UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

Facultad de Arquitectura e Ingeniería

Maestría en Diseño Industrial y de Procesos

Evaluación en la eficiencia de filtración con diferentes materiales para el filtro de la mascarilla VMO V2 mediante el método de medio poroso frente al SARS-CoV-2

Joselin Estefania Villamarin Barriga

Nota del autor
Joselin Estefanía Villamarin Barriga, Facultad de Ingeniería Arquitectura e Ingeniería, Universidad Internacional SEK.
Director Ing. Jaime Vinicio Molina Osejos, M.Sc.
Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:
jevillamarin.mdin@uisek.edu.ec

Declaración Juramentada

Yo, Joselin Estefanía Villamarin Barriga, con cédula de identidad 171843394-7, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

JOSELIN ESTEFANÍA VILLAMARIN BARRIGA
C.I.: 171843394-7

Índice de contenido

Declaración Juramentada 2
Resumen 8
Abstract 9
Introducción 10
Antecedentes 10
Planteamiento del problema 14
Justificación 15
Hipótesis 16
Estado del arte 17
SARS-CoV-2 en aerosoles y gotas 17
Filtración de partículas 17
Capacidad del material filtrante 17
Comportamiento en la Filtración 18
Eficiencia de Filtración 19
Eficiencia a la Filtración NIOSH 19
Mascarillas adecuadas para prevenir coronavirus 21
Componentes y espesores mascarillas quirúrgicas 21
Componentes y espesores mascarillas filtrantes 21
CFD 21
Ecuación Navier Stokes 22
Capa límite 22
Convergencia 24
Medio poroso 24
Método 26
Método de investigación 26
Metodología 26
Diagrama de procesos del método 27
Selección de materiales 28
Ácido poli láctico (PLA) 28
Fibra de polipropileno (PP) 28
Fibra de algodón 29
Espuma de filtro de poliuretano (PU) 29
Selección del fluido a simular 29

Parámetros para el diseño de la mascarilla 30
Modelo CAD 31
Procedimiento de simulación 33
Resultados 42
Curvas de convergencia 42
Resultados de Velocidad 43
Resultados velocidad de la simulación para el filtro de fibra de polipropileno 43
Resultados velocidad de la simulación para el filtro de fibra de algodón 45
Resultados velocidad de la simulación para el filtro de espuma de poliuretano 46
Discusión de resultados 48
Conclusiones 51
Recomendaciones 53
Referencias Bibliográficas 54

Índice de figuras

Figura 1. Eficiencia de filtración en función del tamaño de partícula(NIOSH, 2003)..... 18
Figura 2. Capa Límite (Altair, 2019)..... 23
Figura 3. Diagrama de procesos del método empleado..... 27
Figura 4. Selección de Grupo y Población.(DINED, 2020)..... 30
Figura 5. Modelos 3D. (DINED, 2020)..... 31
Figura 6. Partes modelo de la mascarilla VMO V2..... 32
Figura 7. Mascarilla ensamblada..... 32
Figura 8. Maniqui con modificaciones tracto respiratorio..... 32
Figura 9. Modelo de mascarilla en 3D (a) vista lateral (b) vista frontal..... 33
Figura 10. Modelo 2 de mascarilla en 3D..... 34
Figura 11. Modelo 3 de mascarilla en 3D..... 34
Figura 12. Mallado 2D "Automesh"..... 35
Figura 13. Verificación mallado 2D "Mask"..... 36
Figura 14. Análisis de la calidad del mallado 2D..... 36
Figura 15. Análisis de la calidad del mallado 2D empleando la herramienta smooth..... 37
Figura 16. Creación de componentes..... 38
Figura 17. Configuración entrada..... 38
Figura 18. Configuración de las salidas mediante colores, Verde: Fosa Nasal 1; Marrón: Fosa Nasal 2; Azul: Boca..... 39
Figura 19. Verificación mallado 3D "Mask"..... 40
Figura 20. Verificación creación capa límite..... 40
Figura 21. Asignación de propiedades del fluido y filtro a la capa límite..... 40
Figura 22. Renombrar los componentes..... 41
Figura 23. Convergencia SFPP..... 42
Figura 24. Convergencia SFA..... 42
Figura 25. Convergencia SFPU..... 43
Figura 26. Velocidad SFPP..... 43
Figura 27. Velocidad SFPP, corte en el plano Z..... 44
Figura 28. Líneas de flujo SFPP..... 44
Figura 29. Velocidad SFA..... 45
Figura 30. Velocidad SFA, corte en el plano Z..... 45
Figura 31. Líneas de flujo SFA..... 46
Figura 32. Velocidad SFPU..... 46
Figura 33. Velocidad SFPU, corte en el plano Z..... 47
Figura 34. Líneas de flujo SFPU..... 47
Figura 35. Grafico del modelo ajustado de EF vs Permeabilidad..... 50

Índice de tablas

Tabla 1. *Propiedades del PLA*..... 28
Tabla 2. *Propiedades fibra polipropileno*..... 28
Tabla 3. *Propiedades fibra algodón*..... 29
Tabla 4. *Propiedades espuma de filtro de poliuretano*..... 29
Tabla 5. *Propiedades NaCl (2%)*..... 30
Tabla 6. *Dimensiones para el diseño*..... 31
Tabla 7. *Nomenclatura de simulaciones*..... 33
Tabla 8. *Velocidades obtenidas en la simulación y eficiencia a la filtración*..... 49
Tabla 9. *Comparación permeabilidad y eficiencia a la filtración*..... 49

Abreviaturas

OMS	Organización Mundial de la Salud
EPPs	Equipos de Protección Personal
NIOSH	Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional
DINED	Anthropometric Database (siglas en inglés)
CAESAR	Recurso Civil Americano y Europeo de Antropometría de Superficie
CFD	Computational Fluid Dynamics
CAD	Diseño asistido por computador (siglas en inglés)
CAE	Ingeniería asistida por computador (siglas en inglés)
PLA	Ácido Poli láctico
PP	Polipropileno
PU	Poliuretano

Resumen

En la presente investigación se realizó una evaluación de la eficiencia a la filtración con tres materiales diferentes para el filtro de la mascarilla VMO V2 mediante el método de medio poroso frente al SARS-CoV-2.

Para lo cual se realizó un rediseño de la mascarilla inicial considerando las medidas antropométricas para visualizar de mejor manera el comportamiento del fluido con la persona, luego se buscó las propiedades de los tres materiales a emplear en el filtro de la mascarilla, las propiedades del fluido y las condiciones de simulación de acuerdo a la norma NIOSH N95. Se efectuó la simulación del fluido mediante el método de medio poroso con el empleo de un software CAE.

Las eficiencias a la filtración obtenidas a partir de los resultados de la simulación CFD fueron: 78% para el polipropileno, 67 % para el algodón y 54% para la espuma de poliuretano. Con los resultados obtenidos se comprobó que la eficiencia a la filtración depende del tipo de material empleado en el filtro de la mascarilla, comprobando que la mejor opción para combatir el contagio del SARS-CoV-2 es el filtro de polipropileno.

Palabras clave: Medio poroso, Eficiencia a la filtración, SARS-CoV-2, CFD

Abstract

In the present investigation, an evaluation of the filtration efficiency was carried out with three different materials for the filter of the VMO V2 mask using the porous medium method against SARS-CoV-2.

For which a redesign of the initial mask was carried out considering the anthropometric measurements to better visualize the behavior of the fluid with the person, then the properties of the three materials to be used in the mask filter, the properties of the fluid and simulation conditions according to NIOSH N95 standard. The fluid simulation was carried out using the porous medium method using CAE software.

The filtration efficiencies obtained from the CFD simulation results were: 78% for polypropylene, 67% for cotton and 54% for polyurethane foam. With the results obtained, it was found that the filtration efficiency depends on the type of material used in the mask filter, verifying that the best option to combat the spread of SARS-CoV-2 is the polypropylene filter.

Key words: Porous medium, Filtration efficiency, SARS-CoV-2, CFD

Introducción

Antecedentes

A finales de año 2019, se presentó en la ciudad de Wuhan, China Central una nueva infección causada por el corona virus (Li et al., 2020). Después de unos meses, y específicamente el 29 de abril de 2020, de acuerdo al reporte de la Organización Mundial de la Salud la pandemia cuenta con más de 3,000,000 de casos confirmados en todo el mundo (OMS, 2020). El virus responsable del brote actual se llamaba originalmente nuevo corona virus, ahora renombrado SARS-CoV-2 y la infección denominada COVID-19 que se propaga fácilmente de persona a persona provocando un aumento exponencial de los casos a nivel mundial (Kennedy, 2020).

Últimamente se ha descubierto que la propagación del virus se debe también a la contaminación de superficies. Es así, que, a pesar del uso de equipos de protección personal, EPPs (Holland et al., 2020), el personal de salud continúa contagiándose con el virus, incluso luego de implementar las precauciones de barrera. La razón principal es la contaminación de las EPPs, en el aire y el medio ambiente (Ong et al., 2020). Además de las superficies de contacto comunes, incluso los pisos y las salidas de los ventiladores de aire están contaminados (Van Doremalen et al., 2010). Por lo tanto, la muerte de muchos trabajadores de la salud y de la propagación viral se debe también al uso inadecuado de EPPs.

La OMS ha declarado que la transmisión del SARS-CoV-2 se realiza principalmente a través de gotas respiratorias gruesas y rutas de contacto (World Health Organization, 2020). Por lo que las mascarillas sean han vuelto uno de los EPPS más utilizadas para la prevención del contagio, no obstante, no todos los tipos son adecuados, se debe tomar en cuenta el tipo de riesgo, pues no resulta igual convivir junto con personas contagiadas, que habitar en un

entorno sin contaminación directa. Con este antecedente se puede mencionar dos tipos de mascarillas en base a su capacidad de filtración del aire inspirado y su capacidad para proteger al usuario de la mascarilla o al resto de la población del contagio en caso de una infección de transmisión aérea (Hermosa, 2020).

Mascarillas quirúrgicas

Es un producto sanitario que cubre la boca y la nariz, utilizado como medio de barrera para minimizar la transmisión directa de agentes infecciones entre el paciente y el personal de salud. De acuerdo a la eficiencia de filtración bacteriana (BFE) pueden ser de tipo I (BFE≥95%), Tipo II y IIIR(BFE≥98%), el tipo IIR además posee resistencia a las salpicaduras (Asociación Española de Normalización, 2019).

Estás mascarillas se encuentran elaboradas por varias capas. La primera capa puede ser de un material de pulpa de papel no tejido como el algodón. La segunda capa para filtración es de polipropileno que actúa como barrera microbiana y resistente a líquidos. La tercera capa actúa como barrera y puede estar hecho de material termoplástico como polipropileno (Maturaporn, 1995).

Por lo tanto, estas mascarillas pueden prevenir la transmisión del agente infeccioso desde una persona infectada o sospechosa al resto de la población, pero su eficacia a la hora de prevenir el contagio al usuario de la misma se vuelve limitada.

Mascarillas filtrantes de protección

Son un producto que cubre la nariz, boca y mentón; que consta en su mayor parte de una adaptación facial o un material filtrante con uno o varios filtros dependiendo del modelo. El filtro protege al usuario de contaminantes ambientales tales como patógenos, agentes

químicos, citostáticos, antibióticos, etc. Pueden tener una válvula de exhalación, pero para el caso de infectados con COVID-19 no son recomendables debido a que se puede transmitir el virus por medio de la válvula (Asociación Española de Normalización, 2009).

Para verificar el rendimiento de una mascarilla los protocolos de la Unión Europea (UE) y el Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) se utilizan generalmente en todo el mundo. En la Unión Europea, las eficiencias mínimas para filtrar las piezas faciales FFP1 y FFP2 son 78% y 92%, respectivamente. Para los respiradores FFP3, la eficiencia mínima de filtración es del 98%. En los Estados Unidos, el NIOSH prueba y certifica los filtros y respiradores de partículas de las series 95, 99 y 100, con eficiencias de filtración mínimas requeridas de 95%, 99% y 99,97%, respectivamente. La certificación de respiradores con métodos de prueba para medir la eficiencia de filtración en estos estándares varía con el tipo de aerosol y están designados por N (no resistente al aceite), R (algo resistente al aceite) y P (fuertemente resistente, resistente al aceite) (Jung et al., 2014).

Para el caso del coronavirus la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda el uso de mascarillas con una eficiencia de filtración de al menos el 95% para partículas de 0,3 μm de diámetro. Lo que equivale a una mascarilla N95 según normativa americana NIOSH. Este nivel de protección, comparado a la clasificación europea se encuentra entre la FFP2 y FFP3. De esta manera para riesgo moderado-bajo, si no se pueden obtener mascarillas de FFP-3, bastaría con usar mascarillas FFP-2, mientras que las mascarillas FFP-3 se deberán utilizar en circunstancias donde el riesgo sea alto (Hermosa, 2020).

De acuerdo a lo mencionado las FFP3 y N95 deben ser prioritarias para profesionales de la salud que atienden a los pacientes infectados por SARS-CoV-2; ya que en estos casos se generan aerosoles el momento de las intervenciones médicas directas con el paciente lo que

aumenta el índice de contagio. El tipo de mascarilla de mayor comercialización es la N95, que contiene en su composición espuma de poliuretano, filtro de polipropileno o poliéster y para la capa de la cáscara y la cubierta de polipropileno (3M, 2018).

Además, como alternativa existe la posibilidad de realizar la impresión 3D de modelos de mascarillas con materiales como ácido poli láctico (PLA), tereftalato de polietileno con glicol modificado (PETG) o acrilonitrilo butadieno estireno (ABS); con filtros N95 o filtros de tipo quirúrgico. Con esta opción se podría tener mascarillas reutilizables, evitando de esta manera la generación indiscriminada de mascarillas comunes que actualmente se está convertido en un gran problema para el medio ambiente.

Al mismo tiempo es importante mencionar que estornudar es una forma en que los patógenos, incluido Covid-19, se propagan fácilmente, investigaciones recientes están utilizando la simulación científica del estornudo humano para apoyar el desarrollo de proyectos de EPPs mediante el uso de simulación CFD, como parte de los esfuerzos colaborativos para responder con rapidez a las necesidades urgentes no cubiertas durante la pandemia de Covid-19. Las simulaciones se utilizan para demostrar lo que sucede cuando una persona estornuda, para comprender mejor la efectividad de los diferentes EPPs que se desarrollan y se implementan, y para ayudar a mejorar su diseño (Dassault Systèmes, 2020).

