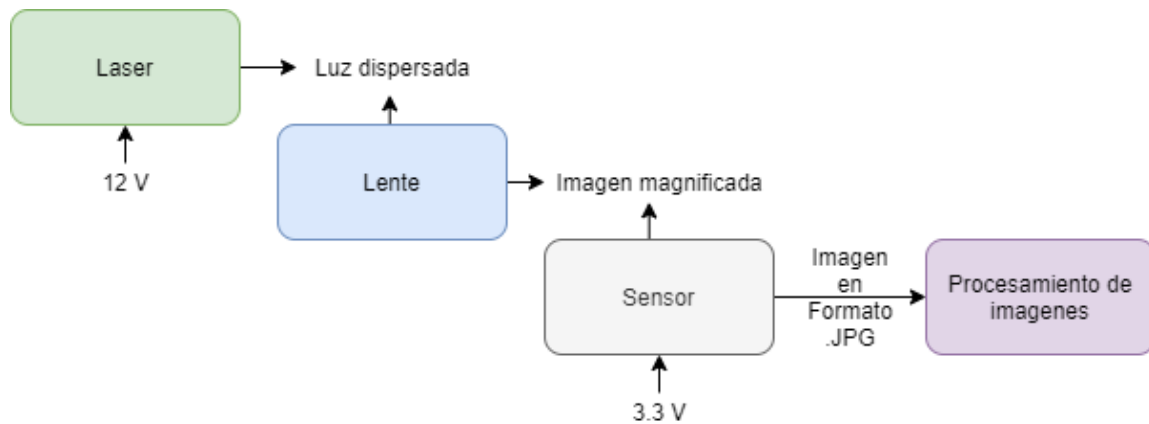


Figura 15. Diagrama de bloques de la solución propuesta (elaboración propia)

Añadido a esto se tiene un diagrama de la posible disposición de elementos del instrumento.

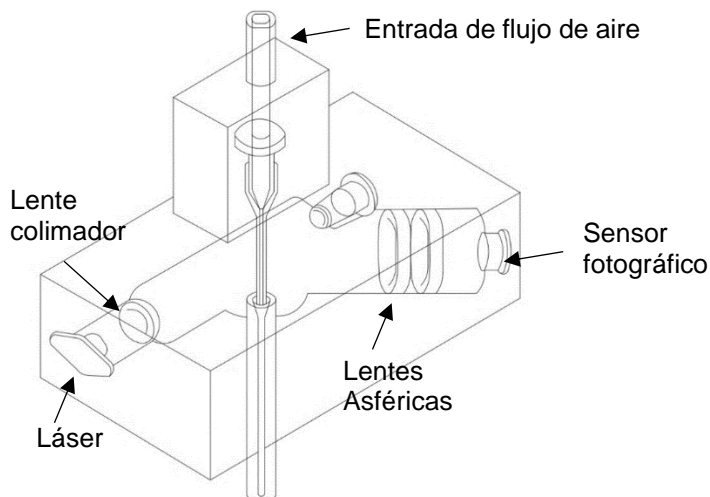


Figura 16. Bosquejo de detector óptico (elaboración propia)

## Conclusiones

En primer lugar, se puede concluir es oportuno replantear el proceso para la correcta sustentación de calidad de equipos de protección respiratoria en el territorio peruano ya que al ser un proceso no automatizado y dirigido incurre en una mayor cantidad de esfuerzo para realizarse y se realiza con menos eficiencia.

También se puede notar que se ha logrado identificar las alternativas en el mercado para la resolución del problema propuesto. Sin embargo, estas alternativas tienen un costo elevado, por lo cual el diseño y fabricación de un equipo que cumpla con las funciones de equipos como el TSI 8130 A es una opción más viable en relación con el costo.

