



POSGRADOS

MAESTRÍA EN MÉTODOS MATEMÁTICOS Y SIMULACIÓN NUMÉRICA EN INGENIERÍA

RPC-SO-42-NO.769-2019

OPCIÓN DE TITULACIÓN:
PROYECTOS DE DESARROLLO

TEMA:
SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL SISTEMA DE
ASPERSIÓN Y LUZ ULTRAVIOLETA DE UN
ROBOT DESINFECTADOR AUTÓNOMO
CONSIDERANDO DIFERENTES VARIACIONES
EN LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DEL
DISEÑO

AUTOR:
ERICK JOSUÉ PIZARRO BARRERA

DIRECTOR:
MARCO ESTEBAN AMAYA PINOS

CUENCA – ECUADOR
2024

Autor:**Erick Josué Pizarro Barrera**

Ingeniero Mecánico Automotriz.

Candidato a Magíster en Métodos Matemáticos y Simulación Numérica en Ingeniería por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

erickjpb50@gmail.com

Dirigido por:**Marco Esteban Amaya Pinos**

Ingeniero Mecánico.

Magister en Sistemas Automotrices.

Magister en Auditoria de Gestión de la Calidad.

mamaya@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2024 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

ERICK JOSUÉ PIZARRO BARRERA

Simulación numérica del sistema de aspersión y luz ultravioleta de un robot desinfectador autónomo considerando diferentes variaciones en los parámetros geométricos del diseño

DEDICATORIA

A mi amada madre, Sandra Barrera, cuyo apoyo incondicional, sacrificio desinteresado y constante estímulo han sido el fundamento de mi camino académico. Agradezco a Dios por haberla colocado como mi guía y modelo a seguir. Su guía y aliento han sido la luz en los momentos de desafío. Esta tesis es el resultado de amor y dedicación, reflejando la semilla de valores y sabiduría que ha cultivado en mí. Con profundo respeto y gratitud, dedico este logro a ella, a mi madre, un faro de inspiración y ejemplo de tenacidad. Con cariño y agradecimiento, esta obra está dedicada a ti.

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a mi madre Sandra Barrera Sarmiento, ya que sin su ayuda y soporte nada de esto sería posible y no me encontraría donde me encuentro actualmente.

Mi agradecimiento a los docentes del posgrado de Métodos Matemáticos y Simulación de Ingeniería, con especial énfasis a mi tutor el Ing. Marco Esteban Amaya Pinos y mis compañeros del laboratorio de robótica, quienes siempre estuvieron para brindarme su apoyo, paciencia y conocimiento en pro del aprendizaje que me ofrecieron a lo largo de estos años, consiguiendo inspirar y guiarme en el camino que deseo seguir.

Para finalizar, agradezco enormemente a mis amigos y compañeros de la empresa Talma SA. Quienes en primer lugar me dieron la oportunidad de trabajar y estudiar al mismo tiempo, con su apoyo durante este par de años que me apoyaron, se sacrificaron y siempre buscaron lo mejor para mí desde que inicié mis labores a su lado en enero de 2022, gracias por todos los ánimos, experiencias e historias que me han dado en mi tiempo de posgrado en la Universidad.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| Resumen | 13 |
| Abstract | 14 |
| 1. Introducción | 15 |
| 2. Determinación del Problema..... | 16 |
| 3. Marco teórico referencial..... | 18 |
| 3.1 Atomización | 18 |
| 3.1.1 Atomizadores por presión | 18 |
| 3.1.2 Física de la atomización..... | 19 |
| 3.1.3 Análisis numérico..... | 20 |
| 3.1.4 Teoría de la atomización | 21 |
| 3.2 Introducción a la óptica | 26 |
| 3.2.1 Flujo | 26 |
| 3.2.2 Intensidad | 27 |
| 3.2.3 Espectro | 28 |
| 3.2.4 Luminancia e Iluminancia | 28 |
| 3.2.5 Propiedades ópticas | 29 |
| 3.2.6 Fuentes de luz..... | 30 |
| 3.2.7 Sensores..... | 30 |
| 3.2.8 Simulaciones..... | 36 |
| 4. Materiales y metodología..... | 37 |
| 4.1 Pruebas Físicas del Aspersor..... | 37 |
| 4.1.1 Análisis a 0° | 38 |
| 4.1.1 Análisis a +15° | 38 |
| 4.1.2 Análisis a -15°..... | 39 |
| 4.2 Simulación de la Atomización | 40 |
| 4.2.1 Construcción de la malla | 41 |
| 4.2.2 Configuración de las Simulaciones | 41 |
| 4.3 Simulación de Luz..... | 43 |
| 5. Resultados y discusión..... | 46 |
| 5.1 Resultados de las Pruebas Físicas | 46 |
| 5.1.1 Resultado Sobre el Largo del Alcance de los Aspersores | 46 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.1.2 | Resultado Sobre el Ancho del Alcance de los Aspersores..... | 47 |
| 5.2 | Resultados de la Simulación de Fluido | 48 |
| 5.2.1 | Resultados del Análisis Ideal | 48 |
| 5.2.2 | Resultados del Análisis Real | 53 |
| 5.3 | Comparación de los Resultados de Fluidos | 59 |
| 5.3.1 | Resultado Real e Ideal | 59 |
| 5.3.2 | Resultado Real y Físico | 59 |
| 5.4 | Resultados de la Simulación Óptica..... | 60 |
| 5.4.1 | Resultados de la Simulación Interactiva..... | 60 |
| 5.4.2 | Iluminancia Resultante en Conjunto 2D..... | 61 |
| 5.4.3 | Iluminancia Resultante en Solitario 2D | 65 |
| 5.4.4 | Iluminancia de las Simulaciones 3D..... | 72 |
| 6. | Conclusiones..... | 74 |
| | Referencias | 76 |
| | Anexos | 78 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Esquema de un atomizador por presión (Dumouchel, 2008). | 19 |
| Figura 2. Geometría de la expansión brusca (Raga, 2016)..... | 19 |
| Figura 3. Flujo de boquilla monofásico (ANSYS, 2023)..... | 22 |
| Figura 4. Árbol de decisión para el estado de la boquilla cavitante (ANSYS, 2023)..... | 24 |
| Figura 5. Descripción visual es un sistema óptico (Ansys I. , 2022)..... | 26 |
| Figura 6. Ángulo sólido=Campo de visión desde un punto específico cubierto por un observador o un objeto (Ansys I. , 2022)..... | 27 |
| Figura 7. Fuente emitiendo sobre un hemisferio con diferentes distribuciones de intensidad (Ansys I. , 2022)..... | 28 |
| Figura 8. Diagrama del espectro de luz visible (Ansys I. , 2022). | 28 |
| Figura 9. Gráfica que indica la diferencia entre luminancia e iluminancia (Ansys I. , 2022)..... | 29 |
| Figura 10. Tipos de propiedades ópticas (Ansys I. , 2022) | 29 |
| Figura 11. Representación de cómo calcular el cono de integración (Ansys I. , 2022).. | 31 |
| Figura 12. Modo planar con una dirección de integración normal a el sensor (Ansys I. , 2022)..... | 33 |
| Figura 13. Gráfica de la iluminancia radial (Ansys I. , 2022)..... | 33 |
| Figura 14. Gráfica de iluminancia Hemisférica (Ansys I. , 2022). | 34 |
| Figura 15. Gráfica de la iluminancia Cilíndrica (Ansys I. , 2022)..... | 34 |
| Figura 16. Gráfica de la iluminancia Semicilíndrica (Ansys I. , 2022). | 35 |
| Figura 17. Representación de la celda (Ansys I. , 2022). | 35 |
| Figura 18. Imagen real del robot desinfectador (Investigación, 2021). | 37 |
| Figura 19. Dimensiones de la cuadrícula. | 37 |
| Figura 20. Aspersión resultante a 0°. | 38 |
| Figura 21. Aspersión resultante a +15°. | 39 |
| Figura 22. Aspersión resultante a -15°. | 40 |
| Figura 23. Vista de la malla generada..... | 41 |
| Figura 24. Visualización previa de la dirección que tomará la aspersión..... | 43 |
| Figura 25. Configuración de la fuente de luz..... | 44 |
| Figura 26. Configuración de los sensores de irradiancia. | 44 |
| Figura 27. Configuración del sensor de intensidad. | 45 |
| Figura 28. Diagrama de barras del alcance los aspersores. | 47 |
| Figura 29. Diagrama de barras del ancho que alcanzaron los aspersores. | 48 |
| Figura 30. Resultado de la simulación de partículas ideal. | 48 |
| Figura 31. Resumen de la inyección ideal. | 49 |
| Figura 32. Gráfica del análisis del alcance ideal. | 52 |
| Figura 33. Gráfica del análisis del ancho ideal..... | 53 |
| Figura 34. Resultado de la simulación de partículas real. | 53 |
| Figura 35. Resumen de la inyección real. | 54 |
| Figura 36. Gráfica del contorno de la magnitud de velocidad. | 54 |
| Figura 37. Gráfica del contorno de la presión estática. | 55 |
| Figura 38. Gráfica de la concentración DPM en un contorno..... | 55 |

| | |
|---|----|
| Figura 39. Gráfica de la concentración DPM del rastreo de partículas..... | 56 |
| Figura 40. Acercamiento a la zona de salida de la figura 39. | 56 |
| Figura 41. Gráfica del análisis del alcance real..... | 58 |
| Figura 42. Gráfica del análisis del ancho ideal..... | 59 |
| Figura 43. Simulación interactiva con un millón de rayos..... | 60 |
| Figura 44. Rebotes de los rayos de luz sobre superficies opacas..... | 61 |
| Figura 45. Resultado y métrica de la vista frontal. | 61 |
| Figura 46. Resultado y métrica de la vista lateral. | 62 |
| Figura 47. Gráfico de dispersión del análisis frontal. | 63 |
| Figura 48. Gráfico de dispersión del análisis lateral..... | 64 |
| Figura 49. Imagen y métrica del análisis frontal..... | 65 |
| Figura 50. Imagen y métrica del análisis lateral. | 65 |
| Figura 51. Imagen y métrica del análisis de la pared lateral. | 66 |
| Figura 52. Imagen y métrica del análisis de la pared posterior. | 67 |
| Figura 53. Resultado y métricas desde el sensor de la parte superior. | 68 |
| Figura 54. Análisis y métricas del sensor de la parte inferior. | 68 |
| Figura 55. Análisis y métricas del sensor de la parte media. | 69 |
| Figura 56. Gráfico de dispersión del análisis en sección media de la altura. | 70 |
| Figura 57. Imagen resultada del análisis de intensidad. | 71 |
| Figura 58. Gráfico de dispersión del análisis de intensidad. | 72 |
| Figura 59. Resultado y métricas de la simulación 3D..... | 72 |
| Figura 60. Resultado del primer análisis. | 73 |
| Figura 61. Resultado del segundo análisis..... | 73 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Etapas del proceso de atomización (Fritsching, 2004). | 18 |
| Tabla 2. Lista de parámetros que rigen el flujo interno de la boquilla (Nurick., 1976). 23 | |
| Tabla 3. Valores del parámetro de dispersión para diferentes estados de boquilla (Lefebvre A. H., 1989). | 26 |
| Tabla 4. Efectos del ángulo de integración (Ansys, 2020). | 32 |
| Tabla 5. Perspectivas de visualización (Ansys I. , 2022). | 36 |
| Tabla 6. Datos técnicos de la bomba del robot desinfectador..... | 40 |
| Tabla 7. Alcance de los aspersores..... | 46 |
| Tabla 8. Ancho del largo de alcance de los aspersores. | 47 |
| Tabla 9. Niveles del desarrollo de la atomización ideal. | 49 |
| Tabla 10. Datos de tiempo alcance y ensanchamiento de la tabla 9. | 51 |
| Tabla 11. Niveles del desarrollo de la atomización real. | 56 |
| Tabla 12. Datos de tiempo alcance y ensanchamiento de la tabla 11. | 58 |
| Tabla 13. Datos resultantes de las simulaciones en conjunto 2D. | 62 |
| Tabla 14. Datos de iluminancia frontal..... | 63 |
| Tabla 15. Datos de iluminancia lateral. | 64 |
| Tabla 16. Iluminancias o irradiancias resultantes en las simulaciones frontal y lateral. 66 | |
| Tabla 17. Iluminancias o irradiancias resultantes en las paredes frontal y lateral. | 67 |
| Tabla 18. Iluminancias o irradiancias resultantes en las secciones de la lámpara..... | 69 |
| Tabla 19. Datos de iluminación a media altura. | 70 |
| Tabla 20. Datos de intensidad. | 71 |

NOMENCLATURA

| Símbolo | Definición |
|------------------|---|
| V | Velocidad [m/s] |
| L | Longitud [mm] |
| ρ | Densidad [kg/ m ³] |
| σ | Tensión superficial [N/m] |
| μ | Viscosidad molecular |
| Re | Número de Reynolds |
| U | Velocidad media del fluido [m/s] |
| We | Número de Weber |
| Oh | Número de Ohnesorge |
| D | Diámetro del chorro líquido [mm] |
| m_p | Masa de la partícula |
| \vec{u}_p | Velocidad de la partícula [m/s] |
| ρ_p | Densidad de la partícula [kg/m ³] |
| \vec{F} | Fuerza adicional [N] |
| τ_r | Tiempo de relajación de la partícula [s] |
| I_p | Momento de inercia [kg·m ²] |
| $\vec{\omega}_p$ | Velocidad angular de la partícula [rad/s] |
| d_p | Diámetro de la partícula |
| C_ω | Coefficiente de arrastre rotacional |
| \vec{T} | Torque [N·m] |
| $\vec{\Omega}$ | Velocidad angular [rad/s] |
| r | Radio de curvatura [mm] |
| p_1 | Presión de subida de flujo [Pa] |
| p_2 | Presión de bajada de flujo [Pa] |
| p_v | Presión de vapor [Pa] |
| C_c | Coefficiente de contracción |
| K | Número de cavitación |

| | |
|-----------------|--|
| C_d | Coeficiente de descarga |
| \dot{m}_{eff} | Flujo másico de la boquilla [kg/s] |
| Δ | Diferencial |
| φ | Ángulo azimutal [°] |
| u | Velocidad de salida [m/s] |
| C_A | Constante para Geometrías de boquillas |
| λ | Escala de longitud integral radial |
| s | Dispersión de las gotas |
| cd | Candelas [cd] |
| W | Watt [W] |
| sr | Estereorradián [sr] |
| lm | Lumen [lm] |
| m | Metro [m] |
| Lux | Luxen [lx] |
| ε | Ángulo de incidencia [°] |
| E | Iluminancia [lx] |
| $W.sr^{-1}$ | Intensidad radiante |
| $lm.sr^{-1}$ | Intensidad luminosa |

SIMULACIÓN NUMÉRICA
DEL SISTEMA DE
ASPERSIÓN Y LUZ
ULTRAVIOLETA DE UN
ROBOT DESINFECTADOR
AUTÓNOMO
CONSIDERANDO
DIFERENTES VARIACIONES
EN LOS PARÁMETROS
GEOMÉTRICOS DEL
DISEÑO

AUTOR(ES):

ERICK JOSUÉ PIZARRO BARRERA

RESUMEN

Este proyecto se enfoca en la simulación de un robot desinfectador que combina sistemas de aspersion y tecnología de luz UVC para la desinfección de entornos diversos. La necesidad de mantener ambientes seguros y libres de patógenos ha impulsado el desarrollo de tecnologías, este proyecto utiliza la simulación numérica para optimizar y evaluar la efectividad de este innovador robot.

La simulación numérica es crucial para validar el robot desinfectador, modelando precisamente dos aspectos clave: la aspersion uniforme de agentes desinfectantes y la radiación UVC para inactivar microorganismos patógenos en diversas superficies. Este proyecto busca ofrecer una plataforma de simulación robusta para evaluar la eficacia, eficiencia y seguridad del robot en diferentes escenarios. Se enfocará en el flujo de líquidos y la luz UVC para lograr una desinfección efectiva. El éxito de esta simulación optimizará el robot, impulsando tecnologías avanzadas de desinfección en espacios médicos, comerciales y públicos. Además, brindará información sobre la distribución de agentes desinfectantes, la interacción con superficies y la capacidad de la luz UVC para inactivar microorganismos, fundamentales para decisiones informadas que mejoren su efectividad en entornos reales.

En resumen, el enfoque en la simulación numérica de sistemas de aspersion y luz UVC para un robot desinfectador destaca la importancia de esta tecnología en la desinfección de espacios, ofreciendo un camino hacia entornos más seguros y libres de patógenos, respaldado por un diseño optimizado y confiable del robot.

Palabras Clave:

Simulación numérica, aspersion de fluidos, luz UVC, optimización de diseño.

ABSTRACT

This project focuses on the simulation of a disinfection robot that combines spray systems and UVC light technology for the disinfection of diverse environments. The need to maintain safe and pathogen-free environments has driven the development of technologies, this project uses numerical simulation to optimize and evaluate the effectiveness of this innovative robot.

Numerical simulation is crucial to validate the disinfectant robot, modeling precisely two key aspects disinfecting robot, modeling precisely two key aspects: the uniform spraying of disinfecting uniform spraying of disinfecting agents and UVC radiation to inactivate pathogenic microorganisms on various pathogenic microorganisms on various surfaces. This project aims to provide a robust simulation platform to evaluate the efficacy, efficiency and safety of the robot in different scenarios, efficiency and safety of the robot in different scenarios. It will focus on the flow of liquids and UVC light to achieve effective disinfection. The success simulation will optimize the robot, driving advanced disinfection technologies in medical disinfection in medical, commercial and public spaces. It will also provide disinfectant agent distribution, interaction with surfaces, and the robot's interaction with surfaces, and the ability of UVC light to inactivate microorganisms, critical for microorganisms, fundamental for informed decisions to improve its effectiveness in real-world effectiveness in real-world environments.

In summary, the focus on numerical simulation of spray and UVC light systems for a disinfection robot highlights the importance of this technology in space disinfection, offering a path to safer and pathogen-free environments, supported by an optimized and reliable robot design.

Keywords:

Numerical simulation, fluid spray, UVC light, design optimization

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la necesidad de mantener ambientes limpios y seguros se ha vuelto fundamental en diversos sectores, especialmente en entornos donde la prevención de la propagación de patógenos es crucial. En respuesta a esta demanda, la tecnología de desinfección ha experimentado avances significativos, y entre estas innovaciones se encuentran los sistemas de aspersión y la utilización de luz UVC.