Los estornudos del cuerpo humano son uno de los vehículos más eficaces para la transmisión de agentes infecciosos como el nuevo coronavirus. Estas emisiones respiratorias están formadas por una nube de gas turbulento multifásico. Dada diversas combinaciones ambientales (humedad y temperatura) la nube de gas y su carga de gotitas patógenas de varios tamaños pueden lograr un rango de alcance 7 a 8 metros y hasta 10 minutos en suspensión. La dinámica de las nubes de gas turbulento debería influir en el diseño y el uso recomendado de

máscaras quirúrgicas y de cualquier otro tipo; debido a que las mascarillas se pueden usar para reducir la propagación de una persona infectada como para prevenir la propagación a una persona no afectada. La eficacia protectora de las máscaras N95 depende de su capacidad de filtración antes mencionada.; sin embargo, estas mascarillas solo están diseñadas para una duración limitada de uso y un cierto rango de condiciones ambientales y locales. Las velocidades máximas de exhalación pueden alcanzar un rango de 10-30 m/s, creando una nube que puede abarcar aproximadamente 7-8 m (Bourouiba, 2020). Los EPPS deben tener la capacidad de resistir esta nube de gas turbulento multifásico que son generadas durante un estornudo o tos. Las máscaras quirúrgicas y N95 utilizadas actualmente no se prueban para estas características potenciales de emisiones respiratorias.

Debido a la actual pandemia mundial provocada por el coronavirus covid-19 existe un aumento impresionante de basura generada por el uso de mascarillas no biodegradables que están ocasionando un gran impacto ambiental, por ello la importancia del presente estudio radica en promover el uso de mascarillas de impresión 3D que utilicen un filtro que evite el contagio del virus y de esta manera disminuir la generación de residuos en el planeta.

Por lo mencionado, se vuelve indispensable diseñar una mascarilla que sea accesible y reutilizable para el personal de salud pueda enfrentar la lucha contra la pandemia actual.

Planteamiento del problema

Los trabajadores de la salud alrededor del mundo enfrentan un riesgo elevado de exposición a enfermedades infecciosas, incluido el nuevo coronavirus (COVID-19). Es imperativo garantizar la seguridad de los trabajadores de la salud no solo para proteger la atención continua del paciente, sino también para no continuar con la transmisión del virus.

Es evidente que, además de la población de más de 75 años, personas con inmunodeficiencia, enfermedades oncológicas y crónicas, personas que presentan síntomas (tos, fiebre o disnea) o tengan infección confirmada por corona virus, la categoría con mayor riesgo a contagio es el personal de salud (Chang et al., 2020). Por lo que se vuelve importante garantizar la protección de los trabajadores de la salud con buenos EPPs, para prevenir la transmisión del virus por parte de los operadores de SARS-CoV-2 (Cheung et al., 2020).

Uno de los principales EPPs utilizados son las mascarillas. Existen una gran variedad de tipos de mascarillas en el mercado, pero las más empleadas para la protección del virus son las quirúrgicas y filtrantes. Además, que por la pandemia existen diseños mediante impresión 3D liberados de mascarillas que no se encuentran técnicamente comprobados que sean en realidad eficientes para prevenir el contagio del coronavirus, siendo este el problema de investigación.

Justificación

El gran incremento de casos debido a la pandemia de Covid-19 está causando que la actual reserva mundial de EPPs, particularmente para máscaras médicas y respiradores, y el suministro de batas, gafas y protectores faciales sea insuficiente para satisfacer la demanda; que se encuentra dividida no solo por el número de casos de COVID-19 sino también por la desinformación, almacenamiento exagerado y compras de pánico, causando la mayor escasez de EPPs a nivel mundial. Además, que se está generando demasiada basura por el abuso excesivo de las mismas. La capacidad para expandir la producción de EPPs es limitada, y la demanda actual de mascarillas no puede satisfacerse, especialmente si continúa el uso inapropiado y extendido. Cabe mencionar, que los involucrados en primera fila son: los profesionales de la salud, personal de atención domiciliaria, personal de apoyo: fuerzas

armadas, bomberos y policías; personal de limpieza y desinfección, los cuales se están quedando actualmente sin los recursos necesarios para continuar trabajando (World Health Organization, 2020).

En vista de ello, el **objetivo principal** del presente estudio es: Evaluar la eficiencia de filtración con diferentes materiales para el filtro de la mascarilla VMO V2 mediante el método de medio poroso para combatir el SARS-CoV-2.

Con la finalidad de alcanzar el objetivo principal, los objetivos específicos planteados son:

1. Determinar las propiedades de diferentes materiales del filtro de la mascarilla VMO V2 mediante el uso del programa Ces Edu pack para emplearlas en las condiciones de creación de componentes de la simulación CFD.
2. Modelar mediante simulación CFD el flujo del fluido de cloruro de sodio de acuerdo a la normativa NIOSH para la verificación de la eficiencia a la filtración de los diferentes materiales empleados en el filtro de la mascarilla VMO V2.
3. Comparar la eficiencia de filtración de acuerdo al tipo de material utilizado en filtro de la mascarilla VMO V2 para determinar la mejor opción para combatir el contagio del coronavirus.
4. Garantizar que la evaluación de materiales para el filtro de la mascarilla VMO V2 propuestos cumplan con el parámetro de eficiencia a la filtración de acuerdo con la Norma Americana NIOSH N95.

Hipótesis

Mediante la simulación CFD se podrá seleccionar el mejor material para el filtro de la mascarilla VMO V2 que posea mayor eficiencia de filtración para evitar el contagio de coronavirus.

Estado del arte

SARS-CoV-2 en aerosoles y gotas

El coronavirus tienen un diámetro de aproximadamente 60-140 nm, siendo un virus esférico y relativamente grande (Cascella et al., 2020). Este virus puede transmitir partículas que se encuentran desde nanómetros hasta micrómetros. Cabe resaltar que el SARS-CoV-2 no viaja solo, sino a través de partículas de varios tamaños presentes en una suspensión provocada por las mucosas del sistema respiratorio humano (IDAEA, 2020).

Varias investigaciones médicas distinguen dos tipos de gotas las primeras son mayores a 5*um* y las segundas denominadas aerosoles son menores a 5 *um*, pero la realidad de acuerdo al estudio de (Johnson et al., 2011) indica que las partículas generadas al toser o estornudar se encuentra en un rango de tamaño continuo. Es así que en un espacio con pacientes infectados por SARS-CoV-2 se generarán gotas y aerosoles al toser, hablar hasta el simple hecho de respirar .Cabe resaltar que as partículas más gruesas o gotas se depositan rápidamente, mientras que las partículas más finas o aerosoles son capaces de mantenerse activas en suspensión en el aire más de tres horas e incluso días (Van Doremalen et al., 2020).

Filtración de partículas

Capacidad del material filtrante

La capacidad del material de filtro para capturar eficientemente las partículas expuestas depende de factores físicos y químicos. Dentro de los segundos se puede mencionar: la composición del filtro, espesor del filtro, densidad de empaquetamiento de la fibra, estado de carga de los medios, etc. También influye las condiciones de exposición externa tales como: composición química de partículas, tamaño de partículas, velocidad de cara o flujo de aire, estado de carga de partículas, patrón de flujo constante o inestable, temperatura, tiempo de carga y humedad relativa (Mahdavi, 2013).

Comportamiento en la Filtración

La capacidad de filtración de un material se encuentra modifica dependiendo del tamaño de partícula. Existen diferentes mecanismos de filtración debido al tamaño de las partículas, para partículas grandes el mecanismo es de filtración es de retención por impacto, mientras que para el caso de partículas pequeñas el mecanismo de retención empleado es la difusión (debido al movimiento Browniano). Las normas de los filtros especifican la eficiencia de filtración a un tamaño de 300nm; ya que es el tamaño de partícula más complicado de retener, como se muestra en la figura 1 (NIOSH, 2003).

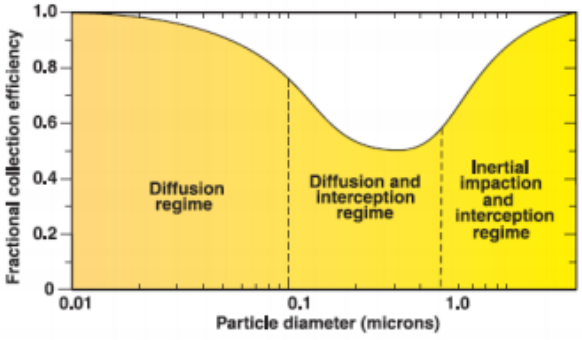

Figura 1. Eficiencia de filtración en función del tamaño de partícula(NIOSH, 2003)

De acuerdo a la literatura (Brown et al., 1990), (Fjeld & Owens, 1998), (Janssen et al., 2003) para incrementar el nivel de eficiencia del filtro, se puede adicionar al filtro un mecanismo llamado atracción electrostática. El mecanismo de atracción electrostática se reduce al aumentar la velocidad, e esta forma los filtros cargados que muestran la atracción electrostática además de los mecanismos mecánicos (difusión, intercepción e impactación inercial) se denominan como "filtros electrets". La mayoría de los filtros aprobados por NIOSH (como N95 y P100) se conocen como filtros electrets.

Eficiencia de Filtración

La filtración de partículas en aerosol depende de las características físicas como son: tamaño, densidad, forma, carga del medio filtrante y velocidad de la partícula. Si la partícula es "viva" o "infecciosa" no juega ningún papel en qué tan bien será recolectada por un filtro (Harnish et al., 2013). Una vez que se recolecta una partícula, permanecerá unida por las fuerzas de Van Der Waals y electrostáticas, y no podrá moverse fácilmente (Hinds, 2012). Los organismos biológicos no tienen capacidad para moverse a través de un filtro por sí mismos. Las partículas son muy difíciles de eliminar de un filtro una vez que se recolectadas debido a que se mantienen unidas por grandes fuerzas (Fisher et al., 2012) . De acuerdo a lo mencionado, (Brosseau & Shaffe, 2014) mencionaron que no es necesario probar un filtro de respirador con un aerosol biológico, sino centrarse en las condiciones de prueba del tipo "peor de los casos". Cuando se seleccionan y usan correctamente, los respiradores probados con estos tipos de pruebas de filtro deben proporcionar los niveles esperados de protección contra todo tipo de aerosoles en el lugar de trabajo.

Eficiencia a la Filtración NIOSH

Los respiradores de filtrantes modelo N95 aprobados por NIOSH frecuentemente se recomiendan para la protección del personal de atención médica al brindar atención a pacientes infectados con patógenos transmitidos por el aire (Brosseau et al., 2015). Las pruebas de certificación NIOSH son considerados como el método más estricto o del tipo “peor de los casos” para determinar la eficiencia a la filtración, debido al uso de aerosoles de carga neutralizada cerca del tamaño de partícula más penetrante (MPPS) (~0.050 μm para respiradores de tipo N) y a una velocidad de flujo relativamente más alta (velocidad de la cara) para producir la máxima penetración o eficiencia de filtración conservadora (Rengasamy et al., 2017).

NIOSH prueba la eficiencia a la filtración de respiradores bajo la norma 42 CFR Parte 84. Para medir la eficiencia de filtración de la serie N se prueban en un rango de velocidad de flujo 85 L/min utilizando un aerosol de cloruro de sodio polidisperso al 2% (NaCl) neutralizado por carga con un diámetro medio de conteo (CMD) de 0.075 ± 0.02 μm y una desviación estándar geométrica (GSD) de menos de 1.86. Los filtros del respirador estarán pre acondicionados a 85 ± 5% de humedad relativa y 38 ± 2.5 ° C durante 25 ± 1 h antes de medir la penetración del filtro. El ensayo debe ejecutarse a una temperatura de 25 ± 5°C y una humedad relativa de 30 ± 10% La prueba de certificación se realiza entre 90 a 100 min para cargar 200mg de aerosol de NaCl en el respirador (NIOSH, 2019). Otros estudios han utilizado un método abreviado solo tomando en cuenta aproximadamente 15 min como el tiempo donde se alcanza la máxima penetración (Rengasamy et al., 2017).

Existen dos limitaciones principales asociadas con la certificación de NIOSH y 42 CFR 84 para la utilización de los respiradores de pieza facial filtrante (FFR). Primero, NIOSH prueba las eficiencias de filtración a un diámetro medio de masa (MMD) de 300 nm, debido a que este valor representa el tamaño de partícula más penetrante (MPPS). Sin embargo, diversos estudios han demostrado el efecto de la atracción electrostática de los medios cargados de los filtros certificados por NIOSH que cambia drásticamente el MPPS hacia tamaños nanométricos (<100 nm) (Martin & Moyer, 2000), (Balazy et al., 2006) (Eninger et al., 2008) (Mostofi et al., 2011). El flujo constante (85 L / min), utilizado en la NIOSH, se vuelve la segunda limitación, que no representa completamente el flujo de respiración, ya que la respiración real se asemeja a un patrón cíclico. Por lo tanto, es muy necesario investigar el rendimiento de los filtros certificados por NIOSH bajo flujo cíclico en lugar de constante.

Mascarillas adecuadas para prevenir coronavirus

Las mascarillas pueden tener formas, materiales y construcciones diferentes de acuerdo al fabricante, lo esencial para su venta es que logren proteger a quien lleva puesta de acuerdo a las normativas respectivas.

Componentes y espesores mascarillas quirúrgicas

Una de las configuraciones más empleadas en mascarillas quirúrgicas se encuentra elaborada por capas. La primera capa puede ser de un material de pulpa de papel no tejido como el algodón, el grosor se encuentra en el rango 0,40 a 0,45 mm. La segunda capa para filtración es de polipropileno que actúa como barrera microbiana y resistente a líquidos, el grosor de la segunda capa está en el rango de 0,15mm a 0,30mm. La tercera capa actúa como barrera y puede estar hecho de material termoplástico polipropileno, el espesor se encuentra entre 0,13mm a 0,17 mm (Maturaporn, 1995).

Componentes y espesores mascarillas filtrantes

Las mascarillas filtrantes del tipo N95 generalmente utilizan materiales como espuma de poliuretano, filtro de polipropileno o poliéster y para la capa de la cáscara es una cubierta de polipropileno (3M, 2018), el espesor de estas capas se encuentra en un rango de 0,2 a 1,5 mm (Tong et al., 2016).