Se puede concluir también que la selección de una tecnología de detección de partículas debe ser escogida basándose en la partícula que se desea medir ya que existen opciones como el CPC que tienen un funcionamiento capaz de detectar partículas nanométricas, pero con un costo mayor al de instrumentos que pueden ser igual de eficaces para medir tamaños de partículas más grandes.

Agregado a esto está el hecho de que estas pruebas y ensayos deberían buscar acercarse más a escenarios reales por medio de inclusión de tecnologías como las del flujo variable, de esta manera se puede ver el comportamiento del respirador ante un escenario más coherente con su objetivo.

Respecto a la segunda sección del documento se han identificado los principios necesarios para poder diseñar un equipo de detección de partículas entendiendo cada una de sus partes y el funcionamiento de estas en conjunto para lograr un diseño adecuado de un sistema de detección de partículas.

## Recomendaciones y trabajos futuros

En búsqueda de una implementación se recomienda la utilización de un procesamiento de imágenes basado en thresholding binario que permita la calibración por medio del factor humano. Esto es para poder evitar procesos computacionales complejas que pueden resultar innecesarios. El thresholding binario, además, tiene la capacidad suficiente ya que lo que se busca detectar en un primer lugar es la presencia de partículas más no hacer una diferenciación entre ellas. En caso se busque algo como lo último mencionado, métodos como el thresholding adaptativo o inclusive la detección de bordes puede resultar más efectivo.

Se recomiendo la búsqueda de un sensor con el tamaño de pixel más pequeño posible ya que la magnificación del sistema óptico deberá ser menor o en todo caso se pueden detectar partículas más pequeñas con la misma magnificación.

Se recomiendo la utilización de lentes esféricas ya que el error esférico provocado por lentes esféricos puede resultar una fuente de error compleja de resolver. Además, el uso de lentes esféricas disminuye la cantidad de elementos que son necesarios en un sistema óptico para corregir estos errores.

Finalmente, se sugiere utilizar un láser con la mayor potencia disponible, dejando un poco de lado los demás parámetros. Esto se debe a que los lasers más sofisticados tienen características que no son necesarias para esta aplicación como la coherencia y esto puede ser motivo de encarecimiento.