El presente proyecto se enfoca en el desarrollo de un robot desinfectador que integra un sistema de aspersión para la dispersión de agentes desinfectantes y tecnología de luz UVC para la inactivación de microorganismos patógenos en entornos diversos. Para garantizar la efectividad y seguridad de este robot, se llevará a cabo una simulación numérica detallada de ambos sistemas: la aspersión y la radiación UVC.

La simulación numérica representa una herramienta esencial en la fase de diseño y optimización de este robot desinfectador. Permite modelar y predecir con precisión la dinámica del flujo de líquido en el sistema de aspersión, así como la propagación y dosificación óptima de la luz UVC para una desinfección efectiva.

El objetivo principal de este proyecto es proporcionar una plataforma de simulación robusta y confiable que permita evaluar la eficacia, eficiencia y seguridad del robot desinfectador en diferentes escenarios y condiciones. La simulación se centrará en la distribución uniforme del agente desinfectante, la dosis adecuada de luz UVC para inactivar microorganismos y la interacción con diferentes tipos de superficies.

El éxito de esta simulación numérica no solo facilitará el diseño y la optimización del robot desinfectador, sino que también contribuirá significativamente a la implementación de tecnologías avanzadas para la desinfección en entornos comerciales, médicos y diversos espacios públicos.

2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

La simulación numérica de un sistema de aspersión y de luz UVC presenta desafíos particulares que están relacionados con la complejidad de los fenómenos físicos involucrados y la necesidad de modelar con precisión la interacción entre múltiples variables.

La simulación Numérica del Sistema de Aspersión se encuentra con problemas como el modelado de la dinámica del fluido donde la simulación de la dispersión de líquido en un sistema de aspersión requiere modelos precisos de la dinámica del fluido a través del aire o sobre superficies teniendo en cuenta factores como la presión, la velocidad, y la geometría de las boquillas de aspersión. Modelar con precisión la ruptura del líquido en gotas y su dispersión es esencial para evaluar la eficacia de la aspersión. La interacción con superficies modela la precisión de cómo el agente desinfectante interactúa con diferentes tipos de superficies (lisas, porosas, irregulares). Por último, la validación experimental donde puede ser complicado obtener datos experimentales que validen la simulación, debido a que al realizar pruebas en entornos pueden afectar la confiabilidad de la simulación y su capacidad para predecir con precisión el rendimiento del sistema de aspersión.

En la simulación Numérica de la Luz UVC el modelado de la Radiación UVC implica modelar con precisión la radiación electromagnética, su absorción y dispersión a través del espacio y su interacción con el aire y las superficies. La distribución Espacial y Temporal donde la luz UVC debe distribuirse de manera uniforme y al modelar la distribución puede ser desafiante y requiere algoritmos y métodos computacionales avanzados. La interacción de la luz UVC con materiales y superficies que pueden reflejar, absorber o dispersar la radiación de manera diferente variarán dependiendo de las propiedades ópticas de dichos materiales, siendo un desafío crucial para determinar su efectividad. Y finalmente, validar los resultados de la simulación numérica de la luz, similar a la simulación de sistemas de aspersión requiere datos experimentales que validen y ajusten el modelo, pueden

ser complicados de obtener debido a la necesidad de mediciones precisas que podrían limitar la precisión de la simulación sobre los resultados en el mundo real.

En resumen, la simulación numérica de sistemas de aspersión y de luz UVC implica abordar desafíos relacionados con la complejidad de modelar la física subyacente, la validación experimental y la precisión en la representación de la interacción con el entorno. Superar estos desafíos es esencial para garantizar que la simulación sea una herramienta confiable y útil en la optimización y diseño de estos sistemas en aplicaciones prácticas.

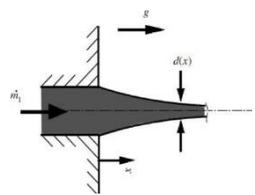
3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1 ATOMIZACIÓN

Es el proceso que consiste en la ruptura de la fase continua de un determinado líquido a un estado de vaporización donde se forman gotas individuales y en el cual no alcanza el estado gaseoso como tal. Se refiere a la formación de gotas con un diámetro mucho menor que el del aspersor de dónde se originó (Angela, 2012).

La atomización de un líquido se puede dividir en tres etapas que son la salida del flujo líquido, seguido por la atomización primaria, que va desde la deformación del líquido hasta que empieza a fragmentarse; y finalmente la atomización secundaria que empieza desde la ruptura de los fragmentos iniciales hasta que se forman gotas estables (Angela, 2012).

Tabla 1. Etapas del proceso de atomización (Fritsching, 2004).

| ETAPA | | DESCRIPCIÓN | IMÁGEN |
|-------|--------------------------|--|---|
| 1 | Salida del flujo líquido | Salida del líquido a través de la boquilla, debido a la fuerza gravitacional. |  |
| 2 | Atomización Primaria | Iniciación y crecimiento de las inestabilidades, hasta generar la ruptura en grandes fragmentos. |  |
| 3 | Atomización secundaria | Ruptura sucesiva de los fragmentos hasta obtener gotas estables |  |

3.1.1 ATOMIZADORES POR PRESIÓN

Este tipo de atomizador consiste en inyectar un líquido a alta velocidad en un gas que se encuentra en reposo, este tipo de atomizador se lo puede encontrar en inyectores de combustión o motores de cohetes (Lefebvre A. , 1989).

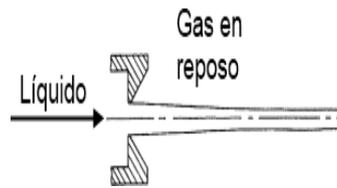


Figura 1. Esquema de un atomizador por presión (Dumouchel, 2008).

El líquido que cuenta con una viscosidad y densidad determinada, fluye a través de un canal con dimensiones reducidas para pasar a una expansión brusca de salida. Al circular por medio de esta expansión las partículas son forzadas al exterior perdiendo contacto con la pared y generando una zona de caída de presión llamada “zona de recirculación” lo que provoca la pérdida de energía del fluido (Raga, 2016).

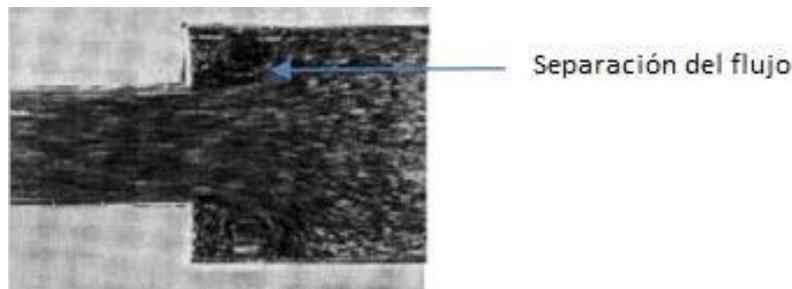


Figura 2. Geometría de la expansión brusca (Raga, 2016).

3.1.2 FÍSICA DE LA ATOMIZACIÓN

El chorro líquido al encontrarse en estado turbulento tiene la capacidad de fragmentarse sin necesidad de que una fuerza externa actúe, además las componentes radiales de la velocidad ya no son limitadas por las paredes del tubo solo serán restringidas por la tensión superficial, desintegra el líquido en partículas de forma esférica con energía de superficie mínima (Lefebvre A. , 1989).

El chorro al ser descargado en un fluido gaseoso en reposo, el líquido se torna inconsistente y se divide en gotas (Dumouchel, 2008).

Normalmente existen tres fuerzas que actúan sobre el líquido, donde se excluyen fuerzas electromagnéticas, las cuales son determinantes en el proceso de atomización las cuales son:

$$\text{Inercia} \quad \rho_L L^2 V^2 \quad (3.1)$$

$$\text{Tensión Superficial} \quad \sigma L \quad (3.2)$$

$$\text{Viscosidad} \quad \mu_L L V \quad (3.3)$$

Donde L es longitud [mm] y V es la velocidad [m/s] (Mehring, 2000). Para la inyección de un fluido la velocidad y longitud son características correspondientes a la velocidad promedio del chorro y el diámetro o espesor de la lámina; de las fuerzas mencionadas anteriormente resultan los grupos adimensionales que son empleados en la caracterización de la atomización de un chorro líquido en un gas en reposo:

Número de Reynolds:

$$Re_L = \frac{\rho_L D_L U_L}{\mu_L} = \frac{\text{Inercia}}{\text{Viscosidad}} \quad (3.4)$$

Número de Weber del Gas:

$$We_g = \frac{\rho_g U_L^2 U_L}{\sigma} = \frac{\text{Inercia}}{\text{Tensión Superficial}} \quad (3.5)$$

Número de Ohnesorge del Líquido:

$$Oh = \frac{\sqrt{We_L}}{Re_L} = \frac{\mu_L}{(\rho_L D_L \sigma)^{1/2}} = \frac{\text{Viscosidad}}{\sqrt{\text{Inercia} * \text{Tensión Superficial}}} \quad (3.6)$$

Con los números adimensionales mencionados se establece regímenes de ruptura, que junto a las fuerzas de viscosidad, inercia y tensión superficial se consideran un factor relevante en la atomización, características iniciales del flujo líquido donde engloba su turbulencia, cavitación, etc.

3.1.3 ANÁLISIS NUMÉRICO

Se adapta un modelo de fase discreta (DPM) que provee una base para futuras directrices en la dinámica de flujos con multifase, se aplican dos tipos de aproximaciones para el cálculo de flujos multifase: La aproximación Euler-Lagrange y la aproximación Euler-Euler

4.1.1.1 Ecuaciones de movimiento de partículas

“Ansys Fluent” predice la trayectoria de una partícula en fase discreta por medio de la integración del balance de fuerzas sobre una partícula, la fuerza de balance equivale a la inercia de la partícula con fuerzas que actúan sobre ella (Ioannides, 1983):

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r} + m_p \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (3.7)$$

Donde m_p es la masa de la partícula, \vec{u} la velocidad fase del fluido, \vec{u}_p la velocidad de la partícula, ρ la densidad del fluido, ρ_p la densidad de la partícula, \vec{F} una fuerza adicional, $m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r}$ la fuerza de arrastre, y τ_r el tiempo de relajación de la gota o partícula, que se calcula por:

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_d Re} \quad (3.8)$$

En esta ecuación μ es la viscosidad molecular, d_p es el diámetro de la partícula y Re es el número de Reynolds

4.1.1.2 Balance del torque de una partícula

La rotación particular es una parte natural del movimiento de la partícula y puede tener una influencia significativa sobre la trayectoria dentro de un fluido en movimiento, para contabilizar la rotación particular, una ecuación diferencial ordinaria (ODE) adicional para el momento angular de la partícula es propuesto:

$$I_p \frac{d\vec{\omega}_p}{dt} = \frac{\rho_f}{2} \left(\frac{d_p}{2} \right)^5 C_\omega |\vec{\Omega}| \vec{\Omega} = \vec{T} \quad (3.9)$$

Donde I_p es el momento de inercia, $\vec{\omega}_p$ es la velocidad angular, ρ_f es la densidad del fluido, d_p es el diámetro de la partícula, C_ω es el coeficiente de arrastre rotacional, \vec{T} es el torque aplicado a una partícula dentro del fluido dominante, y $\vec{\Omega}$ es la velocidad angular relativa de fluido-partícula calculada mediante:

$$\vec{\Omega} = \frac{1}{2} \nabla \times \vec{u}_f - \vec{\omega}_p \quad (3.10)$$

3.1.4 TEORÍA DE LA ATOMIZACIÓN

Son un tipo de inyección spray que describen el fenómeno de ruptura primaria, donde se necesita proveer de un diámetro inicial, posición y velocidad de partículas.

Todos los modelos de atomización usan parámetros de atomizadores físicos, tales como el diámetro del orificio y rango del flujo de masa para calcular el tamaño, velocidad y

posición de la aspersión inicial. En este caso el modelo a estudiar a fondo será el modelo de atomizador de orificio plano (ANSYS, 2023).

4.1.1.3 Modelo de atomización de orificio plano

Es el modelo más común y simple de atomizador de realizar. En este modelo el líquido es acelerado a través de una boquilla, por el cual se forma un chorro de líquido que después se fragmenta y forma gotas (C. Soteriou, 1995).

Este modelo puede funcionar en tres diferentes regímenes que son:

- Flujo de boquilla monofásico, donde el líquido llena completamente el orificio.
- Flujo de boquilla cavitante, donde se forman bolsas de vapor justo después de las esquinas de entrada.
- Flujo de boquilla invertida, donde el gas aguas abajo rodea el chorro de líquido dentro de la boquilla.

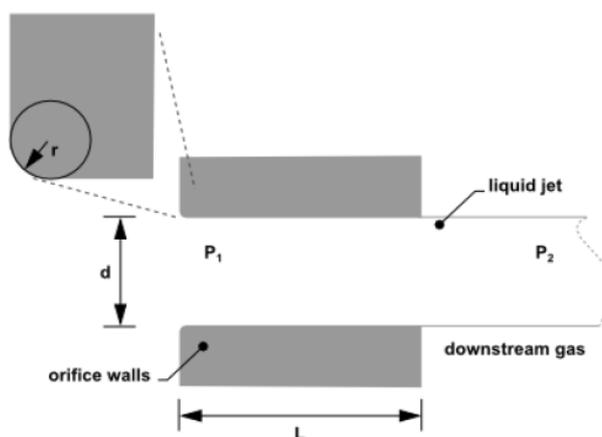


Figura 3. Flujo de boquilla monofásico (ANSYS, 2023).

4.1.1.4 Estado interno de la boquilla

Para una predicción precisa, es menester identificar el correcto estado interno de la boquilla, ya que su estado tendrá un importante efecto en el spray externo. Se debe confiar en los modelos empíricos obtenidos de datos experimentales, de los cuales el “Ansys Fluent” usa varios parámetros adimensionales para determinar el régimen de flujo en este modelo de los cuales se resume en la tabla 2:

Tabla 2. Lista de parámetros que rigen el flujo interno de la boquilla (Nurick., 1976).

| | |
|--|----------|
| Diámetro de la boquilla [mm] | d |
| Longitud de la boquilla [mm] | L |
| Radio de curvatura de la esquina de entrada [mm] | r |
| Presión de subida de flujo [Pa] | p_1 |
| Presión de bajada de flujo [Pa] | p_2 |
| Viscosidad [kg/(m s)] | μ |
| Densidad del líquido [kg/m ³] | ρ_f |
| Presión de vapor [Pa] | p_v |

El flujo líquido se contrae en la boquilla, por lo cual Nurick encontró útil el usar un coeficiente de contracción C_c que represente la reducción en el área de sección transversal del chorro. Este coeficiente se define como el área del flujo de contracción sobre el área de sección transversal de la boquilla de la siguiente manera que C_c es una constante teórica equivalente a 0.611, dato que proviene del análisis de flujo potencial de boquillas invertidas.

$$Re_h = \frac{d\rho_1}{\mu} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho_1}} \quad (3.11)$$

$$K = \frac{p_1 - p_v}{p_1 - p_2} \quad (3.12)$$

4.1.1.5 Coeficiente de descarga

Otro importante parámetro que describe el rendimiento de las boquillas es el coeficiente de descarga (C_d), que el radio de flujo másico que circula a través de la boquilla hacia el teórico máximo rango de flujo de masa:

$$C_d = \frac{\dot{m}_{eff}}{A\sqrt{2\rho_1(p_1 - p_2)}} \quad (3.13)$$

Donde \dot{m}_{eff} es la tasa de flujo másico de la boquilla definida por:

$$\dot{m}_{eff} = \frac{2\pi\dot{m}}{\Delta\varphi} \quad (3.14)$$

Aquí la tasa de flujo másico \dot{m} y la diferencia entre el ángulo de inicio y parada azimutal $\Delta\varphi$ son especificadas en la interfaz como entradas por datos que son conocidos con anterioridad.

El número de cavitación K , es otro parámetro esencial en la predicción del inicio de la cavitación que se asume ocurrirá en el valor dado por la siguiente relación empírica:

$$K_{inicio} = 2 \left(1 - \frac{r}{d}\right)^2 - \frac{1000}{Re_h} \quad (3.15)$$

Similarmente, un valor crítico del valor de K donde la inversión ocurre se da de la siguiente forma:

$$K_{crit} = 1 + \frac{1}{\left(1 + \frac{L}{4d}\right) \left(1 + \frac{2000}{Re_h}\right) e^{70\frac{r}{d}}} \quad (3.16)$$

Si $\frac{r}{d}$ es mayor a 0.05, la inversión es considerada imposible y K_{crit} toma el valor de 1.0.

El árbol de decisión mostrado en la ilustración 4, que depende del estado de la boquilla, elige una relación única para las relaciones.

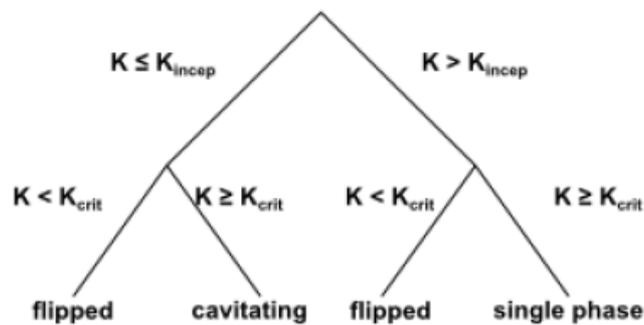


Figura 4. Árbol de decisión para el estado de la boquilla cavitante (ANSYS, 2023).

4.1.1.6 Velocidad de salida

Para una boquilla monofásica el estimado de la velocidad de salida (u) viene de la conservación de masa y el supuesto de una velocidad de salida uniforme (Corradini., 1997):

$$u = \frac{\dot{m}_{eff}}{\rho_1 A} \quad (3.17)$$

Para el caso de boquillas invertidas la velocidad de salida es encontrada de la conservación de masa y el valor reducido del área de flujo (Corradini., 1997):

$$u = \frac{\dot{m}_{eff}}{\rho_1 C_{ct} A} \quad (3.18)$$

4.1.1.7 Ángulo de spray

Depende de la proporción del gas, las densidades del líquido y el parámetro C_A , en boquillas invertidas, este tiene un valor constante. El valor C_A se lo toma como una constante para geometrías de boquillas específicas, pero cuanto mayor sea el valor, más estrecho será el spray, por lo que se sugiere la siguiente correlación (Bracco, 1982):

$$C_A = 3 + \frac{L}{3.6d} \quad (3.19)$$

El ángulo del spray es sensible al régimen de flujo interno de la boquilla, por lo cual se debería tomar valores pequeños en C_A para boquillas cavitantes en vez de las monofásicas. Los valores típicos están en un rango de 4.0-6.0.