CFD

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una poderosa herramienta numérica que se está utilizando ampliamente para simular muchos procesos en la industria. es una técnica de simulación que puede desarrollar eficientemente soluciones de campo espacial y temporal de presión, temperatura y velocidad de fluidos, y ha demostrado su efectividad en el diseño y optimización de sistemas dentro de la industria (Norton et al., 2007). En la presente

investigación se llevará acabo el procedimiento para simular la eficiencia de los filtros de mascarillas por medio del programa Hypermesh, basado en el método de elementos finitos.

Ecuación Navier Stokes

La ecuación de Navier Stokes es una ecuación de trasporte que representa la cantidad de movimiento lineal en el dominio computacional.

$$\left[\vec{\nabla}.\vec{V}\right]\vec{V} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}P' + v\nabla^2\vec{V} \qquad \text{Ec. 1}$$

Donde:

$\vec{V}$= velocidad del fluido

ρ= densidad del fluido

$v = u/\rho$= viscosidad cinética

Las ecuaciones de Navier Stokes se basan en dos principios importantes la conservación de la masa y la cantidad de movimiento, para de esta manera efectuar la simulación de fluidos incompresibles. Para el análisis del modelo de turbulencia es imprescindible tomar en cuenta el modelo matemático y el fenómeno físico. La ecuación 1. Se reemplaza por la ecuación de Navier-Stokes de número de Reynolds promedio para flujo turbulento (Lluguay, 2016).

$$\left[\vec{\nabla}.\vec{V}\right]\vec{V} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}P' + v\nabla^2\vec{V} + \vec{\nabla}\left[\tau_{ij\ turbulento}\right] \qquad \text{Ec. 2}$$

Capa límite

La capa límite o capa límite de velocidad es una capa delgada de fluido que se forma cerca de una superficie límite donde los efectos de la viscosidad del fluido son significativos, cuando un fluido pasa por un objeto o viceversa, las moléculas de fluido que están justo al lado de la superficie límite se adhieren a él. Esto hace que las moléculas que se encuentran

justo encima de la superficie se desaceleren debido a la colisión con las moléculas que se adhieren a la superficie. En consecuencia, estas moléculas disminuyen la velocidad del flujo justo por encima de ellas. A medida que nos alejamos de la superficie del objeto, se reducen las colisiones afectadas por la superficie del objeto. Por lo tanto, se crea una capa de fluido dentro de la cual la velocidad del flujo cambia gradualmente desde cero en la superficie del objeto hasta la velocidad de la corriente libre a una cierta distancia de la superficie (Altair, 2019). Esta distancia a la que la velocidad del flujo dentro del límite alcanza esencialmente la velocidad del flujo libre se denomina espesor de la capa límite, que matemáticamente se define como la distancia a la que la velocidad del flujo es el 99% de la velocidad del flujo libre. Es imprescindible realizar el modelado de la malla de tal manera que sea lo más cercano a la pared del sólido; debido a que es la zona de máxima influencia en los resultados que se adquiridos de la simulación (Zabaleta, 2015).

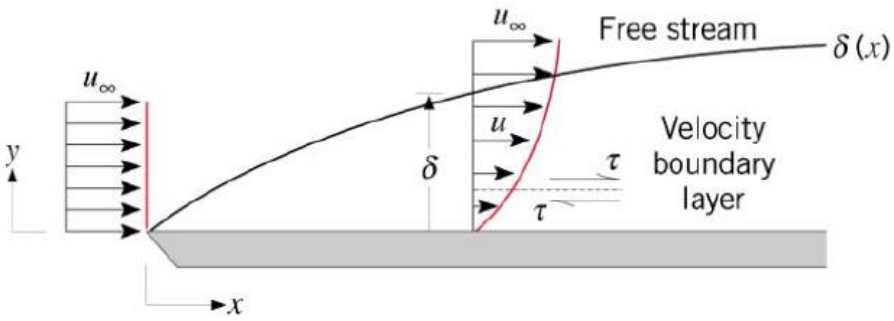

Figura 2. Capa Límite (Altair, 2019)

Como resultado de la pérdida de velocidad, se imparte un esfuerzo cortante en la superficie del objeto definida como:

$$\tau_S = \mu \frac{\delta u}{\delta y}\Big|_{y=0} \qquad \text{Ec. 3}$$

Convergencia

La convergencia de un solucionador CFD da una indicación de qué tan bien ha resuelto el conjunto de ecuaciones discretizadas para la aplicación de interés. La mayoría de los solucionadores de CFD miden la convergencia monitoreando los residuos, que representan el desequilibrio de términos en las ecuaciones gobernantes en cada iteración (Altair, 2019).

Como una regla general, cuanto menores son los residuales, menor es el error debido al desequilibrio en los términos de la ecuación. Algunos solucionadores también controlan el grado en que la solución cambia entre iteraciones. Parte importante de la simulación es garantizar que el método este bien solucionado, que se realiza mediante el criterio de convergencia. La convergencia ocurre cuando todas las proporciones de incrementos residuales y de solución caen por debajo de la tolerancia especificada (Mata, 2017).

Medio poroso

Un medio poroso es un material que se contiene dos fases: la primera es una matriz sólida y dentro de ella contiene un sistema de huecos que se denomina “poros”, los mismos que pueden presentar geometrías y topologías dependiendo del material. Donde la geometría de un material poroso representa las formas y tamaños de los poros, también la geometría determina la rugosidad de la superficie. A diferencia de la topología que informa como los poros se encuentran conectados entre sí (López, 2004).

El filtro de la mascarilla se simulará como medio poroso. El flujo de aire para un medio poroso se rige por la ecuación de Darcy-Forchheimer dada por:

$$\nabla_{pags} = -\frac{u}{K}\overrightarrow{tu} - \frac{C_F}{\sqrt{K}}\overrightarrow{tu}\left|\overrightarrow{tu}\right| \qquad \text{Ec.4}$$

Donde:

K=permeabilidad

C_F =factor de inercia adimensional

Existen varios estudios donde se aplica la metodología de medios porosos para realizar diferentes simulaciones CFD. (Vallabh et al., 2011) desarrollaron modelos computacionales eulerianos y lagrangianos para predecir la tortuosidad de medios porosos fibrosos utilizando dinámica de fluidos computacional (CFD). Por otro lado también se realizó el modelado de dinámica de fluidos computacional transitoria del proceso de fusión en la unión térmica de medios fibrosos porosos (Peksen et al., 2013). El enfoque de medio poroso se ha empleado en otros campos como en: simulaciones CFD de la zona de filtración por membrana en un biorreactor de membrana de fibra hueca sumergido (Wang et al., 2010), la simulación CFD tridimensional de la formación de patrones en un reactor de lecho compacto poco profundo para el acoplamiento oxidativo de metano (Chen et al., 2020), para simular el flujo de aire a través de los colectores de agua niebla (Montoya et al., 2020), análisis de un radiador de refrigeración desarrollado específicamente para vehículos aéreos no tripulados utilizando dinámica de fluidos computacional (Aydın et al., 2020).

Método

El presente proyecto adopta las herramientas de la dinámica de fluidos computacional (CFD) para analizar y resolver el problema de la presente investigación.

Método de investigación

El estudio se realizará con un enfoque cuantitativo en una primera etapa será una investigación exploratoria con una revisión sistemática de la literatura, la adaptación del diseño en CAD de la mascarilla y la simulación en software CAE "Hypermesh". En una segunda etapa se aplicará una investigación descriptiva mediante la cual se pueda evaluar la eficiencia de filtración obtenida en la simulación del filtro de la mascarilla VMO2 con respecto a las normativas vigentes para validar los resultados obtenidos.

Metodología

La metodología se instauró mediante la revisión del estado del arte donde se visualiza claramente la necesidad de evaluar y verificar la eficiencia de filtración de los filtros de las mascarillas de protección personal mediante el uso de herramientas computacionales, abaratando costos de fabricación debido a pruebas y ensayos con prototipos físicos. Para lo cual se necesita: primero recopilar la información de las mascarillas empleadas utilizadas para la prevención del contagio de coronavirus donde es necesario conocer los materiales comúnmente usados en los filtros y espesores de las capas, para luego seleccionar el material y espesor a emplear en el filtro de la mascarilla a simular. Luego se procedió a recolectar las propiedades del material elegido mediante el software Ces Edupack. Seguidamente se realizó el ensamble de las partes de la mascarilla en un solo cuerpo y el diseño del filtro para poder simular en el software CAE. Después se investigó y determinó los parámetros de simulación necesarios. Se realizará la simulación CFD de la mascarilla. Finalmente la efectuará la validación de los resultados obtenidos.

Diagrama de procesos del método

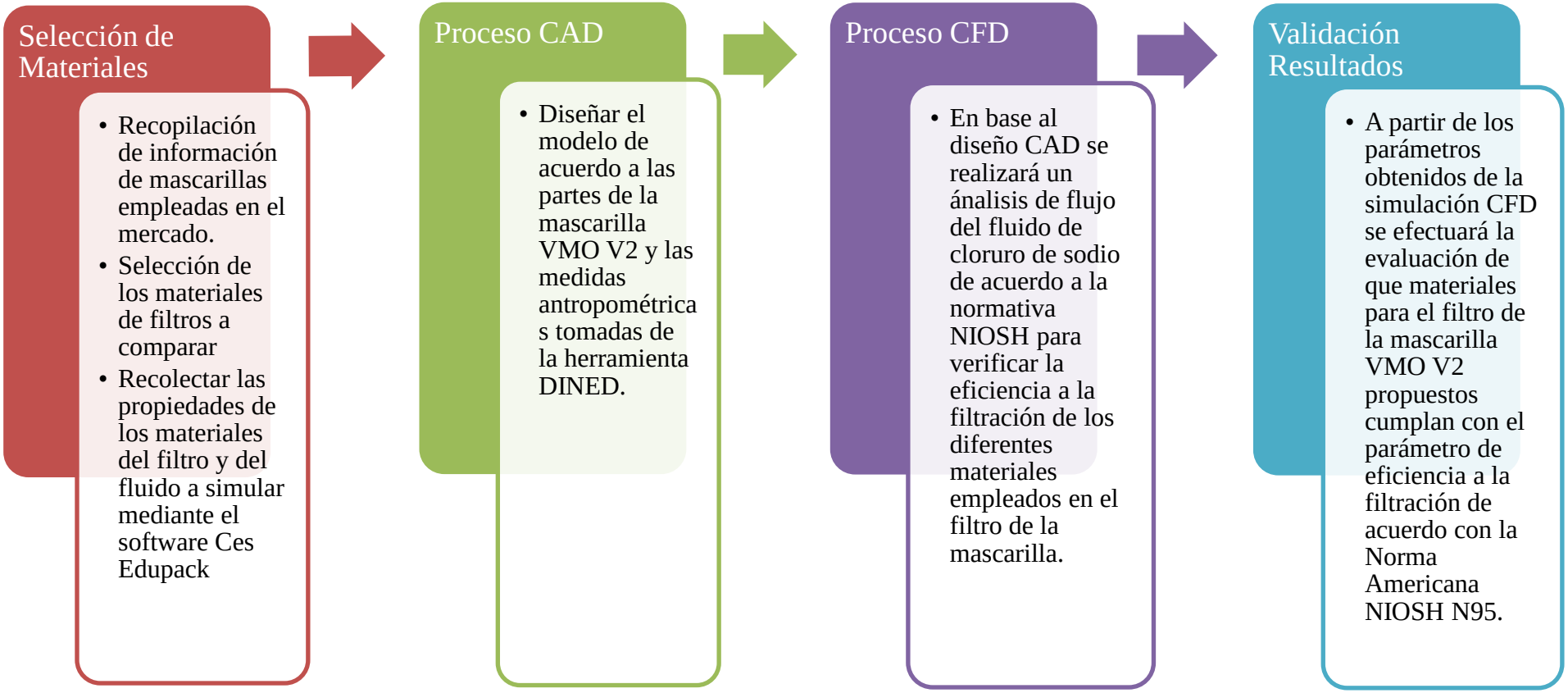

Figura 3. Diagrama de procesos del método empleado

Selección de materiales

Para el caso de la prevención del contagio del virus SARS-CoV-2, la Organización Mundial de la Salud(OMS, 2020), recomienda el uso de mascarillas con una eficiencia de filtración de al menos el 95% para partículas de 0,3 μm de diámetro. Lo que equivale a una mascarilla N95 según normativa americana NIOSH. Para esta investigación se utilizará el material polipropileno que es el empleado en el filtro de la mascarilla N95, además se analizará dos materiales que se encuentran ampliamente distribuidos en el mercado: algodón y espuma de poliuretano. Para la mascarilla se propone emplear PLA.

Ácido poli láctico (PLA) será utilizado en el filtro para la simulación, datos tomados del programa de Materiales Ces Edupack.

Tabla 1.
Propiedades del PLA

Propiedad	Valor
Densidad	1240-1270, kg/m^3
Calor especifico	1880-1920, J/kg-K
Conductividad	0.13-0.16,W/m K

Fuente: (Grantadesign, 2016)

Fibra de polipropileno (PP) será utilizado en el filtro para la simulación 1, datos tomados del programa de Materiales Ces Edupack.

Tabla 2.
Propiedades fibra polipropileno

Propiedad	Valor
Densidad	910-920, kg/m^3
Calor especifico	1880-1920, J/kg-K
Conductividad	0.12-0.17, W/m K

Fuente: (Grantadesign, 2016)

Para poner modelar el filtro se realizará como medio poroso por lo que se necesita conocer la permeabilidad del polipropileno que es 1.6e-12 (Tecnología de los Plásticos, 2011).

Fibra de algodón será utilizado en el filtro para la simulación 2, datos tomados del programa de Materiales Ces Edupack.

Tabla 3.
Propiedades fibra algodón

Propiedad	Valor
Densidad	152-256, kg/m^3
Calor especifico	1200-1220, J/kg-K
Conductividad	0.2-0.3, W/m K

Fuente: (Grantadesign, 2016)

Para poner modelar el filtro 2 se realizará como medio poroso por lo que se necesita conocer la permeabilidad de la fibra de algodón que es 1.29e-10 (Kostajnšek & Dimitrovski, 2018).

Espuma de filtro de poliuretano (PU) será utilizado en el filtro para la simulación 3, datos tomados del programa de Materiales Ces Edupack.