## Bibliografía:

- [1] M. A. Shereen, S. Khan, A. Kazmi, N. Bashir, and R. Siddique, “COVID-19 infection: Origin, transmission, and characteristics of human coronaviruses,” *J. Adv. Res.*, vol. 24, pp. 91–98, 2020, doi: 10.1016/j.jare.2020.03.005.
- [2] World Health Organization, “WHO Director-General’s opening remarks at the media briefing on COVID-19 - 11 March 2020,” 2020. <https://www.who.int/dg/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19---11-march-2020> (accessed May 26, 2020).
- [3] World Health Organization, “Coronavirus disease (COVID-2019) Situation Report - 170,” 2020. .
- [4] Ministerio de Salud, “Covid 19 en el Perú .” [https://covid19.minsa.gob.pe/sala\\_situacional.asp](https://covid19.minsa.gob.pe/sala_situacional.asp) (accessed Jul. 09, 2020).
- [5] Johns Hopkins Coronavirus Resource Center, “COVID-19 Map .” <https://coronavirus.jhu.edu/map.html> (accessed Jul. 09, 2020).
- [6] Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria, “Consulta por Partida,” 2020. <http://www.aduanet.gob.pe/cl-ad-itconsultadwh/ieITS01Alias> (accessed Jun. 04, 2020).
- [7] National Institute for Occupational Safety and Health, “CDC - NIOSH-Approved N95 Particulate Filtering Facepiece Respirators - 3M Suppliers List.” [https://www.cdc.gov/niosh/npptl/topics/respirators/disp\\_part/N95list1.html](https://www.cdc.gov/niosh/npptl/topics/respirators/disp_part/N95list1.html) (accessed Jun. 04, 2020).
- [8] National Institute for Occupational Safety and Health, “Surgical N95 Respirators | NPPTL | NIOSH | CDC.” [https://www.cdc.gov/niosh/npptl/topics/respirators/disp\\_part/respsource3surgicaln95.html](https://www.cdc.gov/niosh/npptl/topics/respirators/disp_part/respsource3surgicaln95.html) (accessed Jul. 07, 2020).
- [9] Instituto Nacional de Calidad, “DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN RESPIRATORIA. Respirador filtrante de protección contra partículas. Requisitos y métodos de ensayo. 1a Edición.” Lima, pp. 1–59, 2020, Accessed: Jul. 07, 2020. [Online]. Available: <http://normaslibres.inacal.gob.pe:8095/detalle.aspx?id=31814>.
- [10] Office of the Federal Register National Archives and Records Administration, “Code of Federal Regulations 42,” 2004.
- [11] TSI Incorporated, “Filter Tester Model 8130a,” 2020. [https://tsi.com/getmedia/5ee9520b-eadf-4ad9-89a4-1be3c7bd2c5c/3160-Auto-Filter-Test\\_US\\_5001197\\_RevD\\_Web?ext=.pdf](https://tsi.com/getmedia/5ee9520b-eadf-4ad9-89a4-1be3c7bd2c5c/3160-Auto-Filter-Test_US_5001197_RevD_Web?ext=.pdf) (accessed May 19, 2020).
- [12] TSI Incorporated, “Advanced Electro Spray Aerosol Generator Model 3482,” 2020. .
- [13] TSI Incorporated, “Automated Filter Tester Model 3160.” [https://tsi.com/getmedia/5ee9520b-eadf-4ad9-89a4-1be3c7bd2c5c/3160-Auto-Filter-Test\\_US\\_5001197\\_RevD\\_Web?ext=.pdf](https://tsi.com/getmedia/5ee9520b-eadf-4ad9-89a4-1be3c7bd2c5c/3160-Auto-Filter-Test_US_5001197_RevD_Web?ext=.pdf) (accessed Jun. 04, 2020).
- [14] J. Wang and P. Tronville, “Toward standardized test methods to determine the effectiveness of filtration media against airborne nanoparticles,” *J. Nanoparticle Res.*, vol. 16, no. 6, 2014, doi: 10.1007/s11051-014-2417-z.
- [15] S. Rengasamy and B. C. Eimer, “Nanoparticle filtration performance of niosh-certified particulate air-purifying filtering facepiece respirators: Evaluation by light scattering photometric and particle number-based test methods,” *J. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 9, no. 2, pp. 99–109, 2012, doi: 10.1080/15459624.2011.642703.
- [16] Y. Wang and J. F. Muth, “An optical-fiber-based airborne particle sensor,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 9, 2017, doi: 10.3390/s17092110.
- [17] F. Pedersini, “Improving a Commodity Dust Sensor to Enable Particle Size Analysis,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 68, no. 1, pp. 177–188, 2019, doi:

- 10.1109/TIM.2018.2834178.
- [18] D. A. Hapidin, M. M. Munir, Suprijadi, and K. Khairurrijal, "Development of a new personal air filter test system using a low-cost particulate matter (PM) sensor," *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 54, no. 2, pp. 203–216, 2020, doi: 10.1080/02786826.2019.1678734.
- [19] American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Determining the Initial Efficiency of Materials Used in Medical Face Masks to Penetration by Particulates Using Latex Spheres," vol. 03, no. Reapproved 2017, pp. 1–8, 2017, doi: 10.1520/F2299.
- [20] Q. Wang, L. Golshahi, and D. R. Chen, "Advanced testing method to evaluate the performance of respirator filter media," *J. Occup. Environ. Hyg.*, vol. 13, no. 10, pp. 750–758, 2016, doi: 10.1080/15459624.2016.1177647.
- [21] H. Yuasa *et al.*, "Breathing simulator of workers for respirator performance test," *Ind. Health*, vol. 53, no. 2, pp. 124–131, 2015, doi: 10.2486/indhealth.2014-0079.
- [22] H. Duan, F. J. Romay, C. Li, A. Naqwi, W. Deng, and B. Y. H. Liu, "Generation of monodisperse aerosols by combining aerodynamic flow-focusing and mechanical perturbation," *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 50, no. 1, pp. 17–25, 2016, doi: 10.1080/02786826.2015.1123213.
- [23] E. Gozzer, "Covid-19 Y La Necesidad De Actuar Covid-19 and the Need for Action To," *Rev. Peru. Med. Exp. Salud Publica*, vol. 37, no. 2, pp. 371–373, 2020.
- [24] The International Organization for Standardization, "ISO 16972:2020 - Respiratory protective devices — Vocabulary and graphical symbols," 2020. <https://www.iso.org/standard/68425.html> (accessed Jun. 23, 2020).
- [25] V. Mix and J. Linkermann, "CCD vs CMOS," *Vis. Sensors*, no. March, pp. 10–13, 2011.
- [26] K. Weber, "CCDs vs. CMOS," *Prod. Clips*, no. September, pp. 1–4, 2009.
- [27] The International Organization for Standardization, "Respiratory protective devices - Methods of test equipment - Part3: Determination of particle filter penetration," vol. 2012, 2012.
- [28] The International Organization for Standardization, "Breathing system filters for anaesthetic and respiratory use - Part 1: Salt test method to assess filtration performance," 2003.
- [29] Jeff Hecht, *Understanding Lasers: An Entry-Level Guide*, 4th Edition. Wiley, 2016.
- [30] A. Mason, S. C. Mukhopadhyay, and K. P. Jayasundera, *Sensing Technology: Current Status and Future Trends IV*, vol. 12. 2015.
- [31] S. Qi, *Analytical Techniques in the Pharmaceutical Sciences*. 2016.
- [32] D. Adams and S. Ament, "Understanding Aspheric Lenses," *Opt. Photonik*, vol. 13, no. 4, pp. 60–63, 2018, doi: 10.1002/opph.201800033.
- [33] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, Segunda. The McGraw-Hill Companies, Inc., 1996.
- [34] J. Chaves, *Introduction to Nonimaging Optics*. Madrid: Taylor & Francis, 2008.
- [35] Y. Yagiu, T. Kumazawa, and M. Shimaoka, "New collimating lens system for laser diode package," *Proc. - Electron. Components Technol. Conf.*, pp. 1135–1138, 1993, doi: 10.1109/ectc.1993.346692.
- [36] M. Zhang, W. Shi, and Z. Xu, "Systematic comparison of five machine-learning models in classification and interpolation of soil particle size fractions using different transformed data," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 24, no. 5, pp. 2505–2526, 2020, doi: 10.5194/hess-24-2505-2020.
- [37] R. Hussain *et al.*, "An ultra-compact particle size analyser using a CMOS image sensor and machine learning," *Light Sci. Appl.*, vol. 80, pp. 187–195, 2020.

- [38] L. Breiman, “Random forests,” *Mach. Learn.*, vol. 45, pp. 5–32, 2001, doi: 10.1201/9780367816377-11.
- [39] CANON U.S.A., “5MP GLOBAL SHUTTER CMOS SENSOR.” p. 2, 2019.
- [40] Micron, “MT9M001 CMOS Camera Datasheet,” *Micron*. pp. 1–35, 2004.
- [41] Sony Corporation, “IMX219PQH5-C.” pp. 1–96, 2014, [Online]. Available: [https://publiclab.org/system/images/photos/000/023/294/original/RASPBERRY\\_PI\\_CAMERA\\_V2\\_DATASHEET\\_IMX219PQH5\\_7.0.0\\_Datasheet\\_XXX.PDF](https://publiclab.org/system/images/photos/000/023/294/original/RASPBERRY_PI_CAMERA_V2_DATASHEET_IMX219PQH5_7.0.0_Datasheet_XXX.PDF).