4.1.1.8 Distribución del diámetro de las gotas

Una de las características básicas de una inyección es la distribución del tamaño de gota, en un atomizador el diámetro de distribución está bastante relacionado al estado de la boquilla (Lefebvre A. H., 1989).

Para un flujo de boquilla monofásica, se aplica la correlación de Wu para calcular el diámetro medio (d_{32}) y establecer el tamaño inicial de la gota con las cantidades de turbulencia estimadas del chorro de líquido (P.-K.Wu, 1995):

$$d_{32} = 133.0\lambda We^{-0.74} \quad (3.20)$$

Donde $\lambda = \frac{d}{8}$, λ es la escala de longitud integral radial en la salida del chorro basado en un flujo de tubería turbulento completamente desarrollado, y We es el número de Weber y σ es la tensión superficial de la gota, definido como:

$$We = \frac{\rho_1 u^2 \lambda}{\sigma} \quad (3.21)$$

El segundo parámetro necesario para especificar la distribución del tamaño de las gotas es la dispersión (s), sus valores son escogidos de observaciones experimentales llevadas a cabo. Cabe recalcar que cuanto mayor sea el valor del parámetro de dispersión, más estrecha será la distribución del tamaño de las gotas. En la tabla 3 se presenta una lista de valores de dispersión para tres estados:

Tabla 3. Valores del parámetro de dispersión para diferentes estados de boquilla (Lefebvre A. H., 1989).

| ESTADO | PARÁMETRO DE DISPERSIÓN |
|------------|-------------------------|
| Monofásico | 3.5 |
| Cavitante | 1.5 |
| Volteado | ∞ |

3.2 INTRODUCCIÓN A LA ÓPTICA

Una fuente de luz tiene varias características definidas por:

- Emisividad o poder (flujo)
- Intensidad
- Espectro de luz

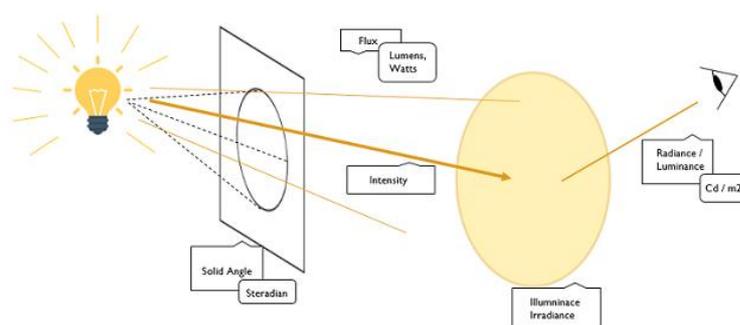


Figura 5. Descripción visual es un sistema óptico (Ansys I., 2022).

3.2.1 FLUJO

Corresponde a la energía total emitida por una fuente de luz.

En fotometría al emitir la luz un espectro visible, que va desde los 390nm hasta los 700nm, el flujo es conocido como un flujo luminoso que es expresado en lumens (lm); en radiometría la energía emitida por la fuente de luz conocida como flujo radiante que se expresa en watts (W) (Ansys I., 2022).

3.2.2 INTENSIDAD

Es el poder emitido por una fuente de luz en una dirección particular por unidad de ángulo sólido (Ansys I. , 2022).

- La unidad de medida es la Candela (cd), donde $1\text{cd}=1\text{lm}/\text{sr}$
- La intensidad radiante es expresada en watts por estereorradián ($\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$.)
- La intensidad luminosa se expresa en lumens por estereorradián ($\text{lm}\cdot\text{sr}^{-1}$.)

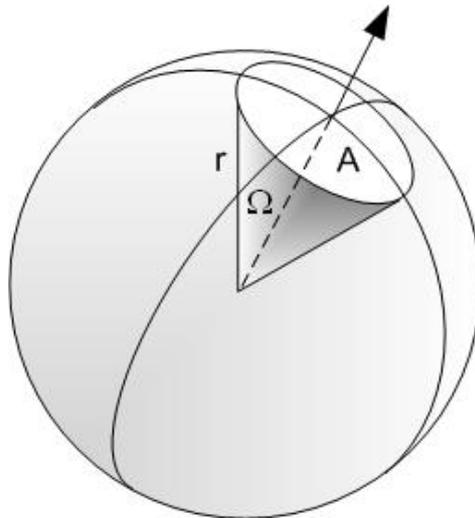


Figura 6. Ángulo sólido=Campo de visión desde un punto específico cubierto por un observador o un objeto (Ansys I. , 2022).

La intensidad de distribución describe la dirección de emisión de una fuente de luz (Ansys I. , 2022).

- Una emisión Lambertiana asegura que la fuente tendrá una distribución uniforme, teóricamente la fuente distribuirá la luz de manera equitativa en cada dirección por lo cual la fuente tiene la misma luminancia desde cualquier ángulo que se observe.
- Con una distribución Cos, la intensidad seguirá la ley del coseno, donde mientras mayor sea la intensidad, aparecerá un diagrama más compacto.
- Una distribución gaussiana sigue una función gaussiana que puede ser simétrica o asimétrica.

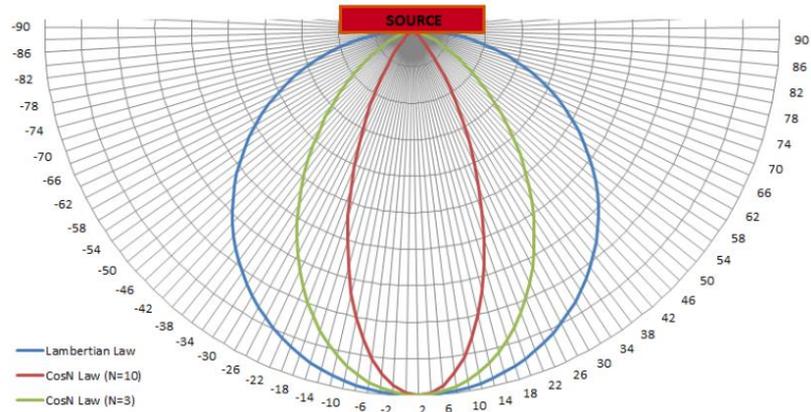


Figura 7. Fuente emitiendo sobre un hemisferio con diferentes distribuciones de intensidad (Ansys I. , 2022).

3.2.3 ESPECTRO

Un espectro de luz completo engloba:

- El espectro de luz visible, que el ojo humano es capaz de percibir.
- Luz infrarroja.
- Luz ultravioleta.

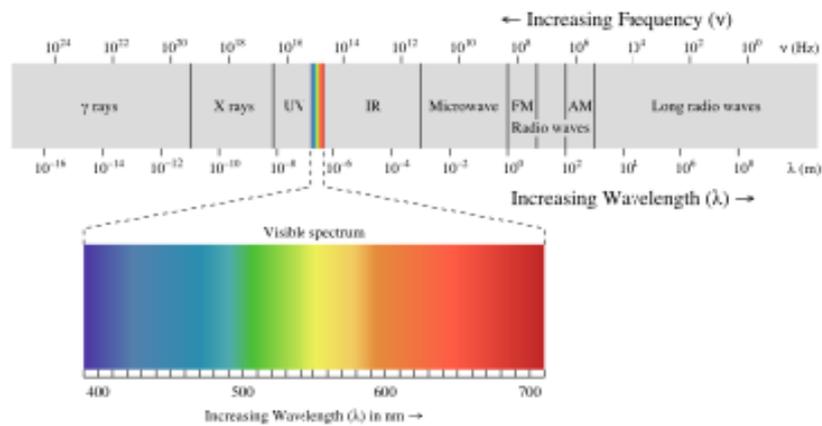


Figura 8. Diagrama del espectro de luz visible (Ansys I. , 2022).

3.2.4 LUMINANCIA E ILUMINANCIA

Luminancia o radiancia es la cantidad de luz proveniente de una superficie que el ojo humano es capaz de percibir, mientras que iluminancia o irradiancia es la cantidad de energía visible que cae sobre la superficie de un objeto (Costanzo, 2023).

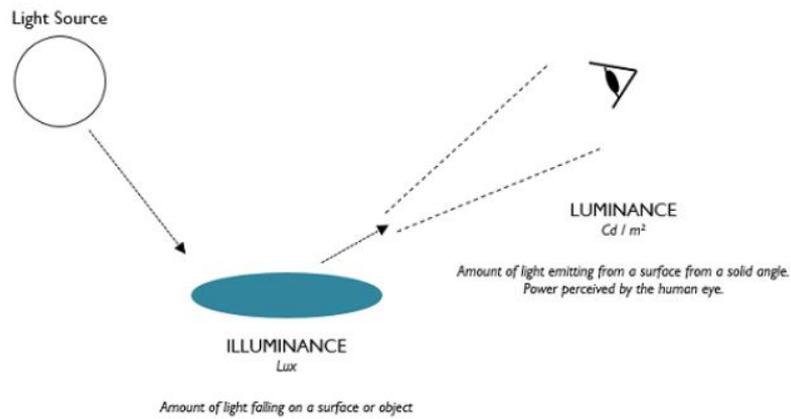


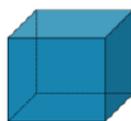
Figura 9. Gráfica que indica la diferencia entre luminancia e iluminancia (Ansys I. , 2022).

3.2.5 PROPIEDADES ÓPTICAS

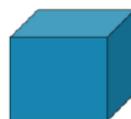
Esta propiedad permite determinar cómo será el comportamiento de los rayos de luz e interactuará con materiales aplicados a sus geometrías, que pueden tener propiedades de volumen y superficie óptica (Ansys I. , 2022).

Existen tres tipos de propiedades ópticas que se pueden aplicar a las geometrías (Ansys, 2020):

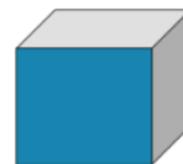
- Propiedades ópticas de volumen (VOP) que definen el comportamiento de los rayos de luz cuando son propagados dentro de un cuerpo.
- Propiedades ópticas superficiales (SOP) que definen el comportamiento de los rayos de luz cuando golpean la superficie de un cuerpo
- Propiedades ópticas de cara (FOP) son propiedades ópticas de superficie específicas que definen el comportamiento de los rayos de luz cuando golpean una o varias caras específicas de un cuerpo



VOP



SOP



FOP

Figura 10. Tipos de propiedades ópticas (Ansys I. , 2022)

3.2.6 FUENTES DE LUZ

Son el componente clave de una simulación óptica, el programa de Ansys “Speos” permite modelar las fuentes de luz y su respectiva interacción con un sistema óptico. Existen una amplia variedad de fuentes para cubrir distintas necesidades y configuraciones que pueden ser usadas para probar, ajustar o validar sistemas lumínicos o que pueden ser utilizados como herramienta para analizar los efectos inducidos de la luz (Ansys I. , 2022).

Speos maneja distintos tipos de fuentes de luz, para nuestro caso se usarán las siguientes como se muestra a continuación:

- Fuente de superficie: Permite modelar la emisión de luz de una fuente tomando en cuenta su flujo, espectro, salida e intensidad.
- Fuente interactiva: Permite unir geometrías para analizar la propagación de los rayos que son emanados a través de un sistema óptico, da la posibilidad de entender el comportamiento de un haz de luz en un sistema asignado. Crea rayos de luz específicos y monocromáticos

3.2.7 SENSORES

Son los elementos que interpretan los resultados ópticos de un sistema por medio de la integración de rayos provenientes de las fuentes.

Los sensores permiten integrar y analizar los rayos por medio de una amplia variedad de sensores disponibles por “SPEOS”, los cuales son usados para computar energía y analizar cómo una fuente las emite y cuál es su patrón de intensidad/emisión o para crear perspectivas y puntos de vista que visualizarán como el sistema es percibido por un observador (Ansys I. , 2022).

Los tipos de sensores que se tomarán de Speos para este caso son:

- Sensor de radiancia, permite computar la radiancia ($\text{watt}/\text{sr}/\text{m}^2$) o luminancia (cd/m^2).
- Sensor de irradiancia, permite computar la irradiancia (watt/m^2) o iluminancia (Lux).

- Sensor de intensidad, permite computar la intensidad radiante (watt/sr) o intensidad de luminancia (cd).
- Sensor de irradiancia 3D, permite computar la irradiancia de volúmenes de cuerpos o caras.

3.2.7.1 Parámetros y herramientas para un sensor de irradiancia

3.2.7.1.1 Ángulo de integración

Describe el parámetro del ángulo de integración para un mejor entendimiento y sus posibles impactos en los resultados de la simulación (Ansys I. , 2022).

3.2.7.1.2 Cono y ángulo de integración

Es una aproximación de la zona de integración representada por el cono de integración, esta aproximación es usada por el sensor para resolver la contribución especular de la escena.

El cono de integración es calculado por la integración de ángulo definido, que rota alrededor de un rayo; en una simulación directa los rayos provienen de la fuente y son propagados de acuerdo a las leyes físicas.

Gracias a la aproximación, los rayos son integrados si la deflexión angular entre su dirección de propagación y la dirección integrada del sensor es menor que el ángulo de integración (Costanzo, 2023).

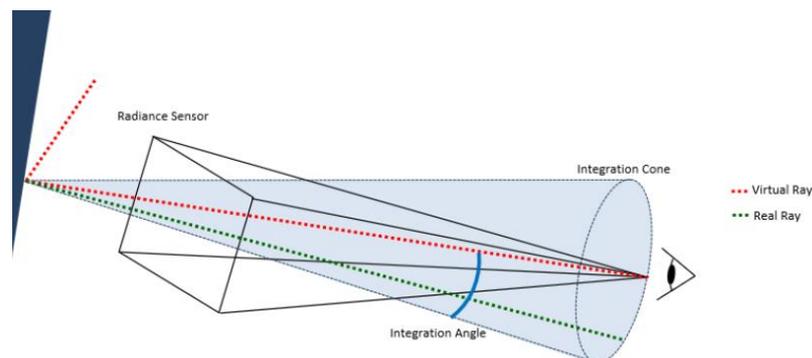


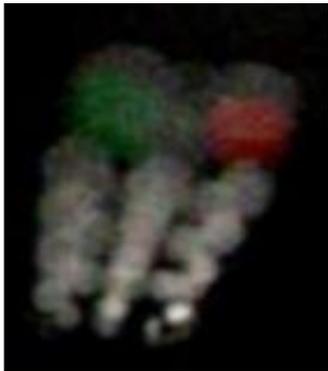
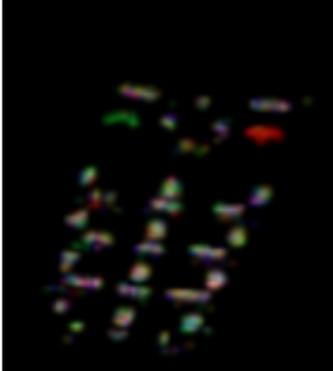
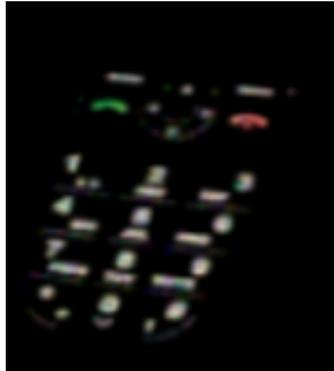
Figura 11. Representación de cómo calcular el cono de integración (Ansys I. , 2022).

- Rayo virtual: La dirección de integración de un píxel para alcanzar el punto focal del sensor.
- Rayo real: El rayo computado por la simulación.

3.2.7.1.3 Efecto del ángulo de integración sobre los resultados

En la tabla 4 se proveen 3 ejemplos que ilustran el efecto del ángulo de integración sobre un mapa de radiancia a través de una ventana donde cada resultado obtenido fue realizado con el mismo número de rayos lanzados dentro de la simulación.

Tabla 4. Efectos del ángulo de integración (Ansys, 2020).

| BORROSO | RUIDOSO | CORRECTO |
|--|---|---|
|  |  |  |
| <p>Un resultado borroso significa un ángulo de integración bastante grande. Demasiados rayos son integrados por el sensor.</p> | <p>Un resultado ruidoso significa un ángulo de integración bastante pequeño. No suficientes rayos son integrados por el sensor.</p> | <p>Un resultado balanceado es obtenido cuando el ángulo de integración está correctamente ajustado a la escena.</p> |

3.2.7.1.4 Tipos de integración

En Speos el tipo de integración permite definir cómo la luz será integrada al sensor.

Iluminancia Planar

La iluminancia en un punto es calculada por el coseno del ángulo de incidencia ε , su relación es (Ansys I. , 2022):

$$E = \frac{I_t \cos \varepsilon}{D^2} \quad (3.22)$$

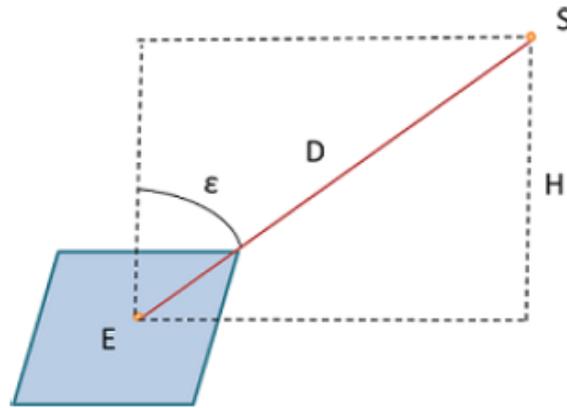


Figura 12. Modo planar con una dirección de integración normal a el sensor (Ansys I. , 2022).

Iluminancia radial

Este cálculo es basado en la norma EN-13201, que da equivalentes matemáticos a los diferentes tipos de iluminancia, con varios parámetros simplificados.