Tabla 4.
Propiedades espuma de filtro de poliuretano

Propiedad	Valor
Densidad	17-21, kg/m^3
Calor especifico	1720-1790, J/kg-K
Conductividad	0.03-0.035, W/m K

Fuente: (Grantadesign, 2016)

Para poner modelar el filtro se realizará como medio poroso por lo que se necesita conocer la permeabilidad de la espuma de poliuretano que es 3.2e-9 (Gunashekar et al., 2015)

Selección del fluido a simular

Cloruro de Sodio (2%), será el fluido empleado para simulación de acuerdo a la prueba NIOSH mediante la norma la norma 42 CFR Parte 84.

Tabla 5.
Propiedades NaCl (2%)

Propiedad	Valor
Densidad	1.01112 kg/m^3
Calor especifico	879.228 J/kg-K
Viscosidad	1.19, kg/m.s

Fuente: (Altair Acusolve,2019)

Parámetros para el diseño de la mascarilla

El diseño de la mascarilla se realizó a partir de los diseños de (Ottati, 2020), los archivos en 3D de la mascarilla VMO V2 fueron obtenidos de página Cults.3D, con el propósito de lograr que la mascarilla se adapte a la anatomía humana se empleó la herramienta "Mannequin" perteneciente a DINED anthropometric Database, eligiendo el grupo correspondiente al Recurso Civil Americano y Europeo de Antropometría de Superficie (CAESAR, NTL), escogiendo una población mixta que se encuentra en edades entre 18 y 66 años como se indica en la figura 4. De esta manera los datos elegidos para el diseño abarcan el 90% de la población y se encuentran entre los percentiles 5% y 95% como se indica en la Tabla 6.

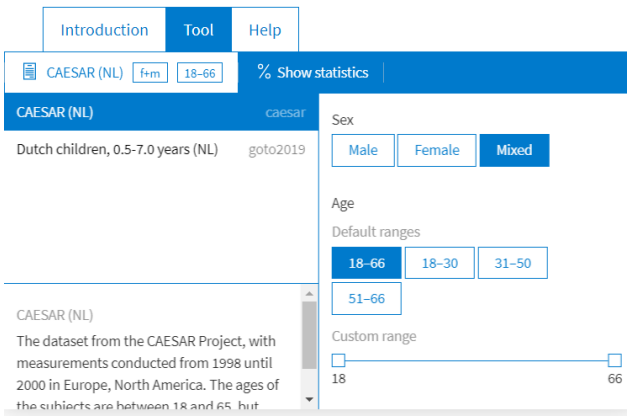

Figura 4. Selección de Grupo y Población.(DINED, 2020)

Tabla 6.
Dimensiones para el diseño

Medida antropométrica	Percentil 5, mm	Percentil 50, mm	Percentil 95, mm
Anchura de la cabeza	139	149	159
Circunferencia de la cabeza	529	562	595
Longitud del rostro	104	117	130
Longitud de la nariz	46	51	56
Ancho horizontal de la nariz	23	26	29
Longitud del puente nasal	38	43	48
Protrusión de la punta nasal	18	20	22

Nota. (DINED, 2020)

Una vez determinados las medidas antropométricas necesarias en función del diseño de la mascarilla, se crea tres modelos 3D como se muestra en la figura 5.

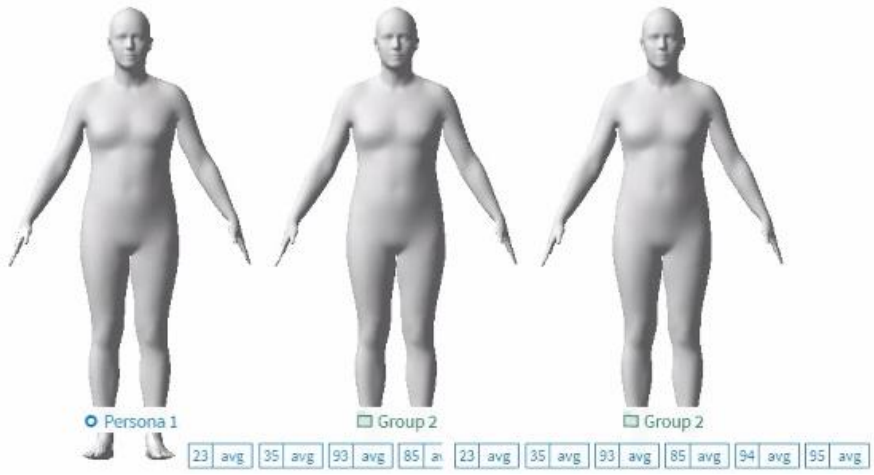

Figura 5. Modelos 3D. (DINED, 2020)

Modelo CAD

La mascarilla VMO V2 consta de cinco partes principales como se indica en la figura 6. Las mismas que fueron ensambladas en un sólido 1 y el filtro como un sólido 2 empleando el software CAD, Inventor, el modelo final se muestra en la figura 7. Además, al modelo del maniquí 3D se le realiza las modificaciones en cuanto al tracto respiratorio como se muestra en la figura 8. El ensamble final visualiza en la figura 9. Todo lo anterior se realizó para lograr una simulación adecuada en el software CAE, Hypermesh.

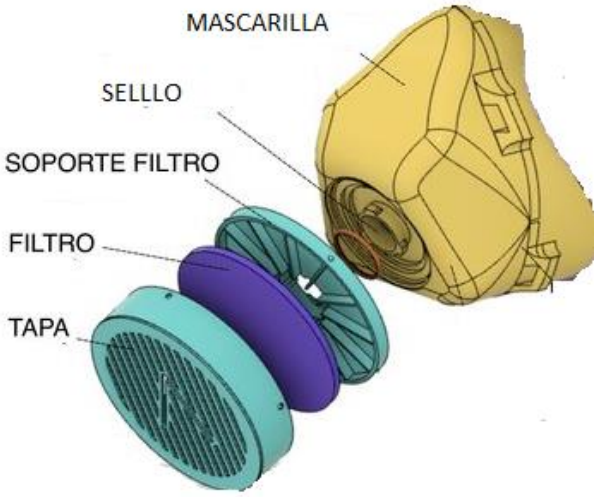

Figura 6. Partes modelo de la mascarilla VMO V2

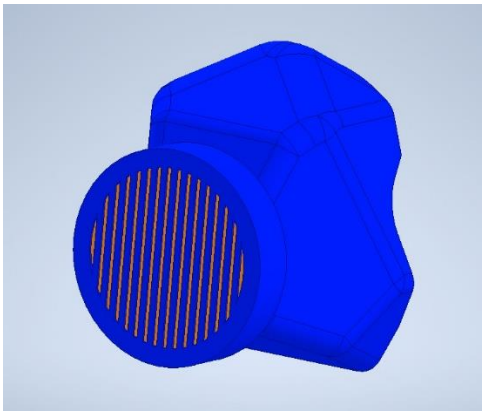

Figura 7. Mascarilla ensamblada

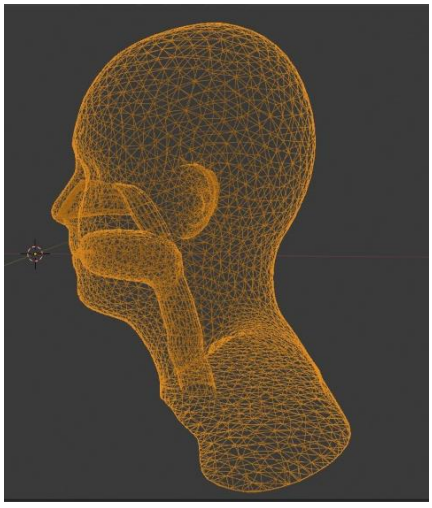

Figura 8. Maniqui con modificaciones tracto respiratorio

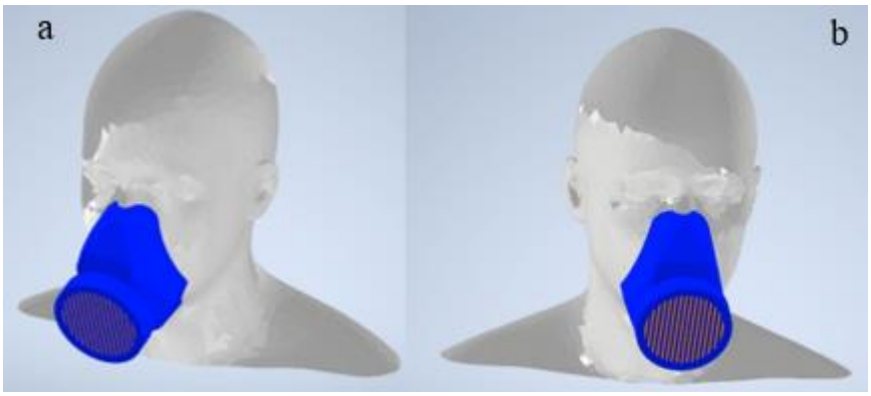

Figura 9. Modelo de mascarilla en 3D (a) vista lateral (b) vista frontal

Procedimiento de simulación

Para llevar a cabo el proceso de simulación, se establece la nomenclatura mostrada en la Tabla 7 para cada una de las simulaciones.

Tabla 7.
Nomenclatura de simulaciones

Parte	Significado
Primera parte	S: Simulación
Segunda parte	F: Filtro
Tercera parte	PP: Polipropileno A: Algodón PU: Poliuretano

a. Importar la geometría y definir el modelo

Se importa el archivo .stp del modelo CAD de la mascarilla, verificando que la importación se realice como ensamble, como se indica en la figura 10. El modelo 2 incluye tres salidas que representa los orificios de las fosas nasales y la boca. El diámetro de la abertura de las fosas nasales se puede estimar entre 10 a 12 mm (Yi & Yoon, 2016) y el diámetro de la abertura de la boca se encuentra alrededor de 34 a 52 mm (Ghod.dousi et al., 2007).

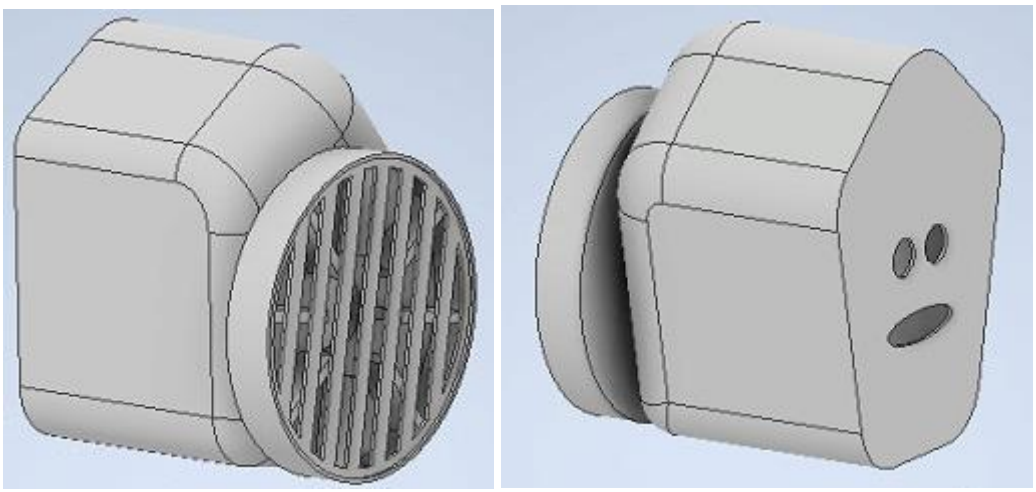

Figura 10. Modelo 2 de mascarilla en 3D

Debido a que el segundo modelo de la mascarilla completa importado por su configuración no permite realizar la selección adecuada de entradas y salidas. Se realiza un tercer modelo tomando en cuenta que el ingreso a la mascarilla es en efecto, donde se debe realizar el análisis de flujo que está entrando. Por lo que se realiza la configuración de las entradas y salidas como se muestra en la figura 11.

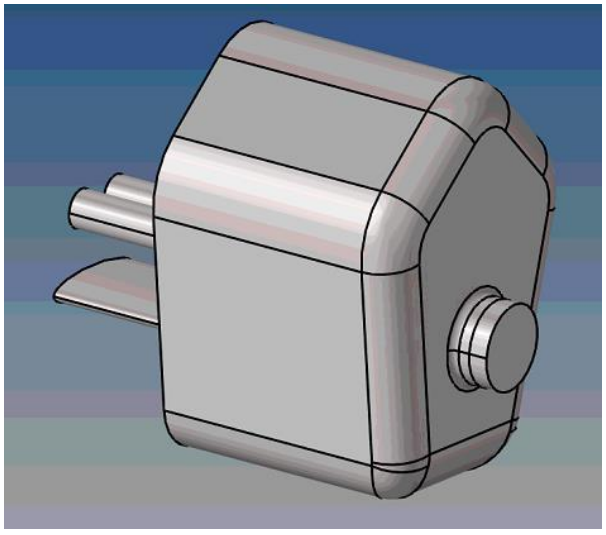

Figura 11. Modelo 3 de mascarilla en 3D

b. Generar el mallado 2D

Realizar el mallado 2D con la opción “Automesh”. En esta etapa se define el tamaño y la forma de la malla. Debido a que la teoría de fluidos indica que únicamente los gases pueden ser considerados como fluidos compresibles, porque su densidad varia de manera significativa en función de la presión, el resto de fluidos deben ser considerados como fluidos incompresibles (Rieutord, 2015); ya que en este trabajo se utiliza como fluido de estudio una solución de cloruro de sodio, que es un fluido incompresible la malla seleccionada en el proceso de simulación fue de tamaño 2 y de forma triangular, que es la geometría recomendada para fluidos incompresibles (Altair, 2019). Con esta configuración se obtienen 20284 elementos en el mallado 2D, figura 12.

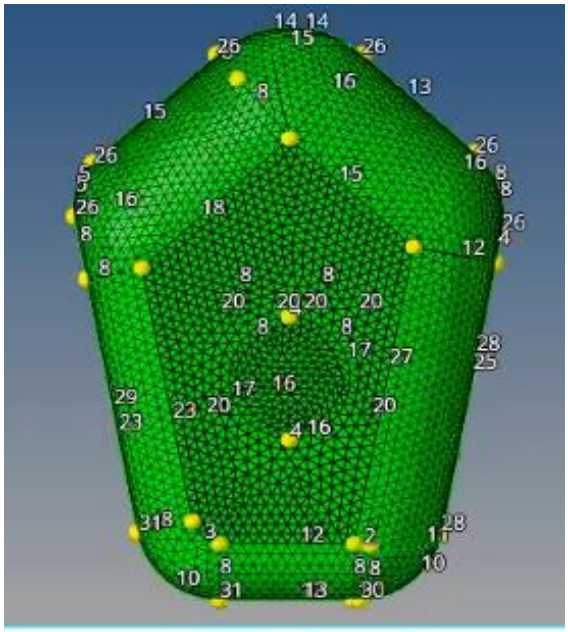

Figura 12. Mallado 2D “Automesh”

c. Verificar el mallado 2D

Se debe verificar que el mallado 2D se haya realizado adecuadamente, empleando la herramienta “Mask” como se muestra en la figura 13.

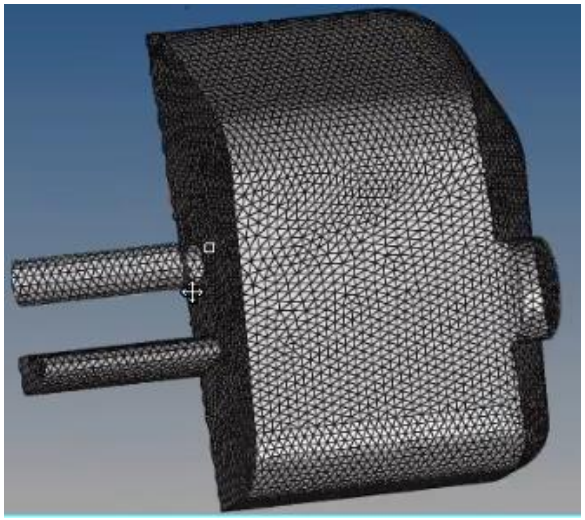

Figura 13. Verificación mallado 2D “Mask”

d. Verificar la calidad del mallado 2D

Una vez creada la malla 2D sobre los elementos, el software permite cuantificar su calidad como se indica en la figura 14 se puede observar la cantidad de elementos fallidos y su porcentaje que para nuestro modelo fue del 0.3%.

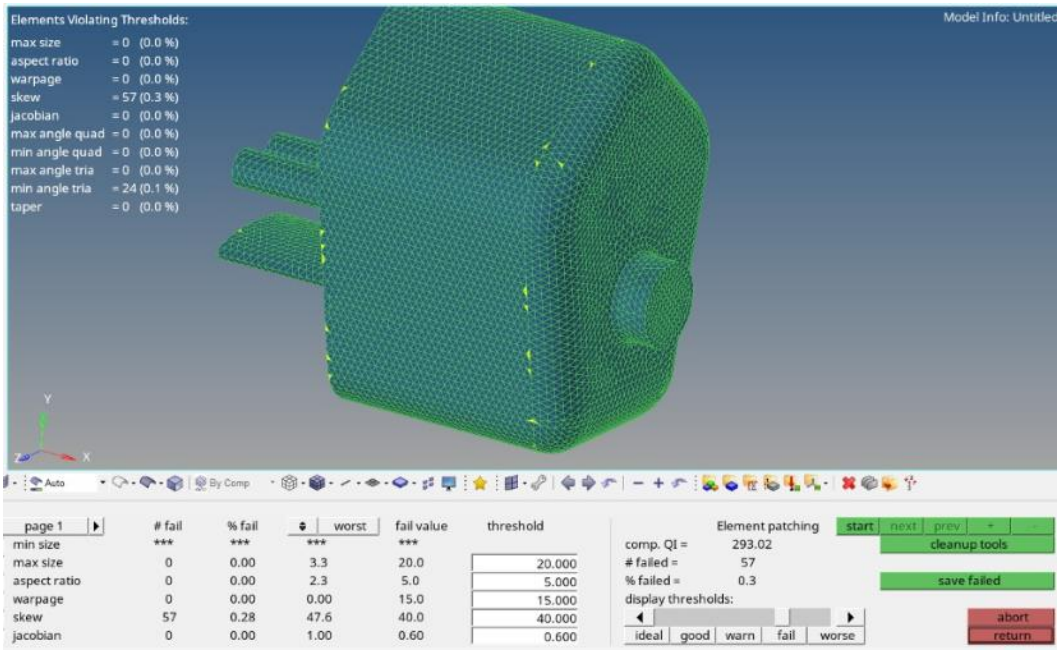

Figura 14. Análisis de la calidad del mallado 2D

Con el uso de la herramienta smooth se corriguió los errores en estos elementos y de esta manera mejorar la calidad de la malla y los resultados posteriores, en la figura 15 se puede observar como la cantidad de elementos fallidos se ha reducido y finalmente se obtiene un porcentaje del 0%.

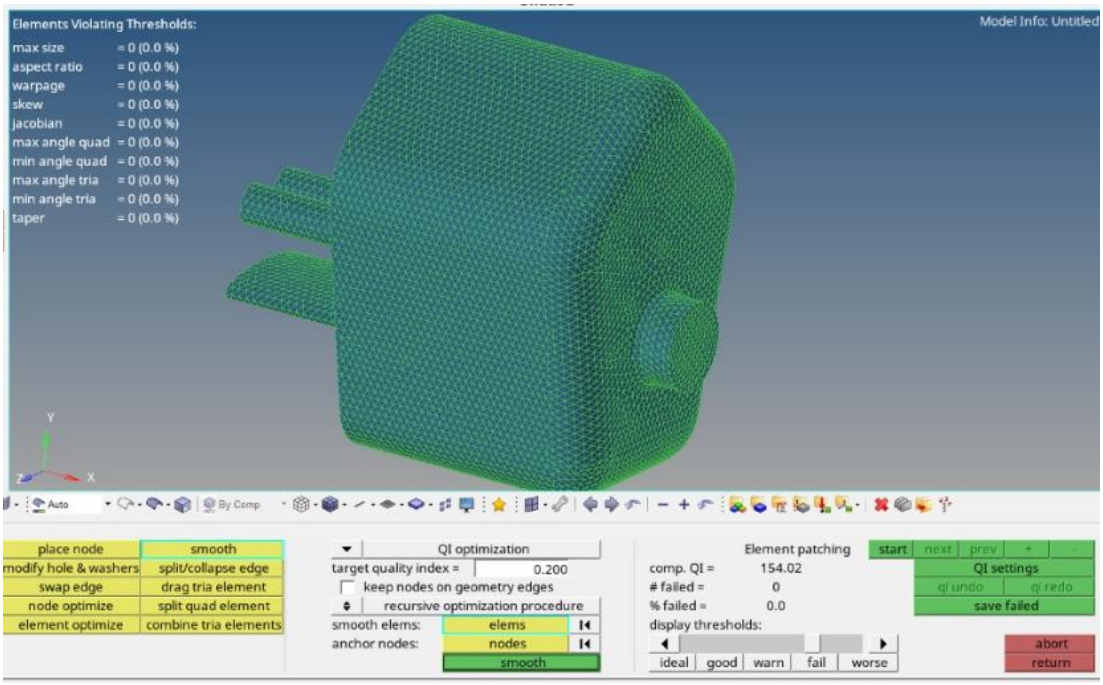

Figura 15. Análisis de la calidad del mallado 2D empleando la herramienta smooth

e. Creación de componentes

Crear los componentes CFD para las entradas y salidas del flujo. Para nuestro modelo de estudio de la mascarilla, se crean cuatro componentes correspondientes a una entrada y tres salidas, como se muestra en la figura 16.

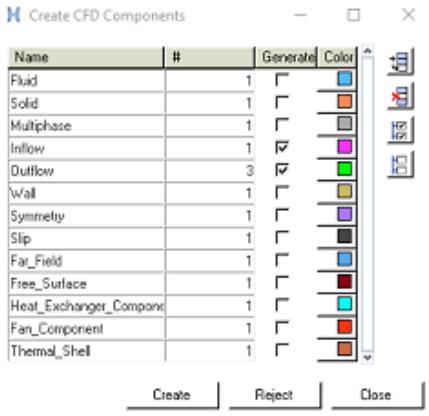

Figura 16. Creación de componentes

f. Asignación de componentes

Asignar los componentes creados a cada una de las superficies de entrada y las salidas definidas, mediante la herramienta “Organize”, como se muestra en las figuras 17 y 18.

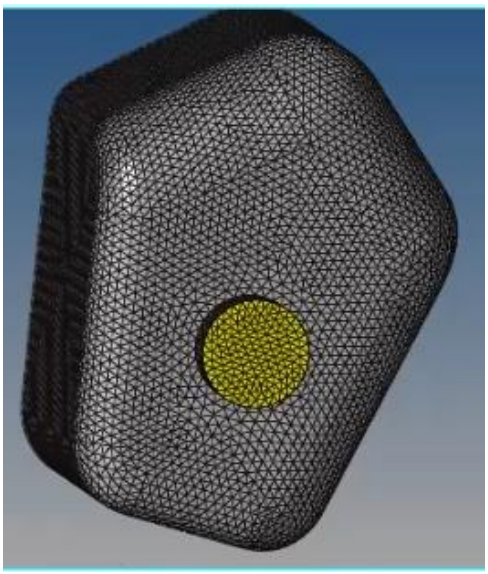

Figura 17. Configuración entrada

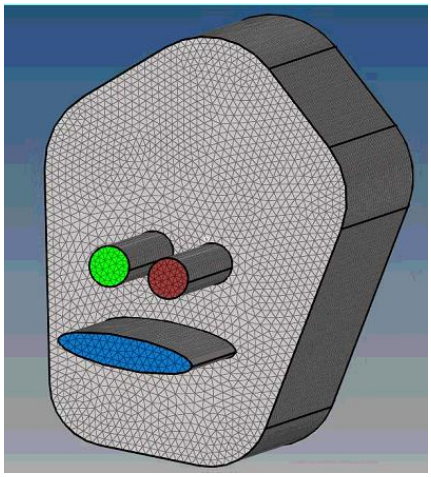

Figura 18. Configuración de las salidas mediante colores, Verde: Fosa Nasal 1; Marrón: Fosa Nasal 2; Azul: Boca.

g. Mallado 3D

Crear el mallado 3D utilizando la herramienta “CFDtetramesh”, en este paso se definen los componentes fijos, los componentes flotantes, así como las propiedades geométricas de la capa límite. Durante el proceso de mallado 3D se debe determinar la tasa de crecimiento y número de capas. En este caso se seleccionó 1.5 y 5 respectivamente. También es importante verificar el proceso en la esquina inferior izquierda, para verificar que no existan errores en el proceso de mallado. En esta investigación se obtuvieron 98718 elementos en el mallado 3D. Al concluir esta operación se generan cuatro nuevos componentes.

h. Verificar el mallado 3D

Empleando la herramienta “Mask” se verifica la calidad del mallado 3D, tomar en cuenta que se haya generado la capa límite como se visualiza en las figuras 19 y 20.

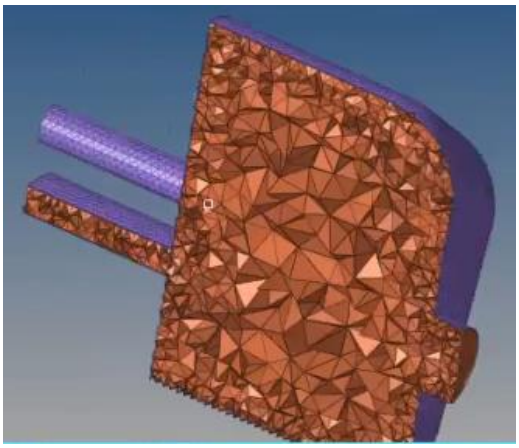

Figura 19. Verificación mallado 3D "Mask"

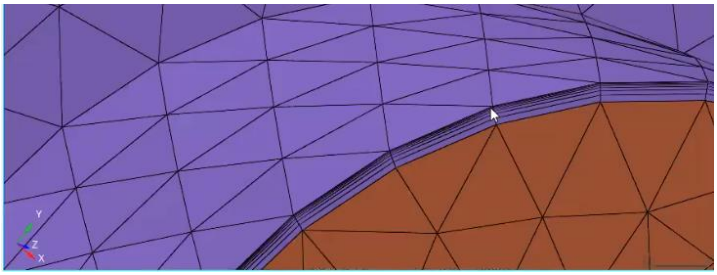

Figura 20. Verificación creación capa límite

i. Propiedades del fluido a la capa límite

Asignar las propiedades del fluido a la capa límite, mediante la herramienta "Organize". Una vez realizada esta operación se elimina el componente correspondiente a la capa límite tanto del filtro como del fluido, como se muestra en la figura 21.

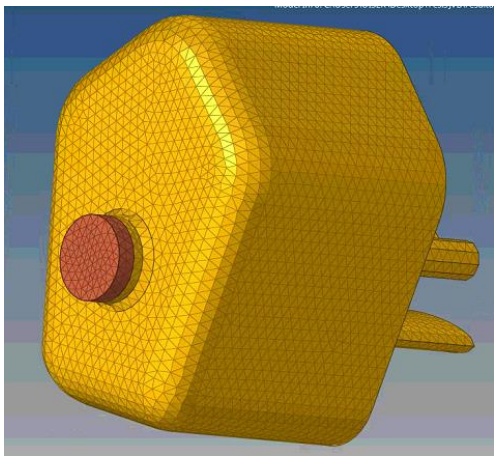

Figura 21. Asignación de propiedades del fluido y filtro a la capa límite

j. Renombrar los componentes

Se asigna los nombres a cada componente para poder reconocerlos de manera más adecuada, los cambios se muestran en la figura 22.

Figura 22. Renombrar los componentes

k. Creación de materiales

Crear los materiales de acuerdo a las Tablas 2,3,4 y 5; para los diferentes tipos de filtros, se tomará como valor variable la permeabilidad de cada material.

l. Configuración de condiciones de simulación

Configurar la descripción general del problema, los parámetros de resolución, y, las condiciones iniciales de borde.

m. Configuración de las características de entradas y salidas.

Se configura la entrada con la velocidad obtenida mediante la Ec.5.

$$Q = VA \qquad \text{Ec. 5}$$

Donde:
Q: caudal, m^3/h
V: velocidad, m/s
A: Área de la entrada, m^2

De acuerdo a la norma NIOSH 42 CFR Parte 84 el rango de velocidad de flujo es de 85 L/min y el diámetro de la entrada a la mascarilla es de 22 mm.