La dirección de integración es el flujo incidente, donde la dirección se encuentra sobre el plano vertical en el ángulo derecho a la superficie y el ángulo de incidencia ϵ es igual a 0° o $\epsilon = 1$. Su relación matemática es:

$$E_{Radial} = \frac{I_t}{r^2} \quad (3.23)$$

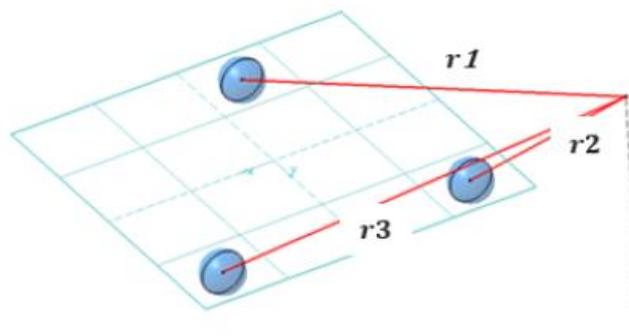


Figura 13. Gráfica de la iluminancia radial (Ansys I. , 2022).

Iluminancia hemisférica

La iluminancia hemisférica es una sumatoria entre las iluminancias radial y horizontal:

- La dirección de integración es perpendicular al plano del sensor.
- La dirección de integración es la misma que la iluminancia horizontal (perpendicular al plano horizontal).

$$E_{Hemisférica} = \frac{I_t(1 + \cos\varepsilon)}{4D^2} \quad (3.24)$$

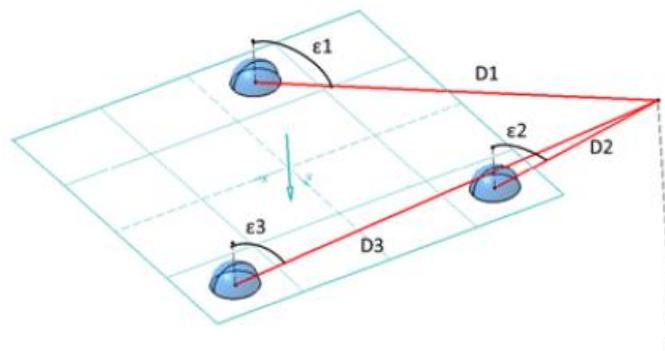


Figura 14. Gráfica de iluminancia Hemisférica (Ansys I., 2022).

Iluminancia cilíndrica

Este tipo de integración se puede definir por un caso específico de iluminancia vertical cuando $\alpha = 0^\circ$, esto debido a la simetría rotacional alrededor del eje Z, siendo el ángulo ε el único importante. Para este caso no es necesario una dirección de integración específica.

$$E_{Cilíndrica} = \frac{I_t \sin\varepsilon}{\pi D^2} \quad (3.25)$$

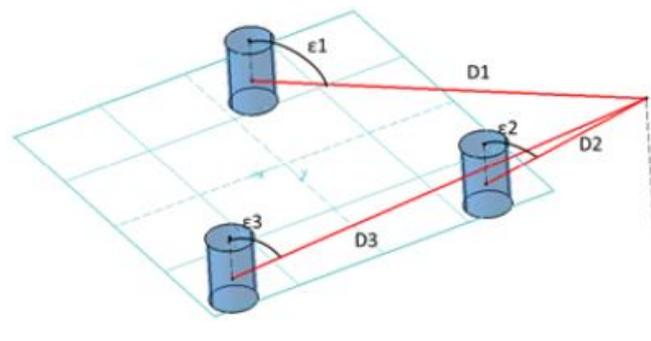


Figura 15. Gráfica de la iluminancia Cilíndrica (Ansys I., 2022).

Iluminancia semicilíndrica

Contrario a la iluminancia cilíndrica, se necesita la dirección de integración de este caso para calcular la iluminancia semicilíndrica, que depende de una desviación lateral.

$$E_{Semicilíndrica} = \frac{I_t \text{sen}\epsilon(1 + \cos\alpha)}{\pi D^2} \quad (3.26)$$

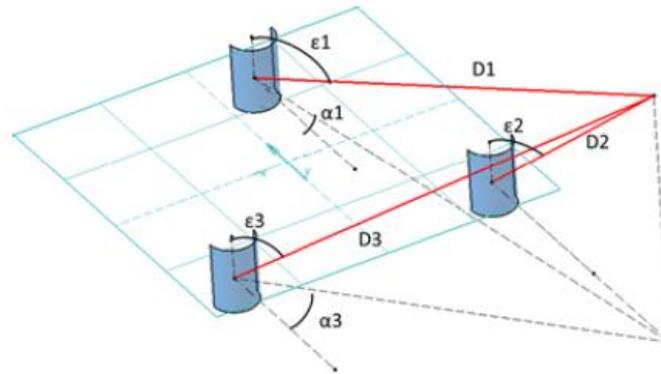


Figura 16. Gráfica de la iluminancia Semicilíndrica (Ansys I. , 2022).

3.2.7.2 Parámetros de un sensor de intensidad

3.2.7.2.1 Campo cercano

Es una opción que permite modelar una célula real en un banco de intensidad; la celda sensor se acerca a la fuente, por lo que obtiene un campo de medida del sensor próximo a la fuente (Ansys I. , 2022).

El sensor de campo cercado es útil cuando se comparan intensidades simuladas y medir la intensidad en pequeños dispositivos. En la práctica la celda sensor es un disco del cual se puede determinar su diámetro en las configuraciones, el diámetro corresponde al tamaño del sensor foto sensitivo que se usa para optimizar la medida real (Ansys, 2020).

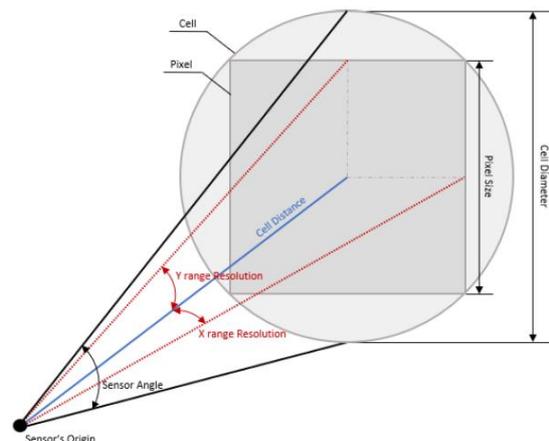
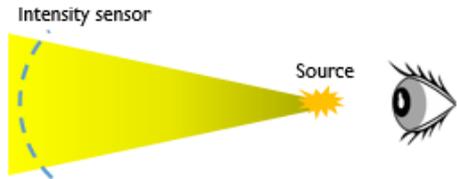
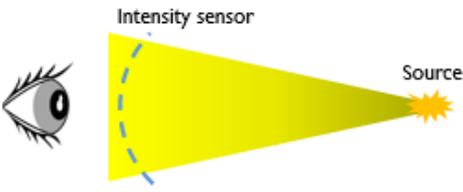


Figura 17. Representación de la celda (Ansys I. , 2022).

3.2.7.2.2 Intensidad resultante de la dirección de visualización

Define la dirección de visualización del observador como se explica en la tabla 5, las dos perspectivas de visualización (Ansys, 2020).

Tabla 5. Perspectivas de visualización (Ansys I. , 2022).

| | |
|--|--|
| <p>Desde la fuente mirando al sensor</p> <p>La dirección de visualización del observador es la misma que la dirección emitida por la luz.</p> |  |
| <p>Desde el sensor mirando a la fuente</p> <p>La dirección de visualización del observador es la opuesta a la dirección emitida por la luz.</p> |  |

3.2.8 SIMULACIONES

Son la parte que permite materializar y probar un sistema óptico por medio de la propagación de rayos de luz entre los componentes clave, como son los materiales, fuentes y sensores, en simulaciones ópticas.

Existen cuatro tipos de simulaciones que Speos tiene disponibles para cubrir distintas necesidades y visualizar el comportamiento de la luz en diferentes situaciones, pero para este caso en especial se usarán dos que son las simulaciones directa e interactiva (Ansys I. , 2022).

3.2.8.1 Simulación interactiva

Permite visualizar en el CAD el comportamiento de los rayos de luz en un sistema óptico y puede ser de mucha ayuda para un rápido entendimiento de cómo una modificación podría impactar en el comportamiento óptico.

3.2.8.2 Simulación directa

Permite propagar una gran cantidad de rayos desde las fuentes hacia los sensores a través del sistema óptico.

4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

4.1 PRUEBAS FÍSICAS DEL ASPERSOR

Para las pruebas físicas se implementó 10ml de colorante rojo comestible mezclado con 2000ml agua con una mezcla de 1-200, 1 parte de colorante por 200 de agua, que se verterá en el sistema hidráulico de aspersión del robot, para dispersarse sobre una superficie de cartulina de papel blanca de 1000mmX700mm.



Figura 18. Imagen real del robot desinfectador (Investigación, 2021).

Los cuadros de las superficies tienen una dimensión de 50mmx50mm en sus partes más detalladas donde el fluido entró en contacto con el papel blanco, se realizó en paralelo dos pruebas, una con los aspersores delanteros en conjunto y la otra con uno de los aspersores laterales el cual se analizó en solitario.

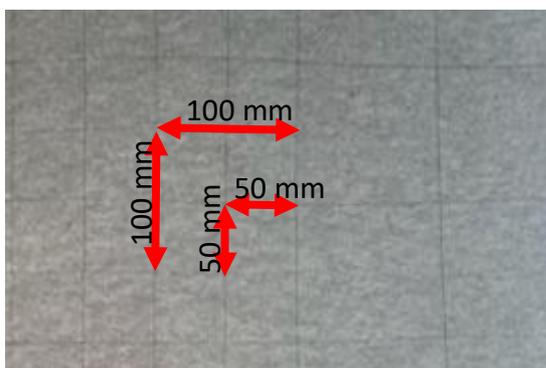


Figura 19. Dimensiones de la cuadrícula.

4.1.1 ANÁLISIS A 0°

A este ángulo se aprecia que tiene un alcance 900mm de largo desde su punto de origen y 500mm de ancho en conjunto mientras que el fluido alcanzado de un solo aspersor es de 750mm de largo desde el origen y de 200mm de ancho.

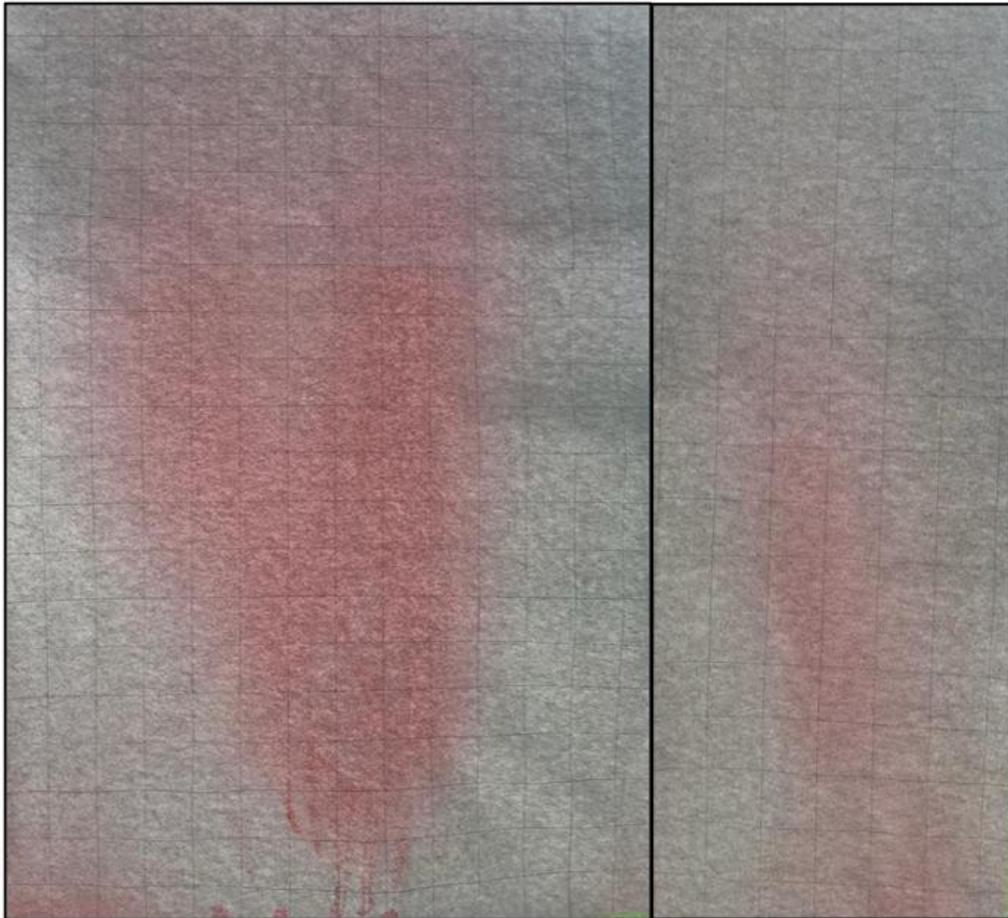


Figura 20. Aspersión resultante a 0°.

4.1.1 ANÁLISIS A +15°

Con un cambio de 15° hacia arriba de los aspersores, se nota una reducción en el alcance de los aspersores, en el cual su alcance se ve reducido a 650mm a 100mm del origen y un ancho alcanzado de 300mm en conjunto.

En el análisis de un solo aspersor cuenta con un alcance de 400mm a 100mm más allá de su origen y un ancho de 150mm.



Figura 21. Aspersión resultante a $+15^\circ$.

4.1.2 ANÁLISIS A -15°

Al ajustar los aspersores a -15° los resultados determinaron una considerable reducción en cuanto a las otras posiciones, en conjunto se observa que se da un alcance de 300mm a 50mm de su origen y un ancho en conjunto de 400mm.

El análisis en solitario de un solo aspersor obtuvo un resultado de 250mm de largo a 100mm de su origen y un ancho de 150mm.



Figura 22. Aspersión resultante a -15° .

4.2 SIMULACIÓN DE LA ATOMIZACIÓN

Para esta parte de la simulación de fluidos, con las pruebas físicas realizadas a los aspersores se planea realizar una simulación DPM que es un modelo de fase discreta que permite visualizar el comportamiento de partículas sobre un dominio establecido. Inicialmente se deberá obtener los datos de la bomba del robot mostrados en la tabla a continuación.

Tabla 6. Datos técnicos de la bomba del robot desinfectador.

| Datos Técnicos | |
|--------------------------|---------|
| Presión de trabajo (MPa) | 0.6-0.8 |
| Caudal (kg/s) | 0.02 |

4.2.1 CONSTRUCCIÓN DE LA MALLA

Para este análisis se diseñó un rectángulo que tendrá 450mmx175mm, se empleará una malla estructurada, debido a que entrega una mayor precisión numérica.

La malla fue refinada en los alrededores de la punta de la boquilla del spray a lo largo del eje central donde se observa una mejor definición de la esquina inferior izquierda.

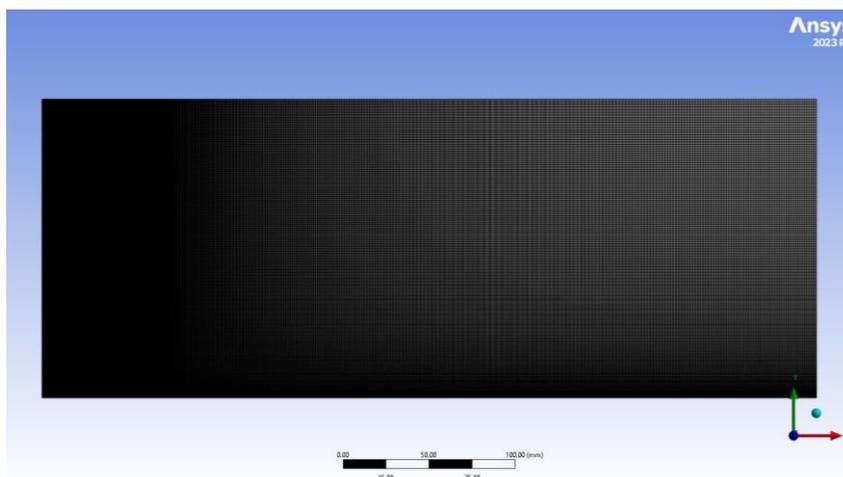


Figura 23. Vista de la malla generada.

Se asignaron las condiciones de frontera adecuadas para la simulación de spray. Se consideró una entrada (Inlet) junto con una salida (Outlet). Al considerar un flujo asimétrico, el borde inferior se le asigna la condición de eje (Axis) para esta condición en particular, al no tener una asignación el borde faltante Fluent automáticamente lo toma como una pared (Wall).

4.2.2 CONFIGURACIÓN DE LAS SIMULACIONES

Para este análisis se aplicó dos configuraciones en el modelo de fase discreta (DPM). La primera será con la interacción con una fase continua deshabilitada, el cual será para observar el comportamiento ideal que obtendrá el spray sin mezclarse con otro fluido en el camino; se configurará un segundo análisis donde se habilitará dicha interacción para un análisis real debido que el spray de agua saldrá del atomizador y chocará de lleno con una fase continua que en este caso es aire.

En la sección de modelos, en el modelo viscoso se seleccionó uno de los modelos basados en las ecuaciones Navier-Stokes que son promediados por Reynolds.

Se aplicó el modelo k- ϵ estándar debido a que es un modelo estable y de fácil convergencia e implementación, tiene una buena precisión en flujos libres, el consumo computacional que genera es bajo y es completamente válido en flujos turbulentos; además se configuró que entregue un tratamiento cercano a las paredes de las funciones de pared estándar.

El modelo físico de ruptura (Breakup) mantuvo el tratamiento de partículas secundarias (child particle treatment) donde consideró estas partículas a más del spray principal.

En los modelos físicos, en parámetros de agarre la opción de arrastre dinámico y de ruptura se seleccionó el modelo de Kelvin-Helmholtz Rayleigh-Taylor (KHRT) el cual es adecuado para números Weber altos.

Para la dispersión turbulenta, se habilita el modelo de paseo aleatorio discreto y el modelo de partícula inerte para atomización de agua.

El tipo de inyección se seleccionó “Atomizador de orificio plano” que es el modelo propuesto en la sección 3.1.4.1

La presión de vapor este dato se lo considera a una temperatura de 20°C que es 2.3303KPa, véase el anexo 1.