Por lo tanto, se empleará una velocidad de simulación promedio de **3.6 m/s**

Resultados

Curvas de convergencia

En las Figuras: 23, 24 y 25 se muestran las curvas de convergencia correspondientes a las simulaciones realizadas para los tres materiales estudiados en esta investigación, donde se observa el comportamiento entre los residuales y el número de etapas. Se analiza en las figuras la variable velocidad del fluido, que es la curva de color naranja, donde se visualiza que a medida que avanza la simulación los residuos caen y por lo tanto las ecuaciones alcanzan un valor estabilizado, demostrando que el número y tipo de malla empleado para la simulación fue el adecuado, que comprueba que se realizó una simulación eficaz.

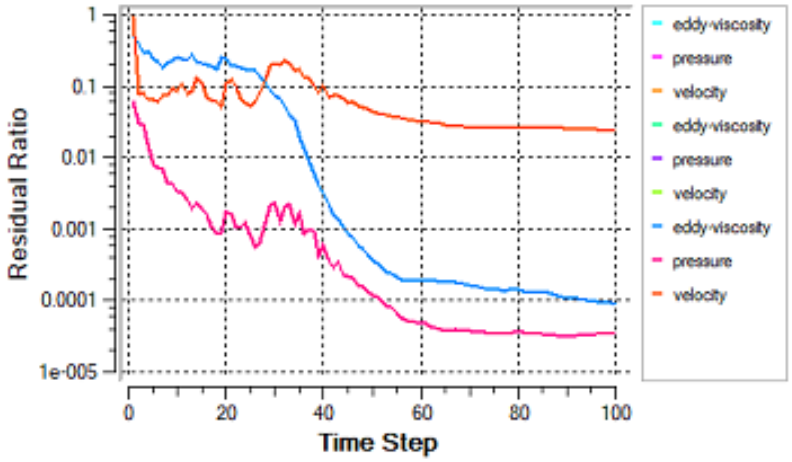

Figura 23. Convergencia SFPP

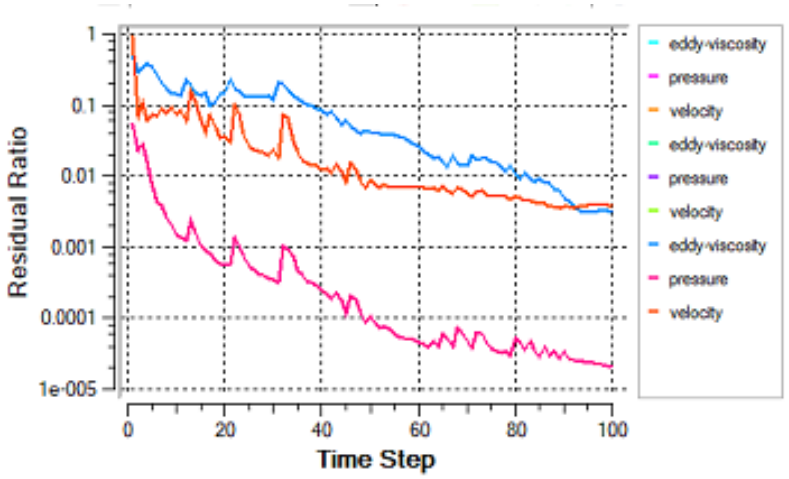

Figura 24. Convergencia SFA

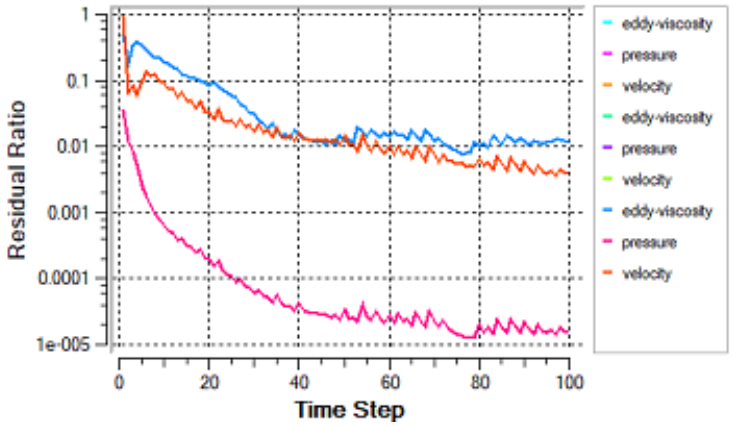

Figura 25. Convergencia SFPU

Resultados de Velocidad

En las figuras presentadas a continuación se identifican los resultados correspondientes a la velocidad del fluido que atraviesa el filtro tomando como parámetros variables las propiedades de cada material de los diferentes filtros. Los resultados obtenidos son tomados del módulo “Hyperview” del software “Hyperworks” de Altair, la barra de colores representa la variación de la velocidad del fluido que depende de la permeabilidad del material empleado en el filtro para la simulación.

Resultados velocidad de la simulación para el filtro de fibra de polipropileno

La figura 26 muestra la distribución de la velocidad para la simulación de la mascarilla con filtro de fibra de polipropileno con permeabilidad 1.6e-12.

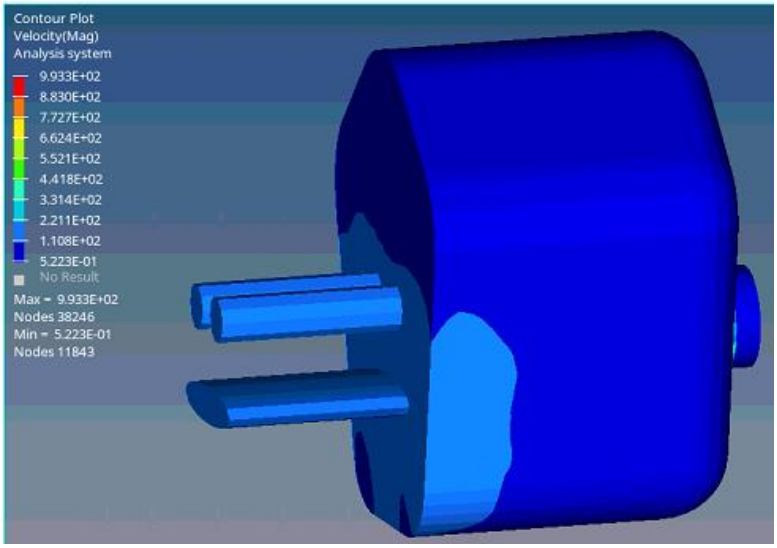

Figura 26. Velocidad SFPP

En la figura 27 se realiza un corte en el plano Z de la mascarilla para visualizar la distribución de la velocidad del fluido al atravesar el filtro de fibra de polipropileno.

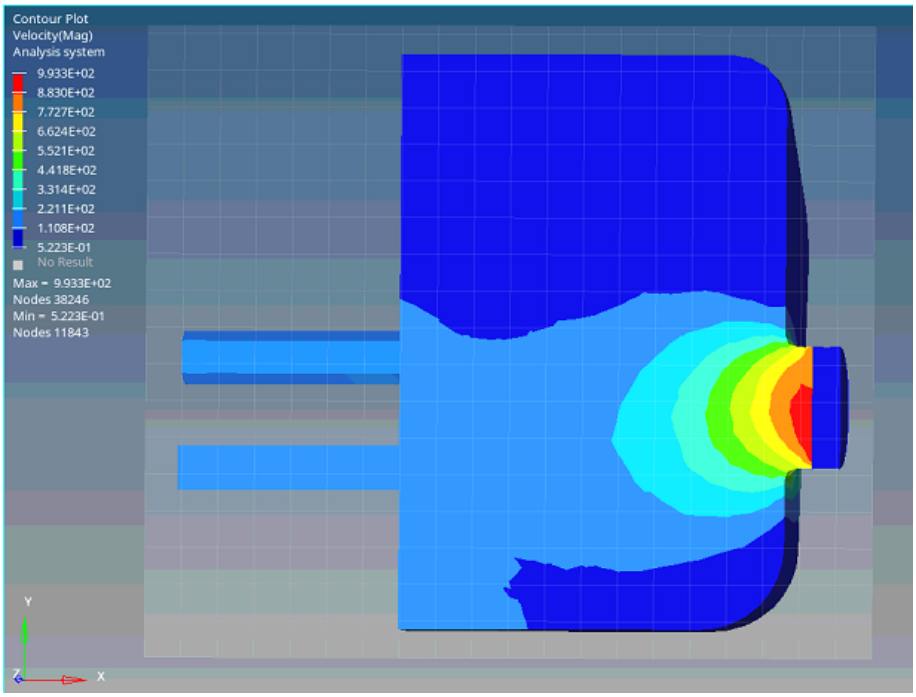

Figura 27. Velocidad SFPP, corte en el plano Z

En la figura 28 se observa la distribución de las líneas de flujo del fluido que atraviesa el filtro de fibra de polipropileno.

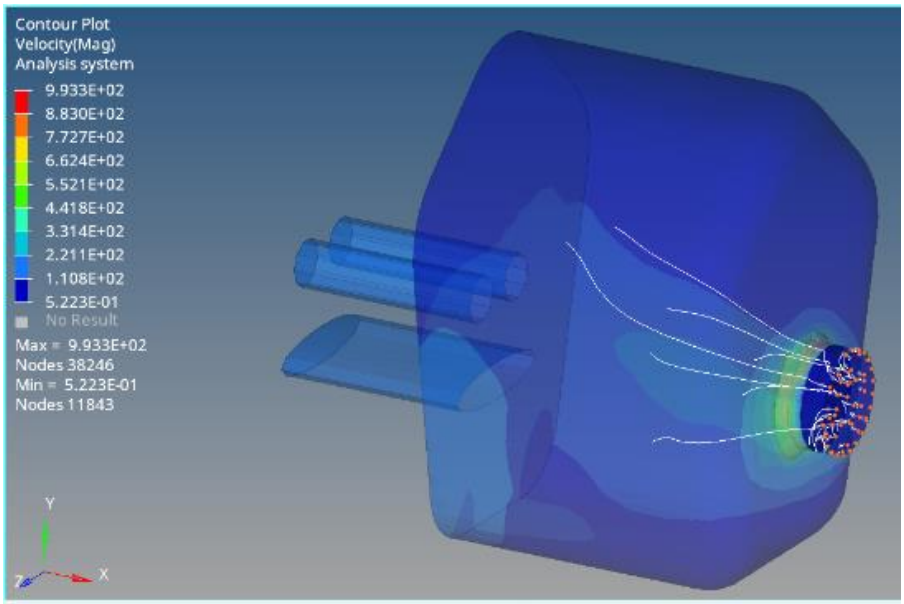

Figura 28. Líneas de flujo SFPP

Resultados velocidad de la simulación para el filtro de fibra de algodón

La figura 29 muestra la distribución de la velocidad para la simulación de la mascarilla con filtro de fibra de algodón con permeabilidad 1.29e-10.

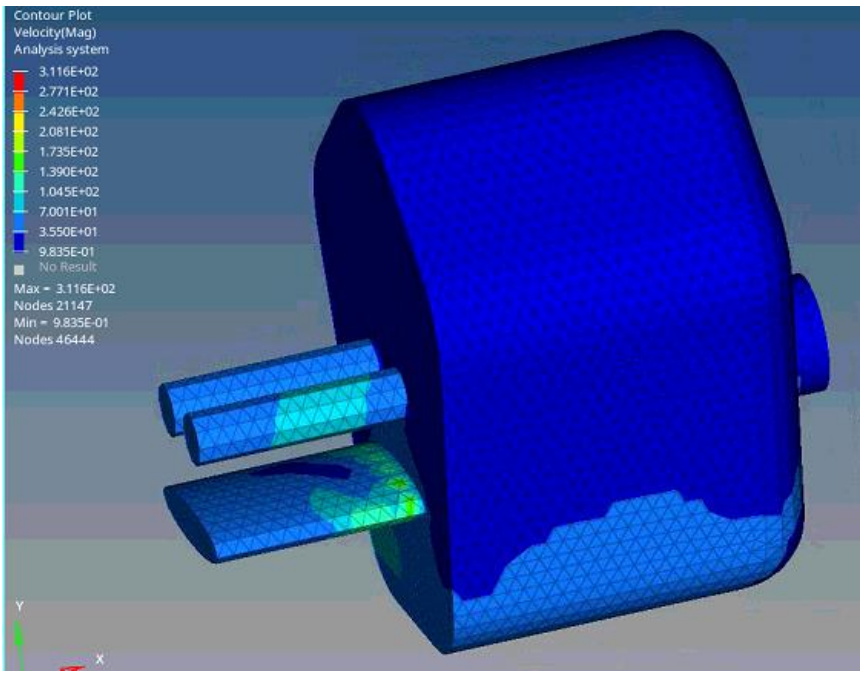

Figura 29. Velocidad SFA

En la figura 30 se realiza un corte en el plano Z de la mascarilla para visualizar la distribución de la velocidad del fluido al atravesar el filtro de fibra de algodón.

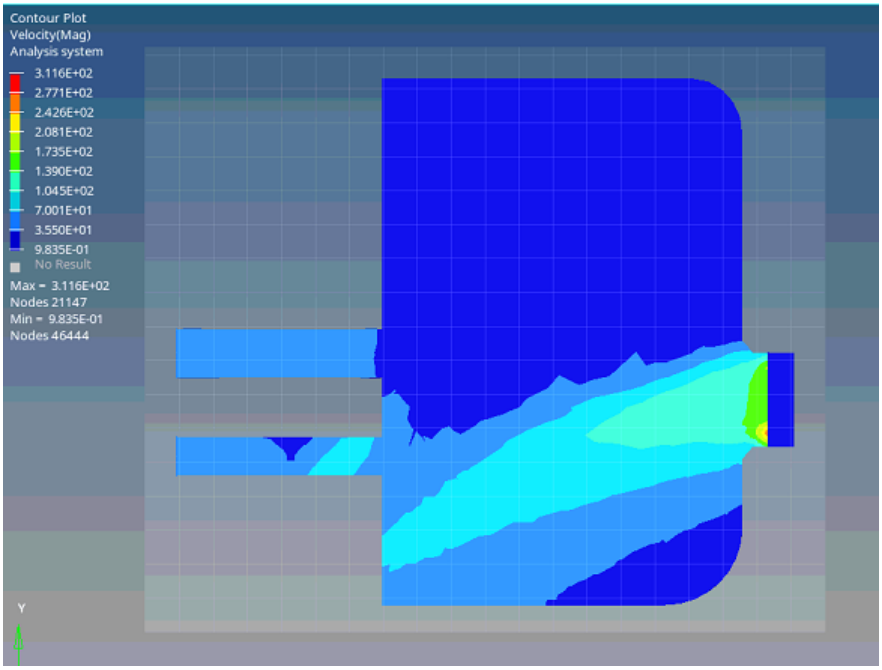

Figura 30. Velocidad SFA, corte en el plano Z

En la figura 31 se observa la distribución de las líneas de flujo del fluido que atraviesa el filtro de algodón.

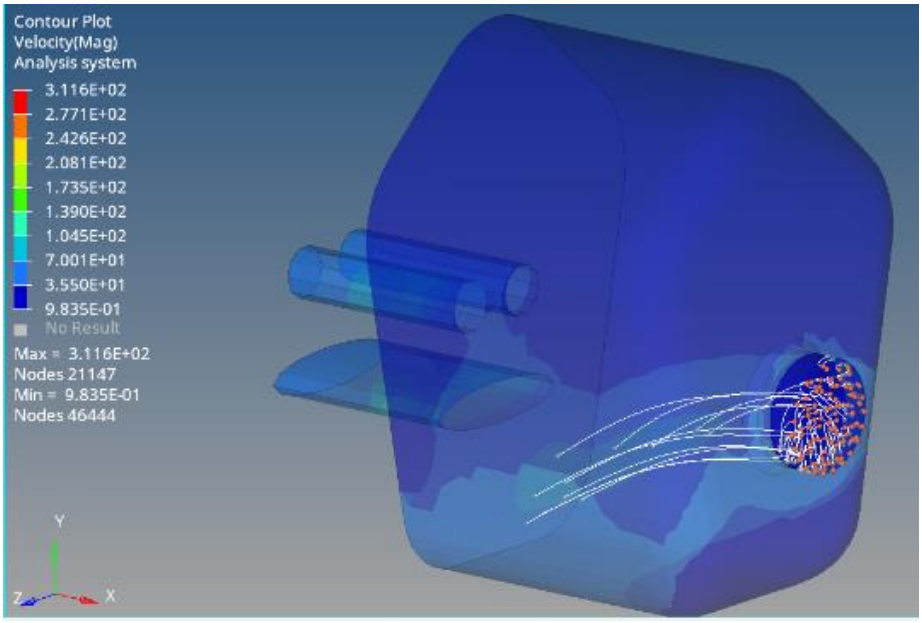

Figura 31. Líneas de flujo SFA

Resultados velocidad de la simulación para el filtro de espuma de poliuretano

La figura 32 muestra la distribución de la velocidad para la simulación de la mascarilla con filtro de fibra de espuma de poliuretano con permeabilidad 3.2e-9.

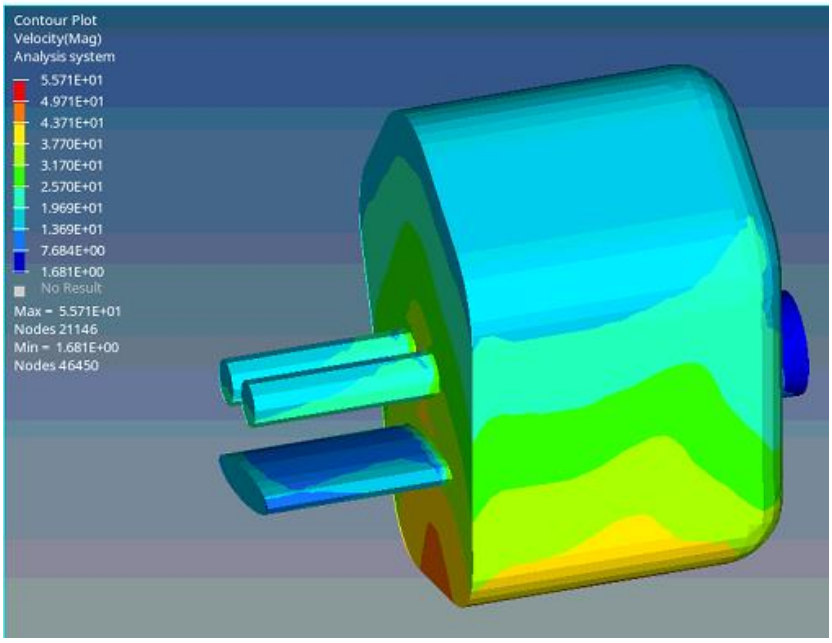

Figura 32. Velocidad SFPU

En la figura 33 se realiza un corte en el plano Z de la mascarilla para visualizar la distribución de la velocidad del fluido al atravesar el filtro de fibra de espuma de poliuretano.

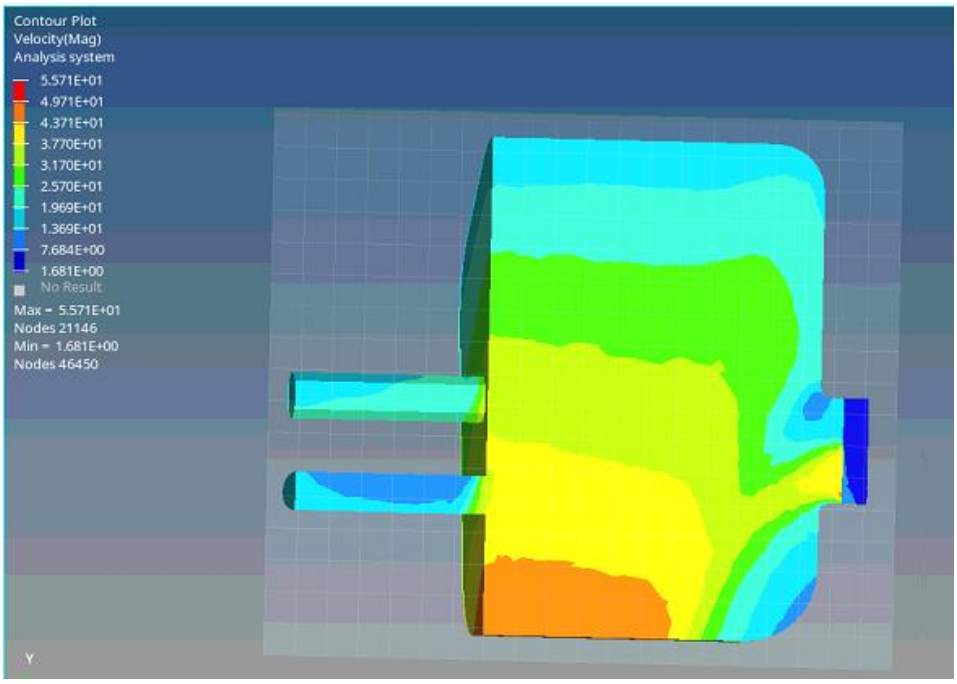

Figura 33. Velocidad SFPU, corte en el plano Z

En la figura 34 se observa la distribución de las líneas de flujo del fluido que atraviesa el filtro de espuma de poliuretano.

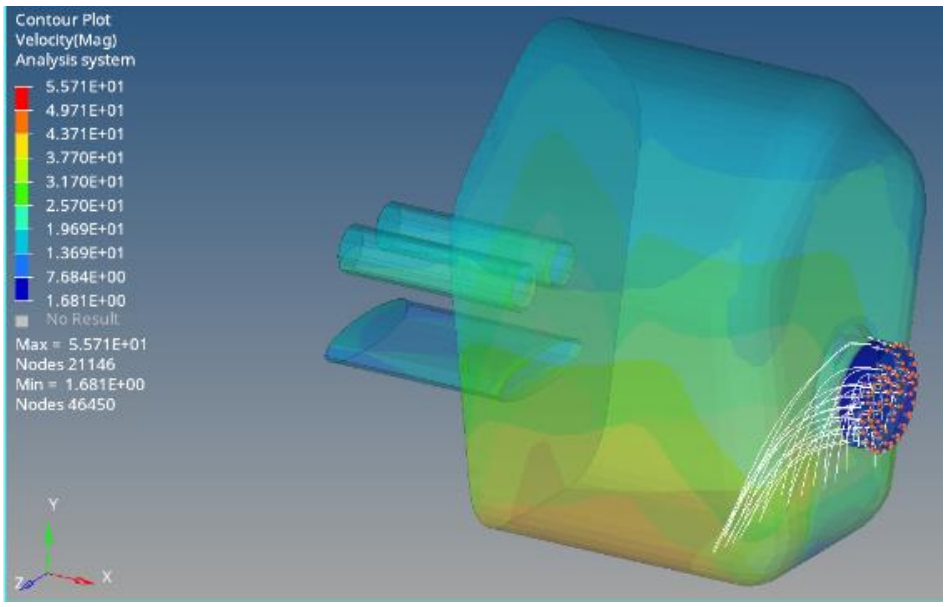

Figura 34. Líneas de flujo SFPU

Discusión de resultados

En el proceso de diseño de los modelos CAD se realizó un modelo diferente al inicial planteado por la mascarilla VMO V2 debido a que se evidenció que para esta geometría no era necesario evaluar la parte externa del cartucho, ya que el fluido comienza a tener contacto con la persona desde la entrada del cuerpo de la mascarilla, además se cerró la parte posterior de la mascarilla tomando en cuenta las dimensiones de las fosas nasales y la boca para visualizar mejor el proceso de simulación esperado en esta investigación.

En la generación del mallado 2D para lograr que la malla se acople adecuadamente al diseño de la mascarilla se probó con cuatro tamaños diferentes (10, 5, 3 y 2), se empleó finalmente un tamaño de malla de 2 para de esta manera evitar la alteración de la malla con respecto a la geometría original y lograr un refinamiento que permita obtener resultados más reales.

Al comparar las curvas de convergencia obtenidas se puede visualizar que para el caso de los materiales polipropileno y espuma de poliuretano al incrementar el número de pasos la curva de convergencia mejora, logrando alcanzar la linealidad. Lo que no se refleja en el material de algodón, donde a pesar de realizar una segunda simulación con 200 pasos no se alcanza una linealidad completa. Se tomó en cuenta para el cálculo de la eficiencia de los tres materiales los resultados obtenidos con la primera simulación de 100 pasos que fueron los esperados, es por lo mencionado que para el caso del filtro de algodón se considera una solución estable, a pesar de no alcanzar una convergencia esperada.

La validación del método empleado se lleva a cabo a través del cálculo de la eficiencia del material del filtro empleado, por lo que se utiliza los valores de las velocidades obtenidas en las simulaciones. Los resultados se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8.

Velocidades obtenidas en la simulación y eficiencia a la filtración

Filtro	Ve, m/s	Vs,m/s	EF, %
Polipropileno	993.3	221	78
Algodón	311.6	104	67
Poliuretano	55.71	25.7	54

Ve: velocidad entrada; Vs: velocidad salida; EF: Eficiencia de filtración

La curva de regresión simple relacionando la permeabilidad del material en función de la eficiencia a la filtración, muestra que la eficiencia se incrementa a medida que la permeabilidad del material disminuye estos resultados se muestran en la tabla 9 y figura 35.

Para ajustar los resultados obtenidos se utiliza el modelo log-X para describir la relación entre eficiencia de Filtración y permeabilidad, obteniendo un con una R^2= 98,1248 y una ecuación del modelo ajustado:

Eficiencia de Filtración, % = -5,9136 - 3,11892*ln(Permeabilidad) Ec.6

Tabla 9.

Comparación permeabilidad y eficiencia a la filtración

Filtro	Permeabilidad	EF, %
Polipropileno	1.6e-12	78
Algodón	1.29e-10	67
Poliuretano	3.2 e-9	54

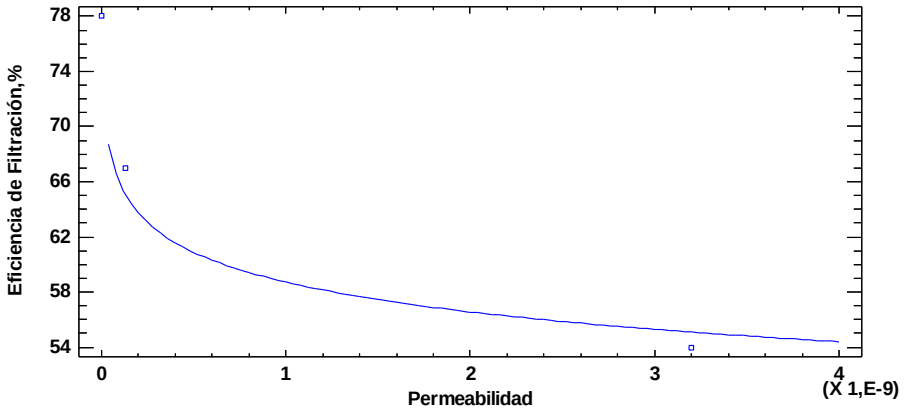

Figura 35. Grafico del modelo ajustado de EF vs Permeabilidad

Las diferentes eficiencias a la filtración calculadas con los resultados obtenidos a partir de la simulación CFD fueron: 78% para el polipropileno, 67 % para el algodón y 54% para la espuma de poliuretano. Que varían significativamente dependiendo de la permeabilidad del material empleado en filtro, cabe resaltar que no se pudo obtener la comparación del 95% ya que dentro de la simulación no se tomó en cuenta la estructura del tejido de la tela; debido a que la construcción de hilos tejidos de los poros de la tela tiene una influencia significativa en el patrón de flujo como menciona (Tung et al., 2002).

La ecuación presentada en este estudio fue obtenida a partir de los resultados encontrados luego del proceso de simulación, donde mediante el análisis estadístico se encontró un R-cuadrado= 98,1248% lo que demuestra que la regresión lineal realizada es aceptable; además que el valor del coeficiente de correlación encontrado (-0,99058) indica que existe una relación relativamente fuerte entre las variables eficiencia a la filtración y permeabilidad.