Las condiciones de zona celular se mantuvo aire, que a pesar de que no se suministra ningún fluido desde la entrada de la condición frontera este material actuará de fase continua con la que tendrá interacción.

Las condiciones de frontera tuvieron una presión manométrica de 0Pa y un diámetro hidráulico de 350mm, junto con opción DPM del tipo escape.

El paso de tiempo del fluido tenía un tamaño de 0.5ms, con un parámetro de rastreo de 50000 pasos y una longitud de paso de 5.

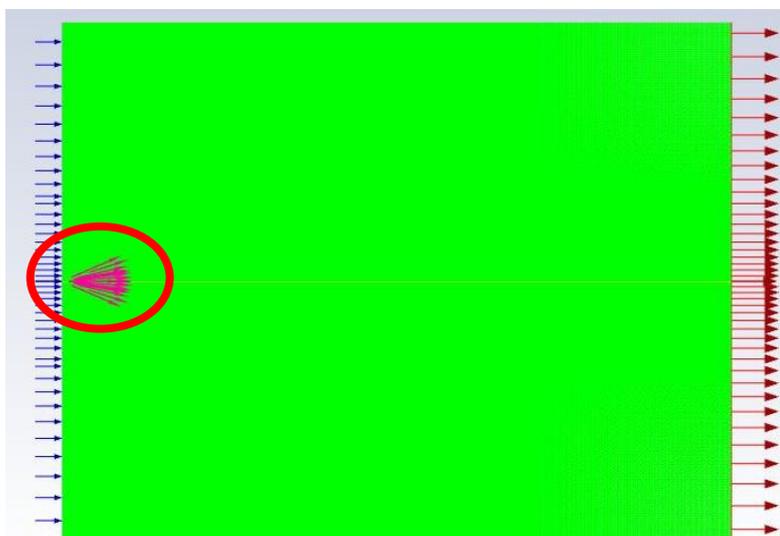


Figura 24. Visualización previa de la dirección que tomará la aspersion.

4.3 SIMULACIÓN DE LUZ

Se definió la fuente de luz, en este caso serían dos fuentes que emanan haces de luz desde las superficies escogidas.

A las lámparas se les aplicó la propiedad de volumen ópticos debido a que serán las fuentes emisoras de luz y absorberán la luz externa a ellos. Para el resto de geometrías se aplica la segunda propiedad que es volúmenes opacos, los cuales reflejarán la luz emitida por las fuentes.

Para el análisis se configuró una irradiancia de 55 Watts que son los que generan las lámparas.

Para el espectro de luz visible, Ansys cuenta con un rango de visión de 360nm-750nm de longitud de onda. La especificación técnica de las lámparas de la luz UV-C es de 254nm; se estableció un espectro de ondas de la luz UV-A de 360nm que es la medida de visión mínima con la que cuenta el software, para así poder observar el comportamiento que tendrá el sistema óptico.

La simulación contó con 1×10^6 rayos, que brindaron una visión más precisa de la distribución de la luz desde las lámparas.

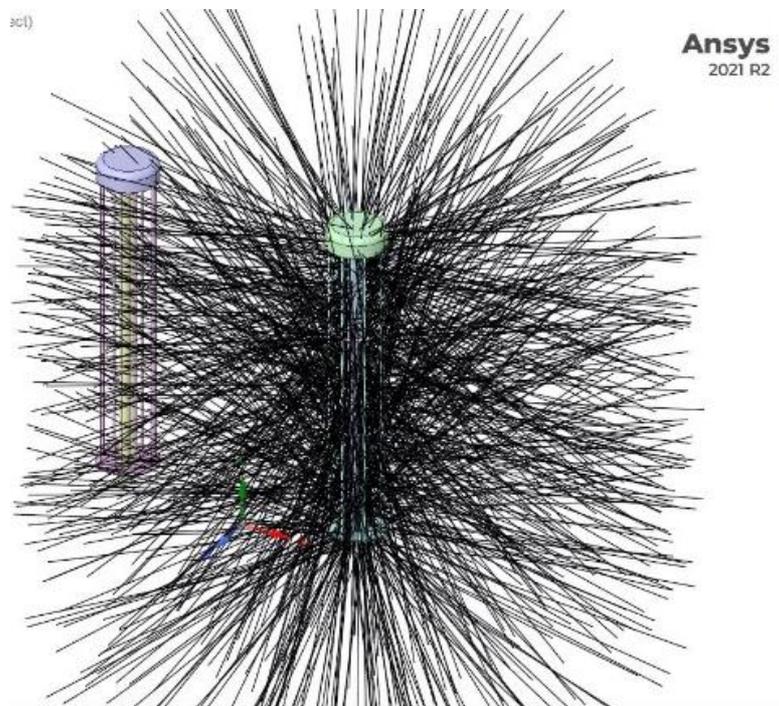


Figura 25. Configuración de la fuente de luz.

Se configuró los sensores necesarios para las simulaciones. En este caso se insertarán todos los sensores que captan irradiancia emanada desde una superficie.

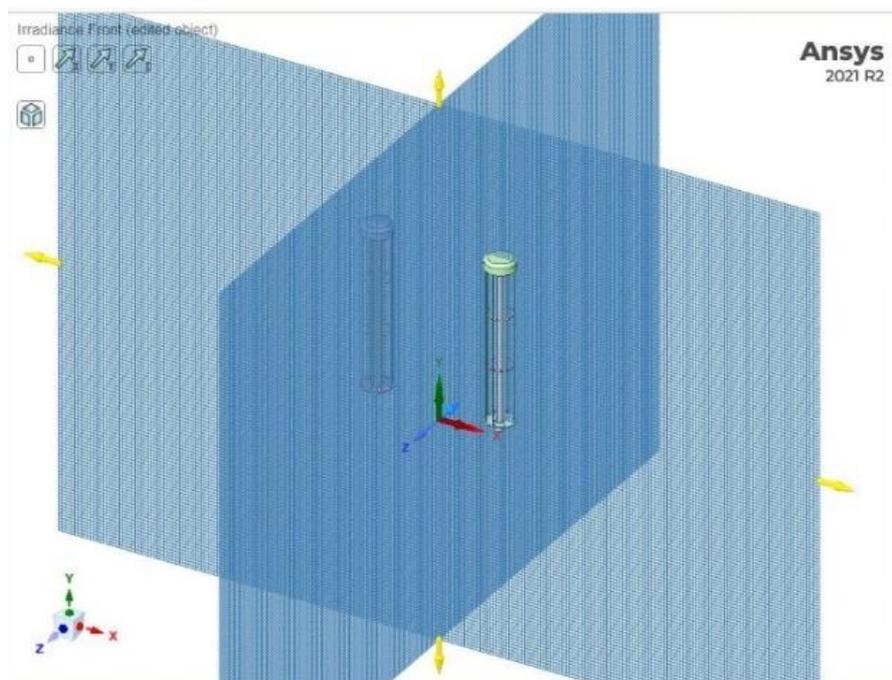


Figura 26. Configuración de los sensores de irradiancia.

Para la simulación de intensidad se aplicó un sensor que midiera esto con un ángulo de 180° a lo largo y ancho de la fuente de luz que forma una semiesfera para observar el comportamiento y distribución de los haces de luz hacia el exterior.

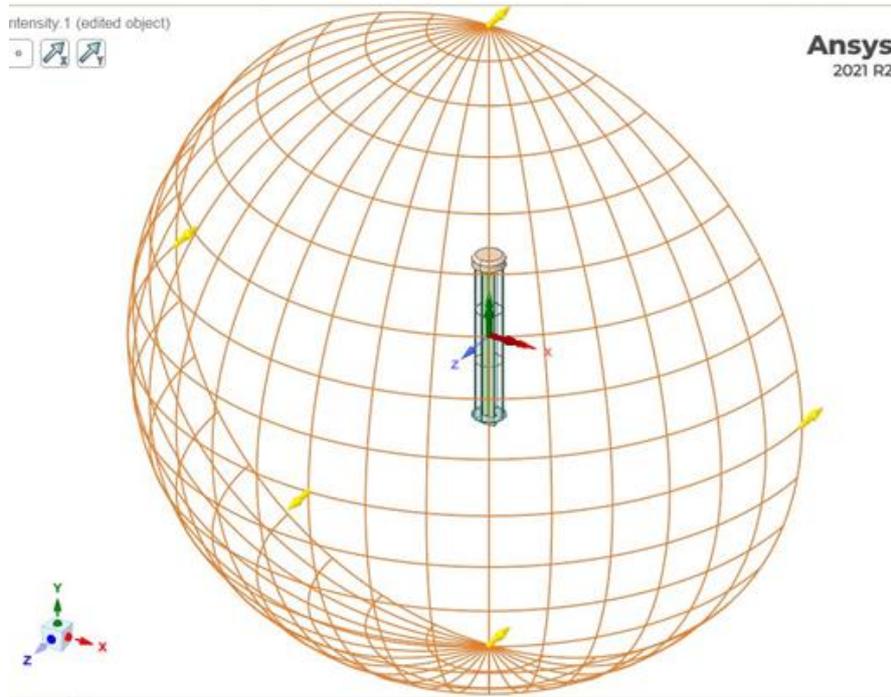


Figura 27. Configuración del sensor de intensidad.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS FÍSICAS

En este análisis con las cartulinas impregnadas por el colorante con agua se obtuvieron medidas de los alcances de los aspersores a 3 diferentes grados de posición de los aspersores al analizarse en conjunto y en solitario.

5.1.1 RESULTADO SOBRE EL LARGO DEL ALCANCE DE LOS ASPERSORES

Al observarse los datos y los gráficos obtenidos de las pruebas realizadas a 3 diferentes posiciones de los aspersores analizados en conjunto y en solitario se puede apreciar que al mantener los aspersores a 0° obtendrán una mejor distribución del fluido sobre una superficie tanto en largo como en ancho con una eficiencia del 24.24% con respecto a la posición de $+15^\circ$ y de 57.57% con respecto a la posición de -15° en conjunto y de análisis unitario.

Tabla 7. Alcance de los aspersores.

| Largo del Alcance de los aspersores | | | |
|-------------------------------------|-------------|-----------|------------|
| Ángulos | -15° | 0° | 15° |
| Conjunto | 350mm | 900mm | 750mm |
| Solo | 350mm | 750mm | 500mm |

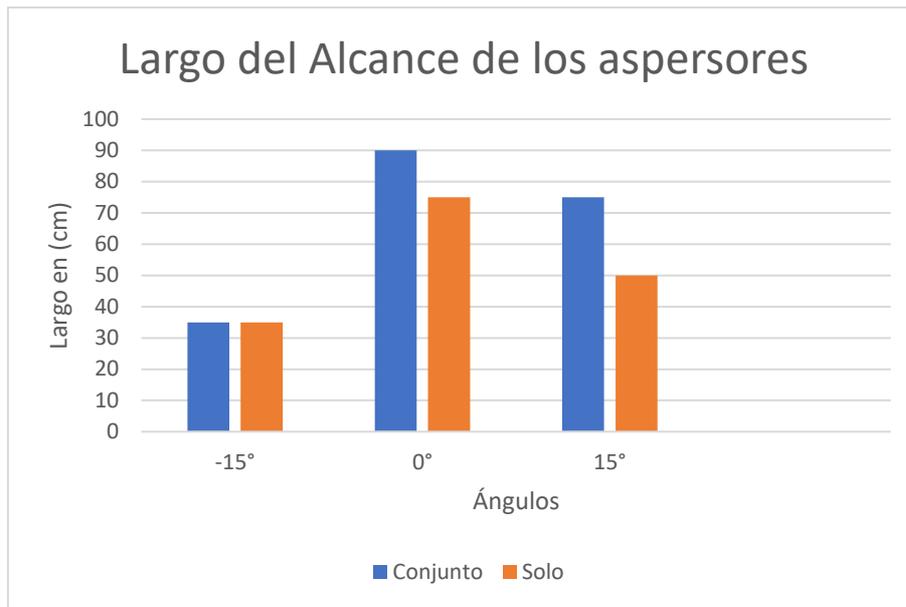


Figura 28. Diagrama de barras del alcance los aspersores.

5.1.2 RESULTADO SOBRE EL ANCHO DEL ALCANCE DE LOS ASPERSORES

En las pruebas de su anchura con los datos y gráficos obtenidos en 3 posiciones de los aspersores analizados en conjunto y en solitario se puede apreciar que al mantener los aspersores a 0° obtendrán una mejor distribución del fluido sobre una superficie tanto en largo como en ancho con una eficiencia del 35.71% con respecto a la posición de +15° y de 21.42% con respecto a la posición de -15° en conjunto y de forma unitaria.

Tabla 8. Ancho del largo de alcance de los aspersores.

| Ancho del Alcance de los aspersores | | | |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|
| Ángulos | -15° | 0° | 15° |
| Conjunto | 400mm | 500mm | 300mm |
| Solo | 150mm | 200mm | 150mm |

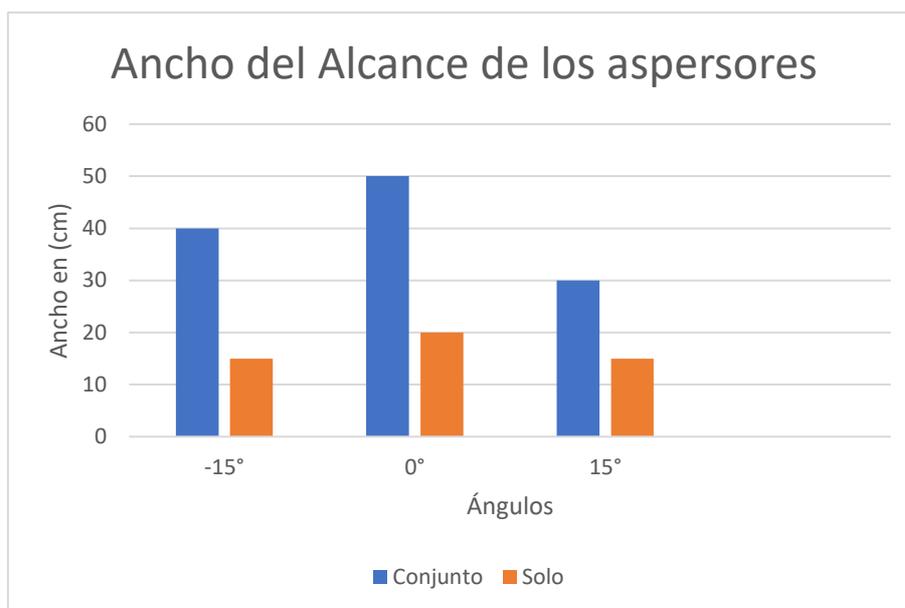


Figura 29. Diagrama de barras del ancho que alcanzaron los aspersores.

5.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE FLUIDO

5.2.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS IDEAL

Con la simulación de los fluidos ideal realizada, se obtuvo el resultado que aprecia en la figura 30, donde el fluido ha tomado una forma completamente cónica al dispersarse sobre un dominio a través de un determinado tiempo.

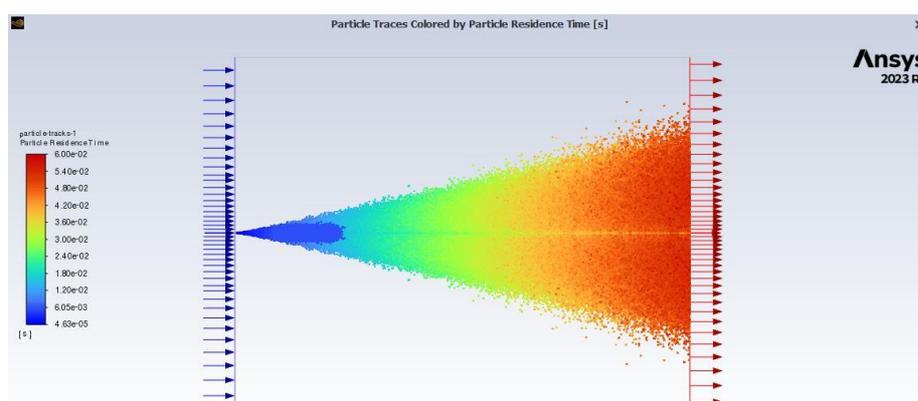


Figura 30. Resultado de la simulación de partículas ideal.

Con el resultado de la simulación es necesario abrir el resumen de la inyección, donde se almacenan todos los datos que fueron recopilados durante la simulación, como se aprecia en la figura 31.

```

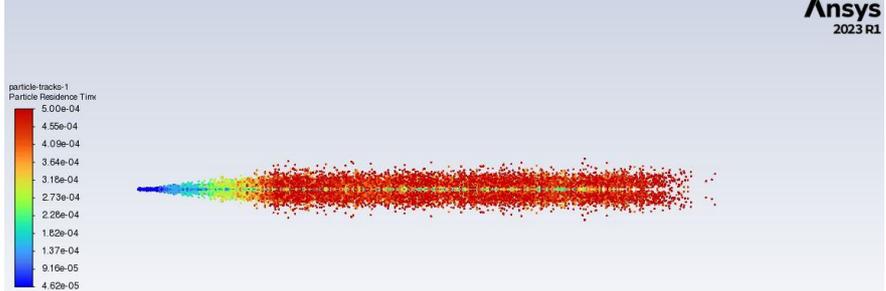
Console

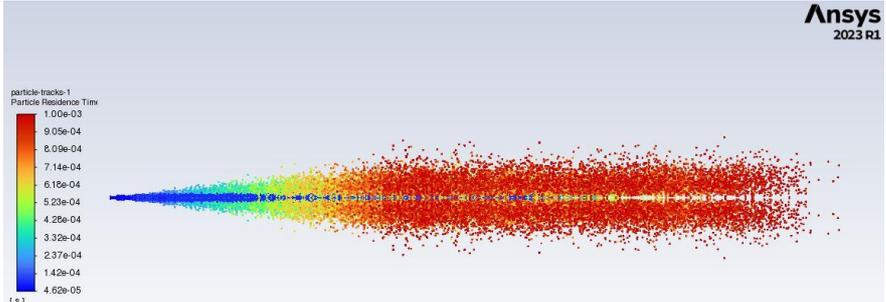
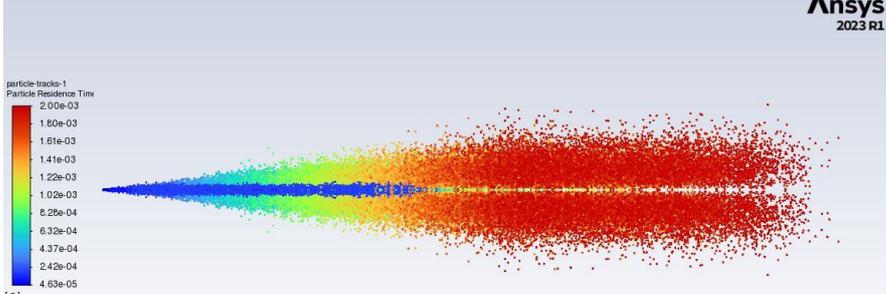
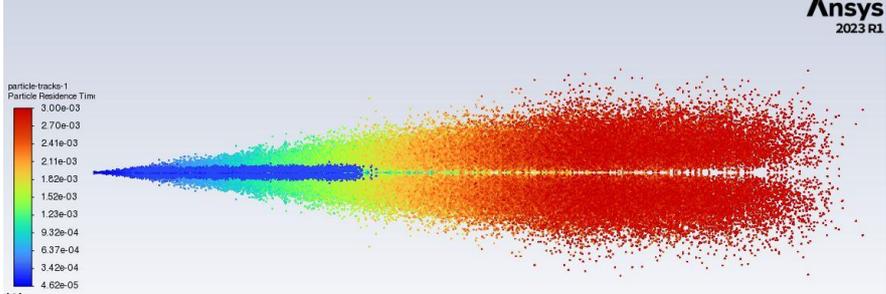
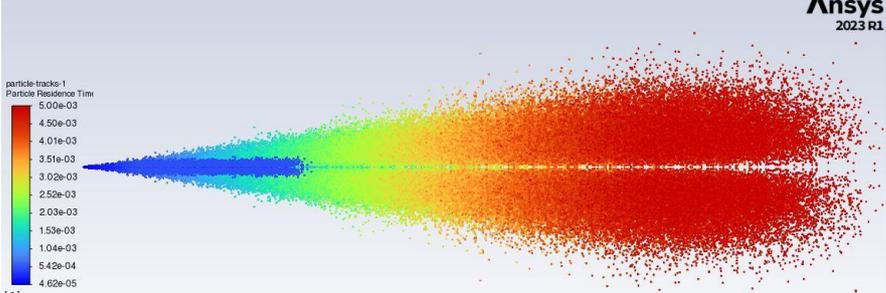
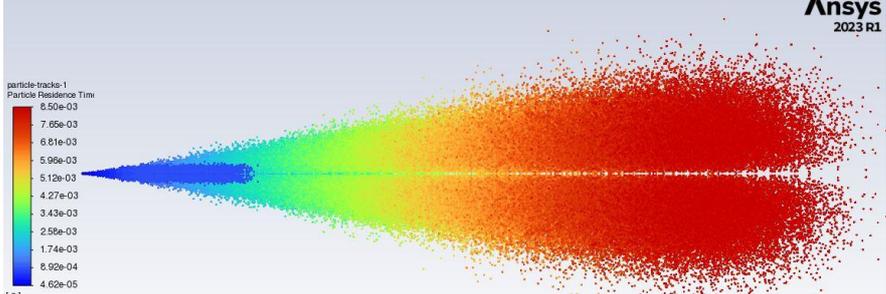
(*)- Summary for Injection:
(*)- injection-water
(*)
Total number of parcels           : 1150541
Total number of particles         : 2.729905e+12
Total mass                       : 9.240789e-04 (kg)
Overall RR Spread Parameter      : 7.387510e+00
Maximum Error in RR fit         : 2.498894e-01
Overall RR diameter (D_RR)      : 8.546113e-07 (m)
Maximum RMS distance from injector : 4.666319e-01 (m)
Maximum particle diameter       : 2.302759e-06 (m)
Minimum particle diameter       : 8.478840e-07 (m)
Overall mean diameter (D_10)    : 8.647535e-07 (m)
Overall mean surface area (D_20): 8.649473e-07 (m)
Overall mean volume (D_30)     : 8.651972e-07 (m)
Overall surface diameter (D_21): 8.651410e-07 (m)
Overall volume diameter (D_31) : 8.654191e-07 (m)
Overall Sauter diameter (D_32) : 8.656972e-07 (m)
Overall De Brouckere diameter (D_43): 8.665562e-07 (m)
    
```

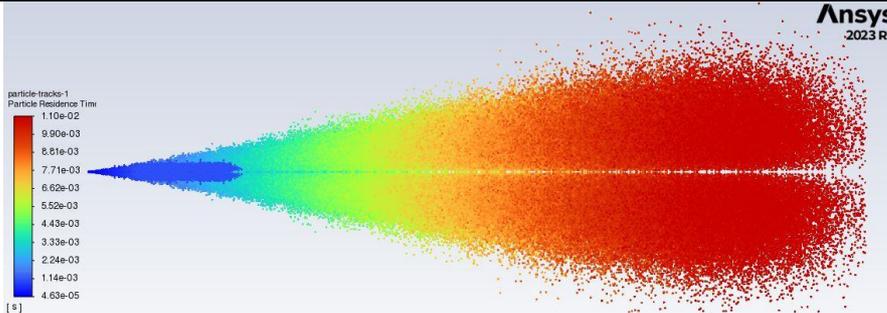
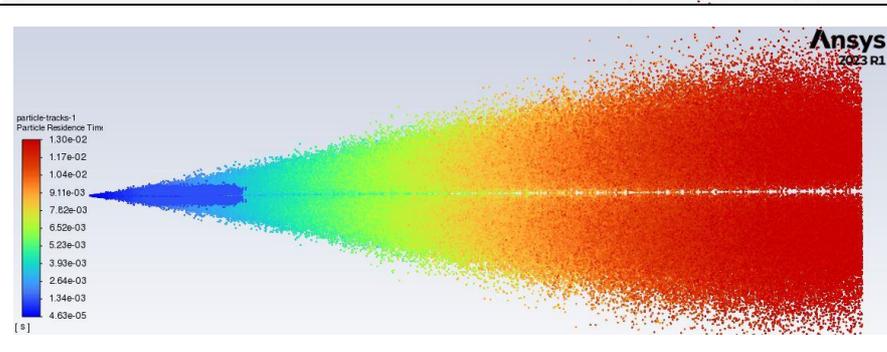
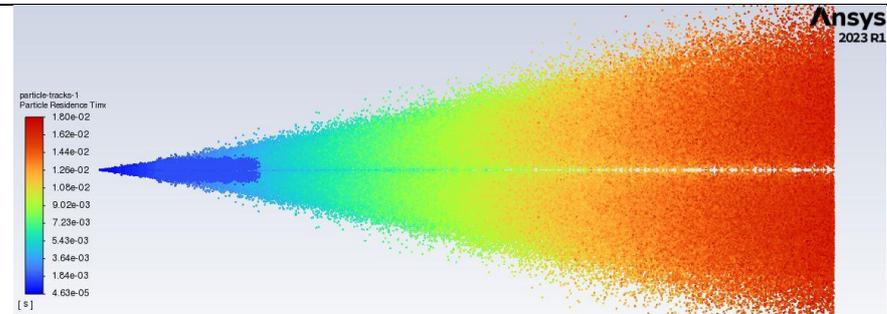
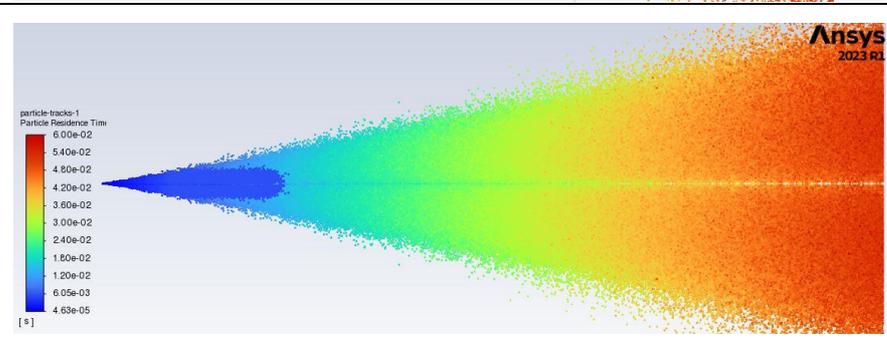
Figura 31. Resumen de la inyección ideal.

5.2.1.1 Desarrollo Ideal del Spray Durante el Tiempo

Tabla 9. Niveles del desarrollo de la atomización ideal.

| Nivel | Ilustración | Descripción |
|-------|--|--|
| 1 |  | Después de iniciar a los 0.5ms el chorro se mantiene fraccionado con una distancia de 150mm. |

| | | |
|---|--|---|
| 2 |  | <p>Llegado a 1ms la parte exterior del chorro empiezan a fraccionarse las partículas secundarias y alcanza un valor de 225mm.</p> |
| 3 |  | <p>A los 2ms las partículas, el chorro continúan fraccionándose sin aumentar su distancia de manera significativa, pero empieza a ensancharse su spray.</p> |
| 4 |  | <p>A los 3ms sigue el mismo comportamiento de aumento del largo y ancho del spray.</p> |
| 5 |  | <p>Pasado 5ms del arranque de la simulación, el spray ha alcanzado los 350mm de longitud y un ancho de 120mm</p> |
| 6 |  | <p>A los 8.5ms las partículas han alcanzado el límite derecho del dominio de la malla con sus partículas secundarias.</p> |

| | | |
|----|--|---|
| 7 |  | <p>Alcanzados los 11ms el chorro principal llegó a los 450mm de longitud del dominio, mientras que su ancho de spray ha llegado a alcanzar los 200mm de ancho.</p> |
| 8 |  | <p>Con 13ms de tiempo transcurrido el spray ha alcanzado la distancia de 450mm de longitud, que es la longitud total del dominio previamente programando en la malla</p> |
| 9 |  | <p>A los 18ms de tiempo a la longitud las partículas secundarias se reducen y se empieza a notar el spray principal.</p> |
| 10 |  | <p>A los 60ms el spray se ha estabilizado y sus partículas ya no se expanden en ancho hasta un máximo de 260mm, y sus partículas secundarias están cercanas al spray principal.</p> |

Con los 10 niveles de desarrollo del atomizador, una vez analizados sus parámetros de tiempo, alcance y ancho, se extraen esos datos y se los agrupa en una sola tabla como se muestra a continuación.

Tabla 10. Datos de tiempo alcance y ensanchamiento de la tabla 9.

| Nivel | Tiempo (ms) | Alcance (mm) | Ancho (mm) |
|-------|-------------|--------------|------------|
| 1 | 0.5 | 150 | 35 |
| 2 | 1 | 225 | 50 |
| 3 | 2 | 240 | 65 |
| 4 | 3 | 280 | 80 |

| | | | |
|----|-----|-----|-----|
| 5 | 5 | 350 | 120 |
| 6 | 8.5 | 400 | 160 |
| 7 | 11 | 430 | 190 |
| 8 | 13 | 450 | 220 |
| 9 | 18 | 450 | 260 |
| 10 | 60 | 450 | 260 |

Con los datos de la tabla 10, para el análisis del alcance se aprecia que la ecuación polinómica de segundo nivel que rige esta dispersión, ya que cuenta con un 90.48% del valor de exactitud.

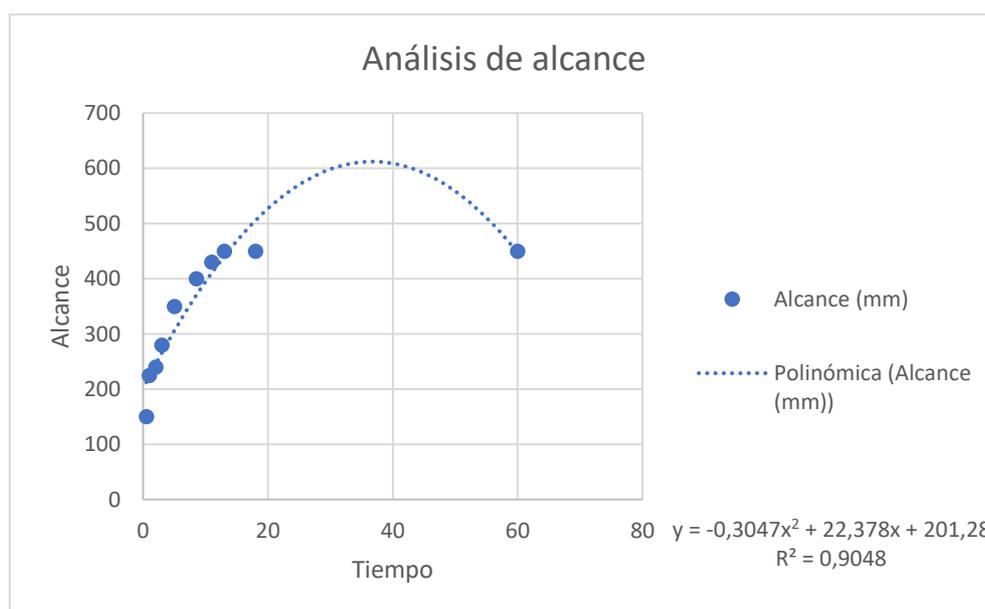


Figura 32. Gráfica del análisis del alcance ideal.

Con los datos de la tabla anteriormente presentada, en el caso del análisis del ensanchamiento del spray, este presenta una ecuación de grado 2 para su dispersión, que cuenta con un 99.75% de exactitud.

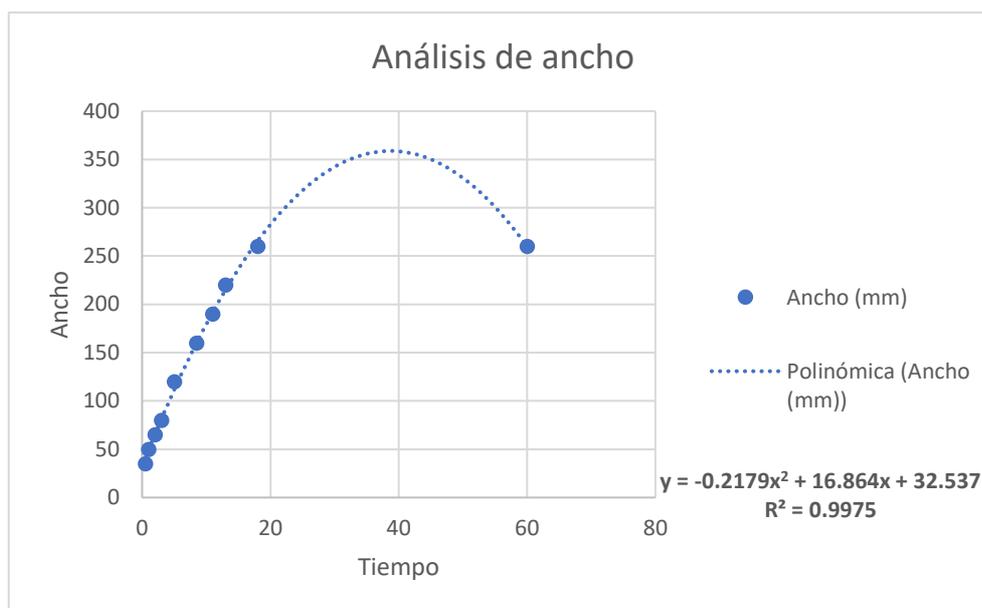


Figura 33. Gráfica del análisis del ancho ideal.

5.2.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS REAL

Con la simulación de los fluidos real realizada, se obtuvo el resultado que se aprecia en la figura 34, donde el fluido tomó una forma de gota con tendencia a volverse cónica al dispersarse sobre un dominio a través de un determinado tiempo.

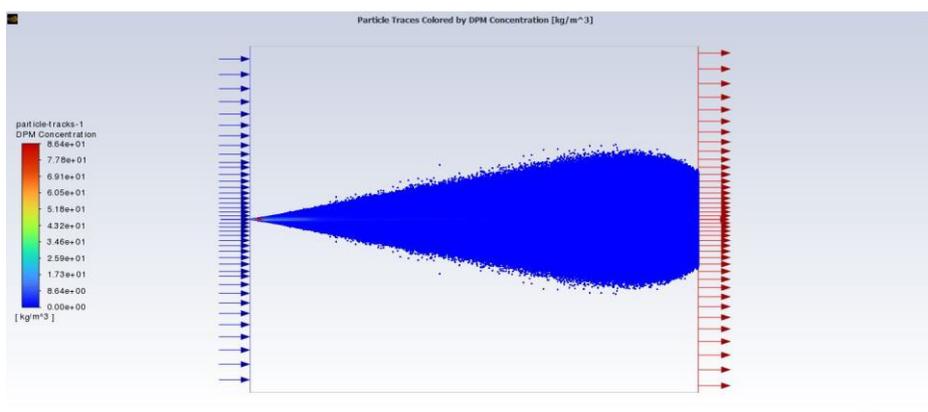


Figura 34. Resultado de la simulación de partículas real.

Con el resultado de la simulación se abrió el resumen de la inyección, donde se almacenan los datos recopilados durante la simulación, como se aprecia en la figura 35.

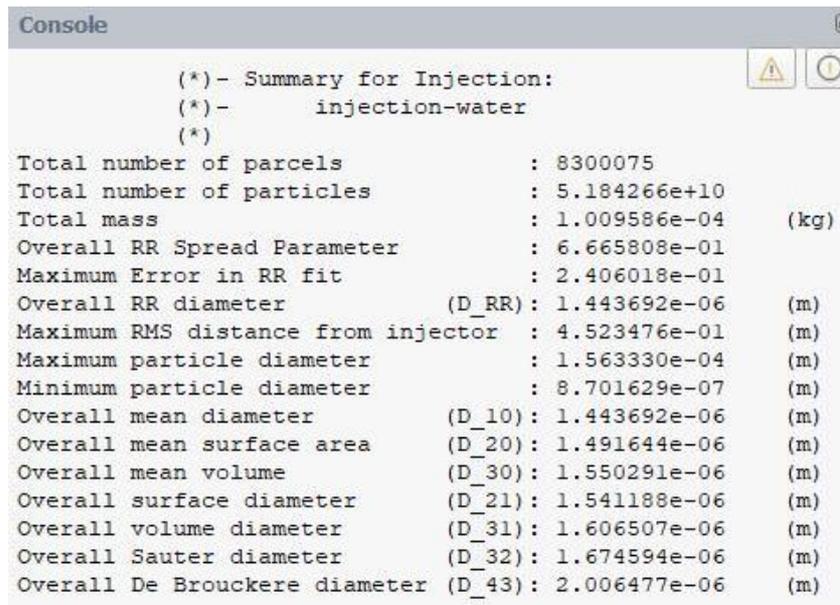


Figura 35. Resumen de la inyección real.