Conclusiones

- Es importante contar con las medidas antropométricas de una población para realizar el diseño de un producto, ya que de esta manera la simulación se acerca más a la realidad del proceso.
- Se comprobó que la calidad de la malla generada es imprescindible para lograr que una solución converja y los valores obtenidos sean aceptables; lo que demuestra que el tamaño de malla de 2 y la geometría triangular escogidos fueron los adecuados ya que se logró obtener los resultados esperados en esta investigación al evidenciar que existe mejor filtración de un fluido dependiendo del material con el que se encuentre fabricado el filtro de la mascarilla.
- Se logró modelar el flujo del fluido de cloruro de sodio de acuerdo a la normativa NIOSH mediante el empleo del software Hypermesh de Altair, el cual permitió realizar una simulación con buenos resultados verificando la eficiencia a la filtración de un filtro de mascarilla con diferentes materiales. Las eficiencias a la filtración obtenidas a partir de los resultados de la simulación CFD fueron: 78% para el polipropileno, 67 % para el algodón y 54% para la espuma de poliuretano.
- La permeabilidad es una variable fundamental a tomarse en cuenta en la simulación de medios porosos; como se comprueba en los resultados de este estudio; ya que la eficiencia a la filtración del filtro de la mascarilla se incrementa a medida que la permeabilidad del material disminuye como se muestra en la Tabla 9.
- Mediante la presente investigación se logró comparar la eficiencia a la filtración de acuerdo al tipo de material utilizado en un filtro de la mascarilla, determinando que la mejor opción para combatir el contagio del coronavirus SAR-CoV-2 es el material

polipropileno debido a que presenta un porcentaje filtración del 78%, siendo el mayor en relación a los otros materiales.

- La ecuación N°6 (Eficiencia de Filtración, %= -5,9136 - 3,11892*ln(Permeabilidad)) es una primera herramienta que se podría emplear de manera rápida en la comprobación de la eficiencia a la filtración; ya que al conocer la permeabilidad se puede obtener inmediatamente un porcentaje aproximado de la eficiencia que tendría un filtro de mascarilla.

Recomendaciones

- Se recomienda una vez superadas las limitaciones actuales de la pandemia, desarrollar trabajos experimentales con los tres materiales del filtro, que permitan comparar los resultados obtenidos mediante la simulación CFD realizada en el presente trabajo de investigación.
- Se plantea realizar las simulaciones con un diseño del filtro que tome en cuenta la construcción de hilos tejidos de los poros de la tela para lograr acercarse a la realidad del proceso a simular.
- Se recomienda cambiar las propiedades del fluido a las propiedades del estornudo humano para visualizar mejor lo que está ocurriendo en la realidad con la enfermedad del coronavirus.
- Se plantea realizar simulaciones con otros softwares para comparar resultados.

Referencias Bibliográficas

3M. (2018). *Disposable Respirator N95*.

Altair. (2019). *Altair AcuSolve Training Manual*. http://wpc.23a7.iotacdn.net/8023A7/origin2/secure/downloads/hw2019/documentation/AcuSolve_2019_Training_Manual.pdf?8eeea393ef108aed610d98fd45dc22e8d47a3e8a59ba5c83a4bd52df57f3cd0c8003efe03dff4be33b3633114a5b232666967a9c3abc10d11df2336af08612a92acb212a0a49

Asociación Española de Normalización. (2009). *Medias máscaras filtrantes de protección cont tra partículas Requisitos, ensayos, marcado* (Patent No. UNE-EN 149:2001+A1).

Asociación Española de Normalización. (2019). *Mascarillas quirúrgicas Requisitos y métodos de ensayo* (Patent No. UNE-EN 14683:2019+AC).

Aydın, A., Engin, T., Yasar, H., Yeter, A., & Perut, A. H. (2020). Computational Fluid Dynamics Analysis of a Vehicle Radiator Using Porous Media Approach. *Heat Transfer Engineering*, 1–13. https://doi.org/10.1080/01457632.2020.1756069

Balazy, A., Toivola, M., Reponen, T., Podgorski, A., Zimmer, A., & Grinshpun, S. (2006). Manikin-Based Performance Evaluation of N95 Filtering-Facepiece Respirators Challenged with Nanoparticles. *Annals of Occupational Hygiene, 50*, 259–269.

Bourouiba, L. (2020). Turbulent Gas Clouds and Respiratory Pathogen Emissions: Potential Implications for Reducing Transmission of COVID-19. *Journal of the American Medical Association, 323*(18), E1–E2. https://doi.org/10.1001/jama.2020.4756

Brosseau, Conroy, L., Sietsema, M., Cline, K., & Durski, K. (2015). Evaluation of Minnesota and Illinois hospital respiratory protection programs and health care worker respirator use.

Journal of Occupational and Environmental Hygiene, *12*(1), 1–15.

Brosseau, L., & Shaffe, R. (2014). *Do We Need to Challenge Respirator Filters With Biological Aerosols?* https://blogs.cdc.gov/niosh-science-blog/2014/04/02/respirator-filter-testing/

Brown, R. C., Wake, D., Gray, R., Blackford, D. ., & Bostock, G. J. (1990). Effect of Industrial Aerosols on the Performance of Electrically Charged Filter Material. *American Industrial Hygiene Association Journal*, *51*, 420–426.

Cascella, M., Rajnik, M., Cuomo, A., Dulebohn, S., & Di Napoli, R. (2020). Features, evaluation and treatment coronavirus (COVID-19). *StatPearls Publishing*.

Chen, L., Pannala, S., Broekhuis, R., Gautam, P., Gu, T., West, D., & Balakotaiah, V. (2020). Three-dimensional CFD simulation of pattern formation in a shallow packed-bed reactor for oxidative coupling of methane. *Chemical Engineering Journal*, *400*, 125979. https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125979

Dassault Systèmes. (2020). *Software de simulación para mejorar el diseño de EPIs frente al Covid-19*. http://www.automaticaeinstrumentacion.com/es/notices/2020/04/software-de-simulacion-para-mejorar-el-diseno-de-epis-frente-al-covid-19-46407.php#.XsS7AGhKjIV

DINED. (2020). *Mannequin*. https://dined.nl/en/mannequin/tool

Eninger, R. ., Honda, T., Adhikari, A., Heinonen-Tanski, H., Reponen, T., & Grinshpun, S. (2008). Filter Performance of N99 and N95 Facepiece Respirators against Viruses and Ultrafine Particles. *Annals of Occupational Hygiene*, *52*, 385–396.

Fisher, E. M., Richardson, A. W., Harpest, S. D., Hofacre, K. C., & Shaffer, R. E. (2012).

Reaerosolization of MS2 bacteriophage from an N95 filtering facepiece respirator by simulated coughing. *Annals of Occupational Hygiene*, *56*(3), 315–325. https://doi.org/10.1093/annhyg/mer101

Fjeld, R., & Owens, T. (1998). The Effect of Particle Charge on Penetration in an Electret Filter. *IEEE Transactions on Industry Application*, *24*, 725–731.

Ghod.dousi, H., Edler, R., Haers, P., Wertheim, D., & Greenhill, D. (2007). Comparison of three methods of facial measurement. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, *36*(3), 250–258. https://doi.org/10.1016/j.ijom.2006.10.001

Gunashekar, S., Pillai, K. M., Church, B. C., & Abu-Zahra, N. H. (2015). Liquid flow in polyurethane foams for filtration applications: a study on their characterization and permeability estimation. *Journal of Porous Materials*, *22*(3), 749–759. https://doi.org/10.1007/s10934-015-9948-2

Harnish, D., Heimbuch, B., Husband, M., Lumley, A., Kinney, K., Shaffer, R., & Wander, J. (2013). Challenge of N95 filtering facepiece respirators with viable H1N1 influenza aerosols. *Nfect. Control Hosp. Epidemiol*, *34*(5), 494–499. https://doi.org/doi: 10.1086 / 670225

Hermosa, M. (2020). *Uso de mascarillas de protección frente a coronavirus*. http://www.farmaceuticosdesevilla.es/blog/uso-de-mascarillas-de-proteccion-frente-a-coronavirus_aa1699.html

Hinds, W. (2012). *Tecnología de aerosoles: propiedades, comportamiento y medición de partículas en el aire*. John Wiley & Sons.

IDAEA. (2020). *Emisión y exposición a SARS-CoV-2 y opciones de filtración*.

https://www.csic.es/sites/default/files/informe_caracteristicas_sars-cov-2_y_opciones_filtracion_idaea-csic_15_abril.pdf

Janssen, L. L., Bidwell, J. O., Mullins, H. E., & Nelson, T. J. (2003). Efficiency of Degraded Electret Filters : Part I – Laboratory Testing Against NaCl and DOP before and after Exposure to Workplace Aerosols. *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, *20*, 71–80.

Johnson, G. R., Morawska, L., Ristovski, Z. D., Hargreaves, M., Mengersen, K., Chao, C. Y. H., Wan, M. P., Li, Y., Xie, X., Katoshevski, D., & Corbett, S. (2011). Modality of human expired aerosol size distributions. *Journal of Aerosol Science*, *42*(12), 839–851. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2011.07.009

Jung, H., Kim, J., Lee, S., Lee, J., Kim, J., Tsai, P., & Yoon, C. (2014). Comparison of filtration efficiency and pressure drop in anti-yellow sandmasks, quarantine masks, medical masks, general masks, and handkerchiefs. *Aerosol and Air Quality Research*, *14*(3), 991–1002. https://doi.org/10.4209/aaqr.2013.06.0201

Kostajnšek, K., & Dimitrovski, K. (2018). Multilayer cotton fabric porosity and its influence on permeability properties. *TEKSTILEC*, *61*(4), 254–264. https://doi.org/10.14502/Tekstilec2018.61.254-264

Lluguay, K. (2016). *Desarrollar un modelo cfd para el análisis del comportamiento del fluido en tuberías del banco de pérdidas de turbomaquinaria hidráulica y laboratorio* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. https://doi.org/10.7705/biomedica.v31i0.530

López, R. (2004). *Caracterización de Medios Porosos y Procesos Percolativos y de Transporte.* [Universidad Nacional de San Luis Facultad].

http://linux0.unsl.edu.ar/~rlopez/cap1_2.pdf

Mahdavi, A. (2013). *Efficiency Measurement of N95 Filtering Facepiece Respirators against Ultrafine Particles under Cyclic and Constant Flows School of Graduate Studies*. Concordia University.

Martin, S., & Moyer, E. (2000). Electrostatic Respirator Filter Media: Filter Efficiency and Most Penetrating Particle Size Effects. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, *15*, 609–617.

Mata, F. (2017). *Aplicación de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y el Modelado Mecanístico en el Estudio del Sistema de Bombeo Electrocentrífugo Sumergido (BEC)*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Maturaporn, T. (1995). *Disposable face mask with multiple liquid resistant layers* (Patent No. 5,467,765).

Montoya, D., Jahn, W., & Rivera, J. de D. (2020). USING A POROUS MEDIUM MODEL TO SIMULATE THE AIR FLOW THROUGH FOG WATER COLLECTORS. *Journal of Porous Media*, *23*(6), 573–591. https://doi.org/10.1615/JPorMedia.2020029819

Mostofi, R., Bahloul, A., Lara, J., Wang, B., Cloutier, Y., & Haghighat, F. (2011). Investigating of Potential Affecting Factors on Performance of N95 Respirator. *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, *28*, 26–39.

NIOSH. (2003). *Guidance for Filtration and AirCleaning Systems to Protect Building Environments from Airborne Chemical, Biological, or Radiological Attacks*. https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-136/pdfs/2003-%0A136.pdf?id=10.26616/NIOSHPUB2003136

NIOSH. (2019). *Determination of particulate filter efficiency level for N95 series filters against solid particulates for non-powered, airpurifying respirators standard testing procedure (STP)*. https://www.cdc.gov/niosh/npptl/stps/pdfs/TEB-APR-STP-0059-508.pdf

Norton, T., Sun, D. W., Grant, J., Fallon, R., & Dodd, V. (2007). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. *Bioresource Technology*, *98*(12), 2386–2414. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.025

OMS. (2020). *Coronavirus disease 2019 (COVID-19) Situation Report – 100*. https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200429-sitrep-100-covid-19.pdf?sfvrsn=bbfbf3d1_2

Ottati, V. (2020). *MÁSCARA VMO V2 - PROTECTORA IMPRESIONADA EN 3D - CORONAVIRUS COVID-19*. https://cults3d.com/es/modelo-3d/variado/vmo-mask-v2-coronavirus-covid-19

Peksen, M., Acar, M., & Malalasekera, W. (2013). Transient computational fluid dynamics modelling of the melting process in thermal bonding of porous fibrous media. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, *227*(4), 254–263. https://doi.org/10.1177/0954408912462184

Rengasamy, S., Shaffer, R., Williams, B., & Smit, S. (2017). A comparison of facemask and respirator filtration test methods. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, *14*(2), 92–103. https://doi.org/10.1080/15459624.2016.1225157

Rieutord, M. (2015). *Fluid dynamics An Introduction* (& M. S. In W. Rhodes, R. Needs, S. Scott, E. Stanley (ed.); Springer).

Tecnología de los Plásticos. (2011). *Polipropileno*. https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/polipropileno.html

Tong, H. W., Kwok, S. K., & KWok, H. C. (2016). *Protective masks with coating comprising offerentelectrospun fibers interweaved with each other, formulations forming the same, and method of producing thereof* (Patent No. 14/964,593).

Tung, K. L., Shiau, J. S., Chuang, C. J., Li, Y. L., & Lu, W. M. (2002). CFD analysis on fluid flow through multifilament woven filter cloths. *Separation Science and Technology*, *37*(4), 799–821. https://doi.org/10.1081/SS-120002218

Vallabh, R., Ducoste, J., Seyam, A.-F., & Banks-Lee, P. (2011). MODELING TORTUOSITY IN THIN FIBROUS POROUS MEDIA USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS. *Journal of Porous Media*, *14*(9), 791–804. https://doi.org/10.1615/JPorMedia.v14.i9.40

Van Doremalen, N., Bushmaker, T., Morris, D. H., Holbrook, M. G., Gamble, A., Williamson, B. N., Tamin, A., Harcourt, J. L., Thornburg, N. ., & Gerber, S. . (2020). Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1. *The New England Journal of Medicine*, *382*(16), 1564–1567. https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973

Wang, Y., Brannock, M., Cox, S., & Leslie, G. (2010). CFD simulations of membrane filtration zone in a submerged hollow fibre membrane bioreactor using a porous media approach. *Journal of Membrane Science*, *363*(1–2), 57–66. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.07.008

World Health Organization. (2020). Modes of transmission of virus causing COVID-19. In *Scientific brief* (Issue March). https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973.Cheng

Yi, B.-J., & Yoon, H.-S. (2016). Review of Computer-Aided Sinus Surgery. *Hanyang Medical Reviews*, *36*(4), 248. https://doi.org/10.7599/hmr.2016.36.4.248

Zabaleta, A. (2015). *Estudio CFD del Flujo Turbulento alrededor de a´labes de turbomáquinas con modelo Trans SST*. Universitat Politécnica de Catalunya.