5.2.2.1 Análisis de Gráficas de Contorno

En las siguientes imágenes se tiene dos gráficas diferentes que son el resultado de la simulación DPM realizada. Se desarrolló un análisis real, donde la atomización de agua interactúa con una fase continua.

Se aprecian las figuras 36 y 37 que representan los contornos de velocidad y presión estática respectivamente, se aprecia que el fluido de agua tiene una mínima interacción, donde la velocidad tiene una interacción un poco mayor, mientras que el gráfico de presión es apenas imperceptible debido a la muy baja presión que se genera por la fragmentación de las partículas de agua.

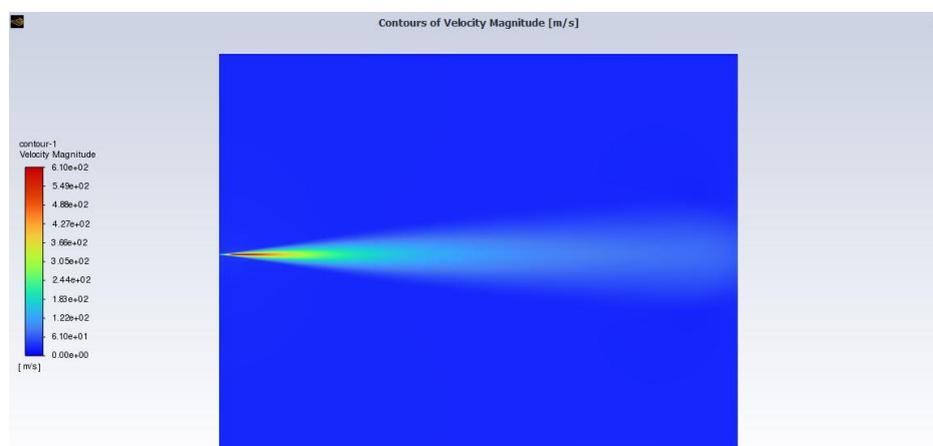


Figura 36. Gráfica del contorno de la magnitud de velocidad.

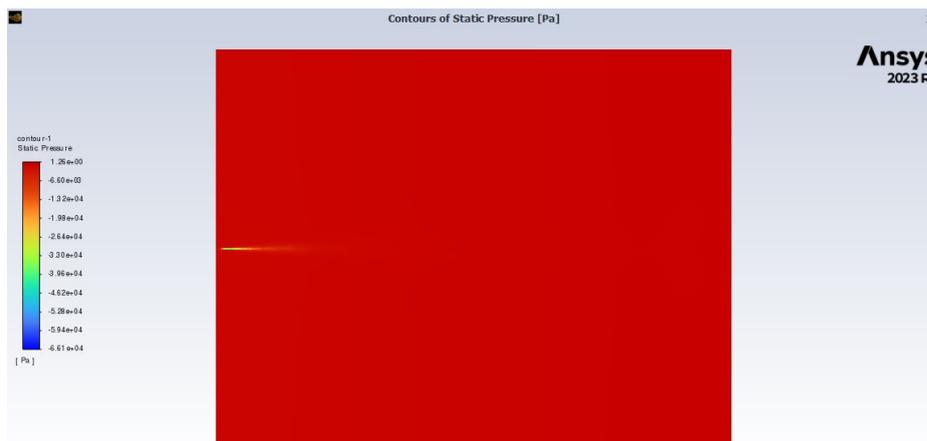


Figura 37. Gráfica del contorno de la presión estática.

5.2.2.2 Comparación de Gráficas de Rastreo de Partículas

Como se mencionó en la sección anterior, con una gráfica de contornos es muy difícil observar el comportamiento de la concentración DPM, debido a que estas partículas al fragmentarse la gráfica de contornos no las toma tan en cuenta, solo reflejando las concentraciones con mayor nivel como se puede observar en la figura 38.

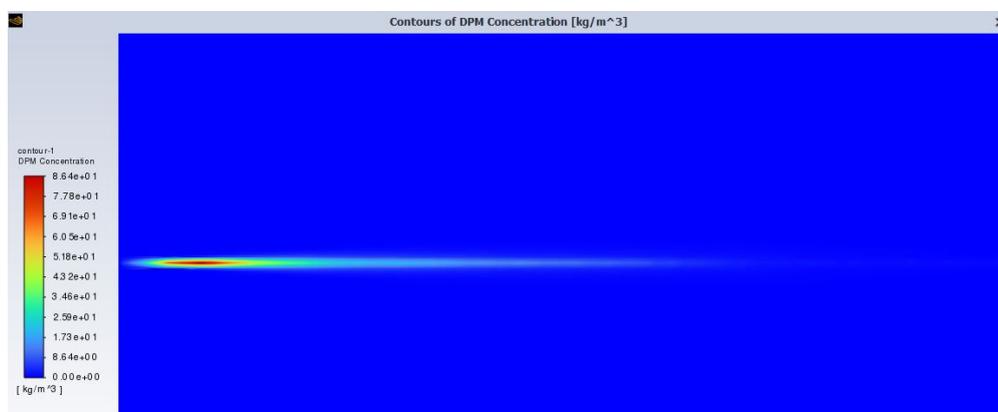


Figura 38. Gráfica de la concentración DPM en un contorno.

Al aplicar una gráfica de rastreo de partículas, esta permite observar cómo las partículas de agua se distribuyen e interaccionan con la fase continua, en este caso aire como se explicó con anterioridad. Este resultado se aprecia en las figuras 39 y 40, donde en la figura 40 se da un acercamiento a la zona de salida, donde tiene mayor cantidad de interacción de la concentración de partículas.

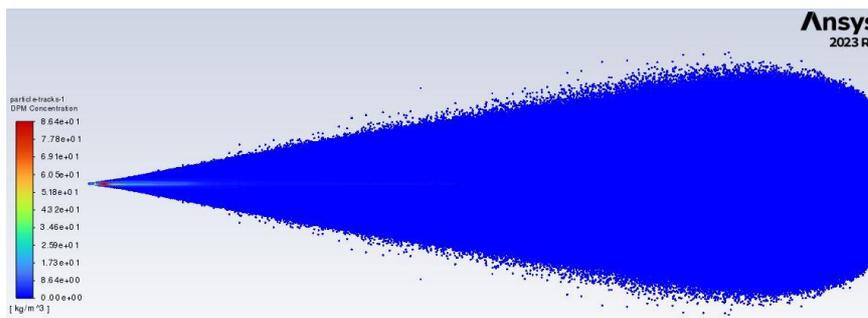


Figura 39. Gráfica de la concentración DPM del rastreo de partículas.

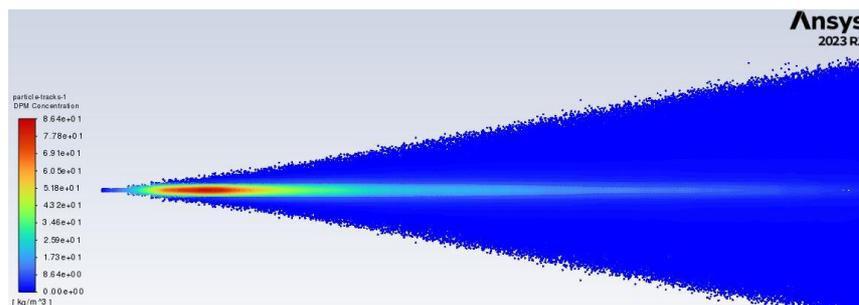
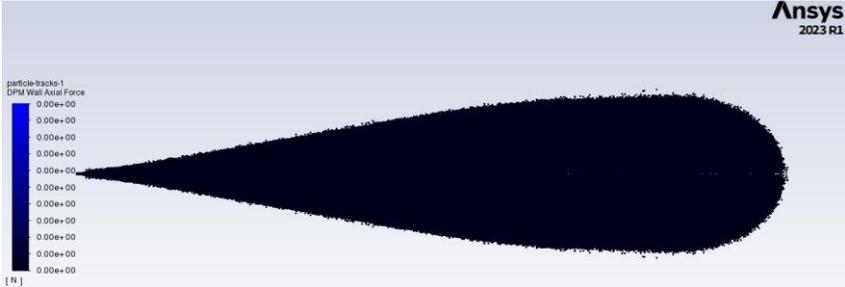
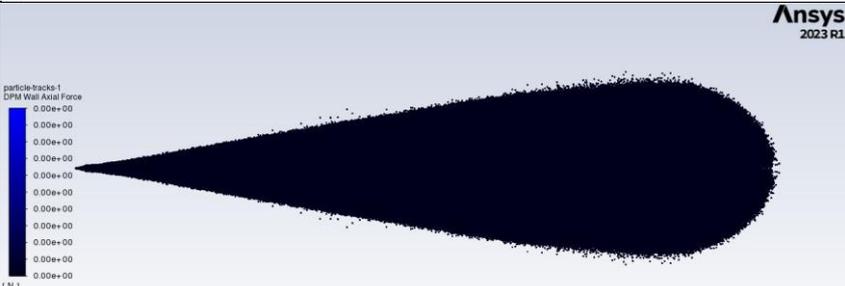
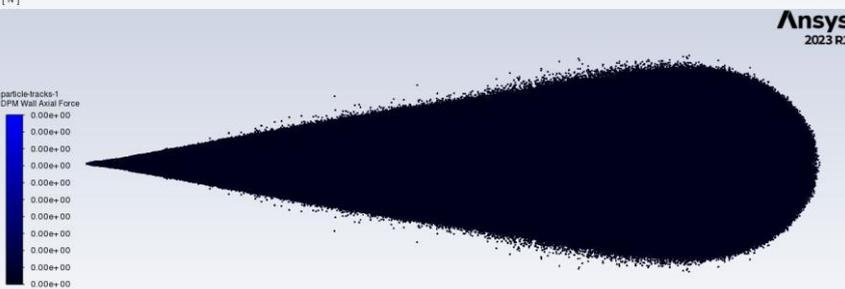
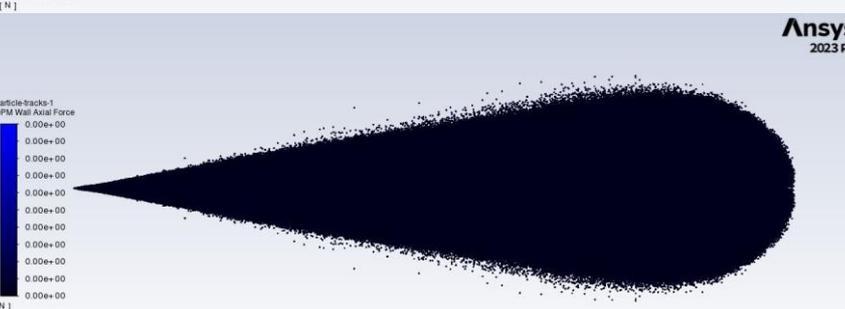
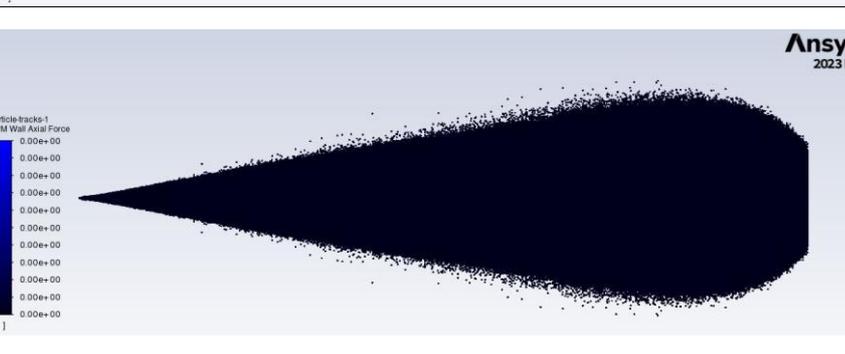


Figura 40. Acercamiento a la zona de salida de la figura 39.

5.2.2.3 Desarrollo Real del Spray Durante el Tiempo

Tabla 11. Niveles del desarrollo de la atomización real.

| Nivel | Ilustración | Descripción |
|-------|-------------|---|
| 1 | | Después de iniciar a los 2ms el chorro se mantiene fraccionado con una distancia de 100mm. |
| 2 | | Llegado a 5ms la parte exterior del chorro se mantiene con muy pocas partículas secundarias y alcanza un valor de 155mm. |
| 3 | | A los 8ms, el chorro continúa fraccionándose y aumenta su longitud de manera poco significativa, formando una gota bastante alargada. |

| | | |
|---|--|--|
| 4 |  | <p>A los 13ms el spray aumenta su largo a 200mm y el ancho del spray alcanza los 75mm.</p> |
| 5 |  | <p>Pasado 19ms del arranque de la simulación, el spray ha alcanzado los 250mm de longitud y un ancho de 110mm</p> |
| 6 |  | <p>Alcanzados los 25ms el chorro principal llegó a los 420mm de longitud del dominio, mientras que su ancho de spray ha llegado a alcanzar los 160mm.</p> |
| 7 |  | <p>A los 31ms de tiempo las partículas secundarias se desprenden un poco más del spray principal.</p> |
| 8 |  | <p>A los 35ms el spray ha alcanzado el dominio de la malla a 450mm, sus partículas secundarias siguen expandiéndose mínimamente del spray principal, mientras que su ancho alcanza una dimensión de 202mm.</p> |

Con los 8 niveles que se describieron para el caso real del desarrollo del atomizador, con los parámetros de tiempo, alcance y ancho, se agrupa en una tabla 12 como se muestra a continuación.

Tabla 12. Datos de tiempo alcance y ensanchamiento de la tabla 11.

| Nivel | Tiempo (ms) | Alcance (mm) | Ancho (mm) |
|-------|-------------|--------------|------------|
| 1 | 2 | 100 | 35 |
| 2 | 5 | 155 | 45 |
| 3 | 8 | 170 | 60 |
| 4 | 13 | 200 | 75 |
| 5 | 19 | 250 | 110 |
| 6 | 25 | 420 | 160 |
| 7 | 31 | 430 | 190 |
| 8 | 35 | 450 | 202 |

Con los datos de la tabla 12, el análisis del alcance arroja una ecuación polinómica de cuarto nivel que rige la dispersión, esta ecuación tiene un 97.61% de exactitud.

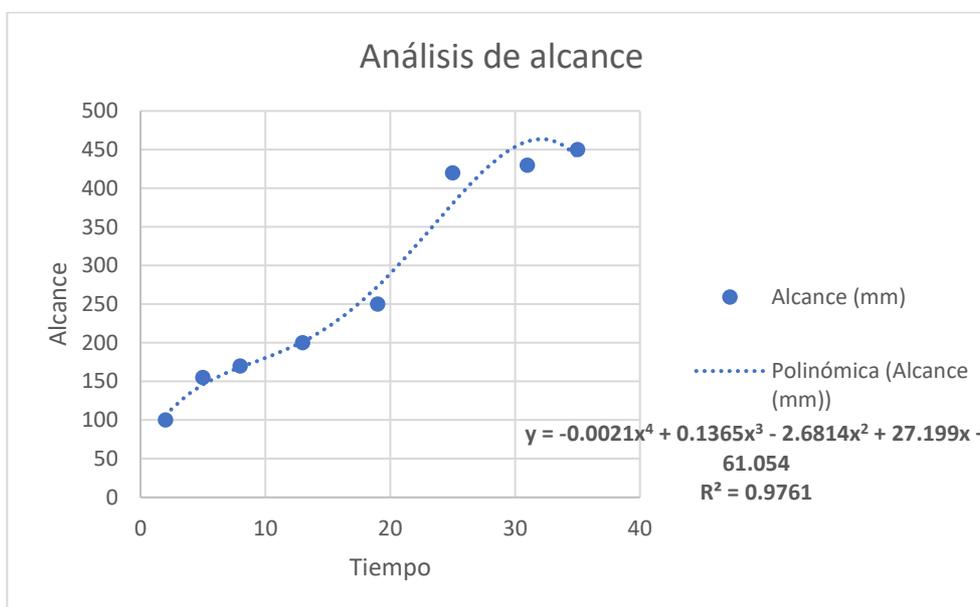


Figura 41. Gráfica del análisis del alcance real.

Con los datos de la tabla 12, en el caso del análisis del ensanchamiento del spray, este presenta una ecuación de tercer grado, que cuenta con un 99.58% de exactitud.

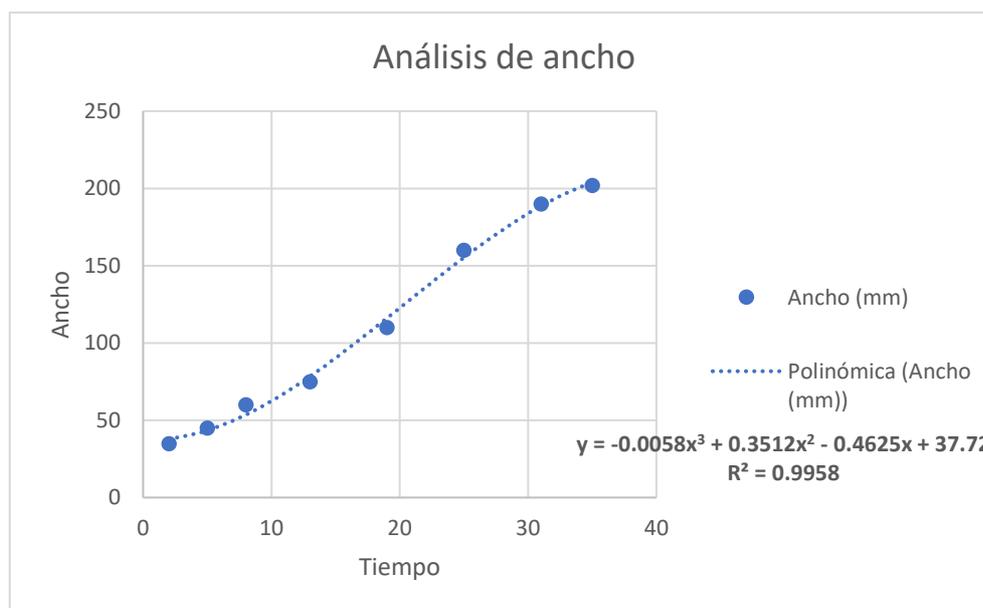


Figura 42. Gráfica del análisis del ancho ideal.

5.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE FLUIDOS

5.3.1 RESULTADO REAL E IDEAL

Con los resultados de los análisis completados, se puede concluir que la distribución ideal se expande de manera más uniforme que al interactuar con el aire, debido a que completa el recorrido de 450mm del dominio en 13ms, mientras que en un entorno real lo completa en 35ms, debido al fenómeno de arrastre dinámico que tiene el aire.

En cuanto a su ancho el modelo ideal alcanza una distribución de su ancho mayor y en menos tiempo de 260mm en 18ms, mientras que en la fase real alcanza 202mm en 35ms, siendo el modelo en una fase ideal un 22.3% más efectivo.

5.3.2 RESULTADO REAL Y FÍSICO

Al comparar los resultados de la simulación real con los resultados físicos, el ancho del aspersor tiene una variación de un 0.9% que significa unos 2mm de diferencia lo que en grandes escalas es una diferencia insignificante.

Con respecto a su alcance, los datos de la Universidad apuntaron a 450mm como el máximo alcance que el spray obtendrá, pero al realizar las pruebas físicas se pudo

comprobar que puede llegar a tener un alcance de 750mm como máximo en condiciones reales con viento sin turbulencia, por lo que en la simulación real al llegar a los 35ms ya llegaba a superar el límite del dominio de malla que se encontraba en 450mm, lo cual indica que en algún momento llegaría a estabilizarse y llegaría sin dificultad a los 750mm obtenidos de las pruebas físicas.

5.4 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN ÓPTICA

5.4.1 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN INTERACTIVA

Se aplica una simulación interactiva donde se comprobó el comportamiento de los haces de luz de color negro debido al espectro visible tomado que arroja el programa. El color negro emanado por los haces de luz es debido a que en el mundo real casi no serían observados, pero permite obtener una noción de la distribución de luz desde la fuente.

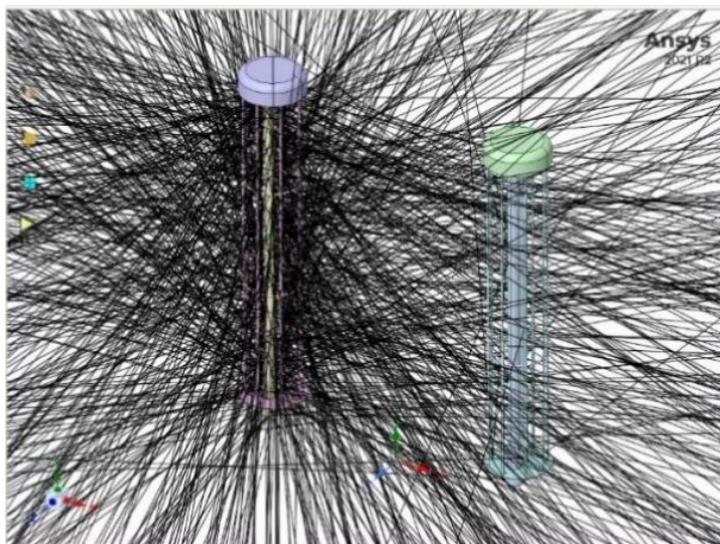


Figura 43. Simulación interactiva con un millón de rayos.

Se observó que los haces de luz rebotan al encontrarse con las superficies opacas (no ópticas) y reflejan la luz hacia el exterior y la redireccionan.

Con los resultados de la simulación interactiva se apreció que la luz sale desde las lámparas hacia el exterior y los haces de luz que se encuentran con una superficie no óptica rebotan y terminan redireccionándose.

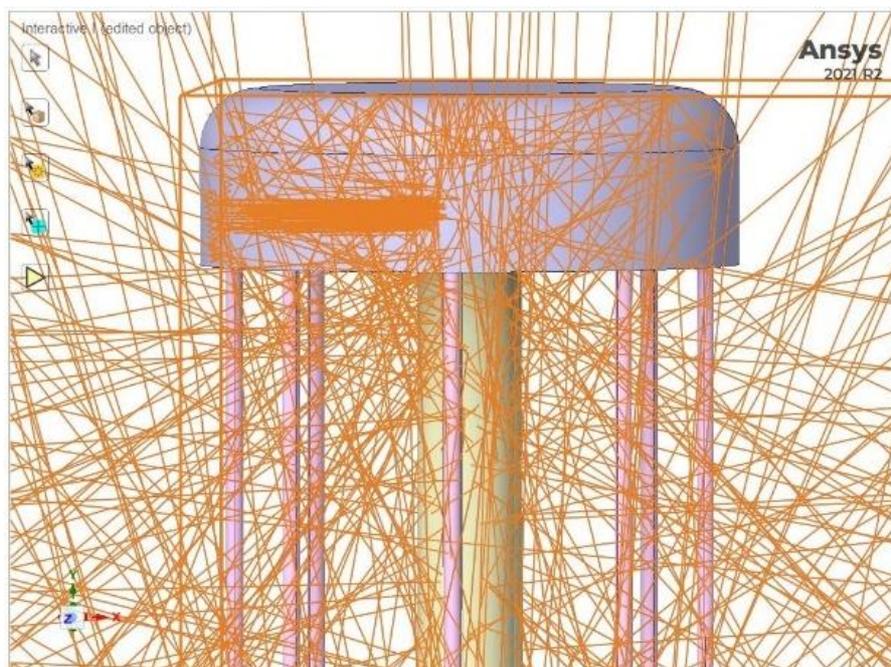


Figura 44. Rebotes de los rayos de luz sobre superficies opacas.

5.4.2 ILUMINANCIA RESULTANTE EN CONJUNTO 2D

Se observa que a medida que los haces de luz se alejan de la fuente de irradiación su contacto con superficies cercanas se va reduciendo, observándose un valor de iluminancia en lumens de 2.58lx en promedio sobre las superficies adyacentes, y en mayor intensidad en un rango de 1.44m de ancho y de 0.986m de alto en el área de mayor contacto de la luz UV-C.

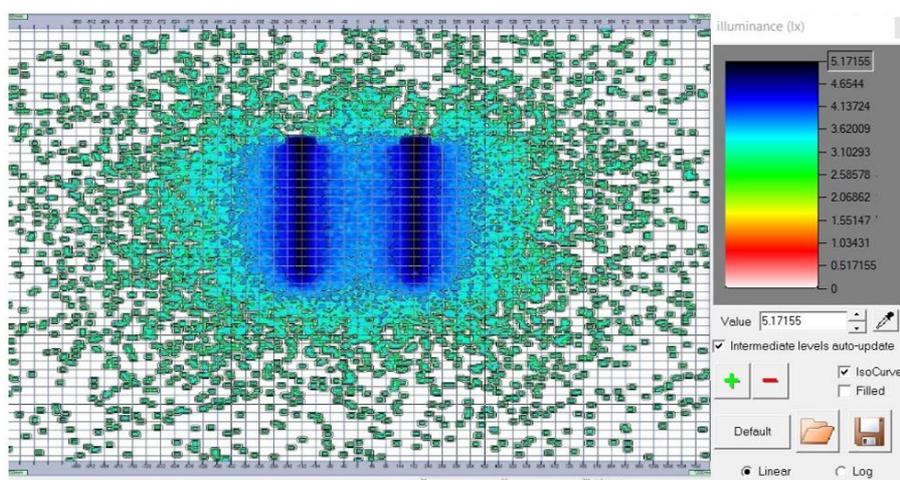


Figura 45. Resultado y métrica de la vista frontal.

Para la simulación en vista lateral se obtiene la figura 46 que refleja la dispersión de iluminancia con un valor de 0.002lx en promedio, con una zona de mayor interacción con los haces de luz de dimensiones de 1.1m de ancho y 0.8m de alto. Se evidencia desde este punto de vista que las partículas de iluminancia se propagan aumentando su alto a medida que se alejan de su fuente con las misma cantidad de luxens.

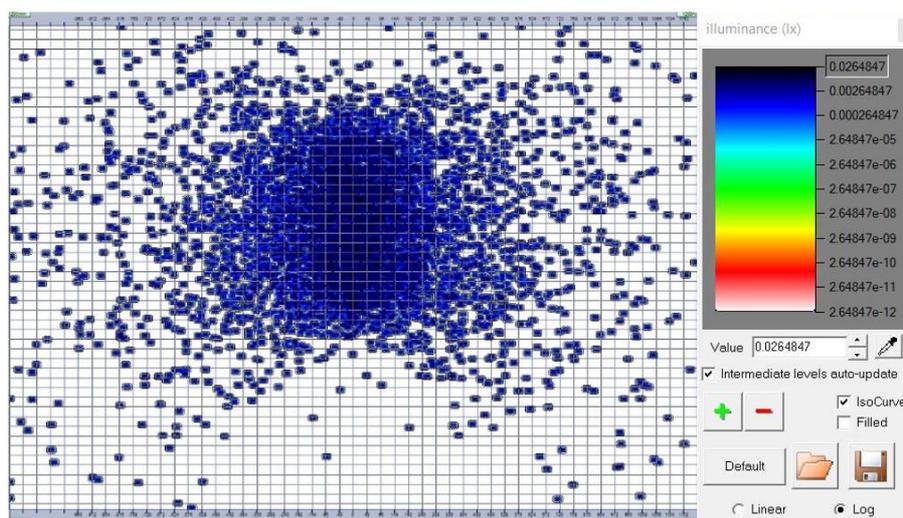


Figura 46. Resultado y métrica de la vista lateral.

Se obtuvo datos de iluminancia dentro del sensor de irradiancia, los datos recabados se reflejan en la tabla siguiente.

Tabla 13. Datos resultantes de las simulaciones en conjunto 2D.

| Simulación | Iluminancia (lx) | Ancho (m) | Altura (m) |
|------------|------------------|-----------|------------|
| Frontal | 2.58 | 1.44 | 0.986 |
| Lateral | 0.002 | 1.1 | 0.8 |

En los datos reunidos en la tabla 13 anterior junto con las figuras 45 y 46, el resultado de las simulaciones directas demuestra que desde un plano frontal sin un desplazamiento o adelantamiento de profundidad ($z=0$) y una vista lateral que se encontrará de igual forma en la parte media del conjunto.

Se observa que la irradiancia emanada será mucho mayor desde un plano xy que un yz, su alcance será de igual manera mayor con un 23% y 18% más de alcance en el ancho y la altura respectivamente.

5.4.2.1 Línea de Tendencia del Análisis Frontal

Con la simulación se estableció una dirección desde la fuente hacia el exterior, donde se tomó 10 puntos de posición para determinar una tendencia de la cantidad de iluminancia a medida que se aleja de la fuente.

Tabla 14. Datos de iluminancia frontal.

| Posición | Iluminancia |
|----------|-------------|
| 0 | 5.17155 |
| 1 | 3.22 |
| 2 | 0.63 |
| 3 | 0.07 |
| 4 | 0.05 |
| 5 | 0.02 |
| 6 | 0.01 |
| 7 | 0.007 |
| 8 | 0.001 |
| 9 | 0.0001 |

En el programa Excel se aplicó una la línea de tendencia que presenta una ecuación exponencial para este caso debido a que su coeficiente de relación fue el mayor con un 93.06%.

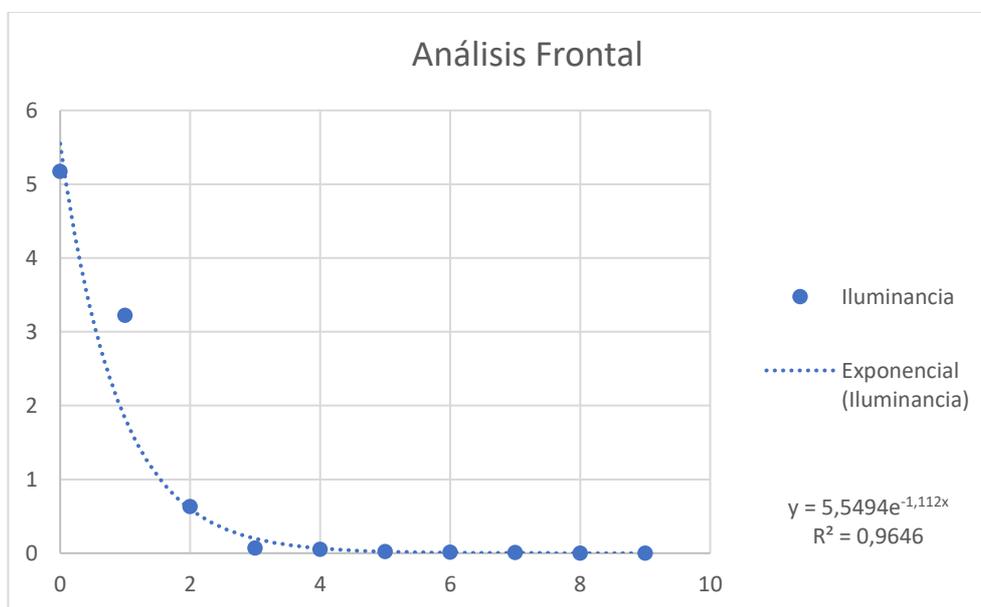


Figura 47. Gráfico de dispersión del análisis frontal.

5.4.2.2 Línea de Tendencia del Análisis Lateral

Al igual que el caso anterior, con los datos de la simulación se tomó 10 puntos de posición para determinar una tendencia de la cantidad de iluminancia a medida que se aleja de la fuente.

Tabla 15. Datos de iluminancia lateral.

| Posición | Iluminancia |
|----------|-------------|
| 1 | 0.009 |
| 2 | 0.005 |
| 3 | 0.0012 |
| 4 | 0.001 |
| 5 | 0.0007 |
| 6 | 0.0003 |
| 7 | 0.00008 |
| 8 | 0.00005 |
| 9 | 0.00001 |
| 10 | 0.000096 |

En el caso del análisis de sección, su línea de tendencia presenta una ecuación exponencial de igual forma con un coeficiente de relación de 98.07%.

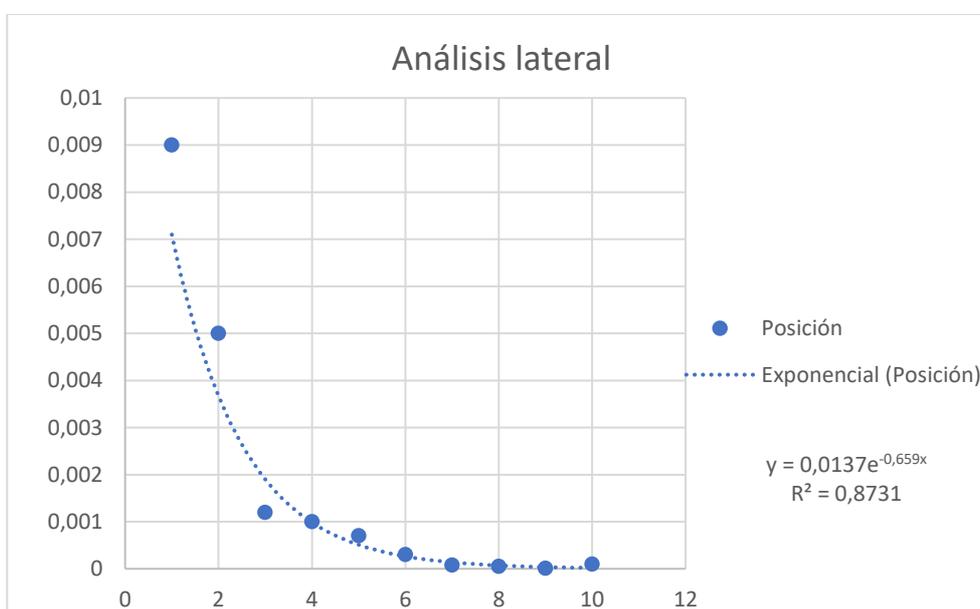


Figura 48. Gráfico de dispersión del análisis lateral.

5.4.3 ILUMINANCIA RESULTANTE EN SOLITARIO 2D

5.4.3.1 Simulaciones Frontal y Lateral

Se simuló el comportamiento de la luz desde un perfil frontal. Se observó que el rango de longitud de onda de los haces de luz oscila entre 350nm-380nm e irradia una iluminancia de 0.52lx en promedio sobre el sensor.

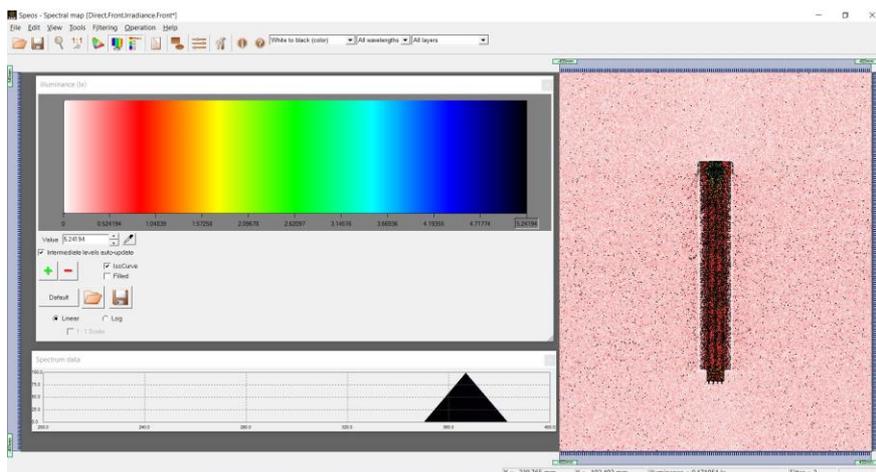


Figura 49. Imagen y métrica del análisis frontal.

Se realiza el mismo procedimiento con el sensor lateral. Se apreció que el rango de longitud de onda se encuentra entre 350nm-380nm e irradia una iluminancia promedio de 0.65lx.

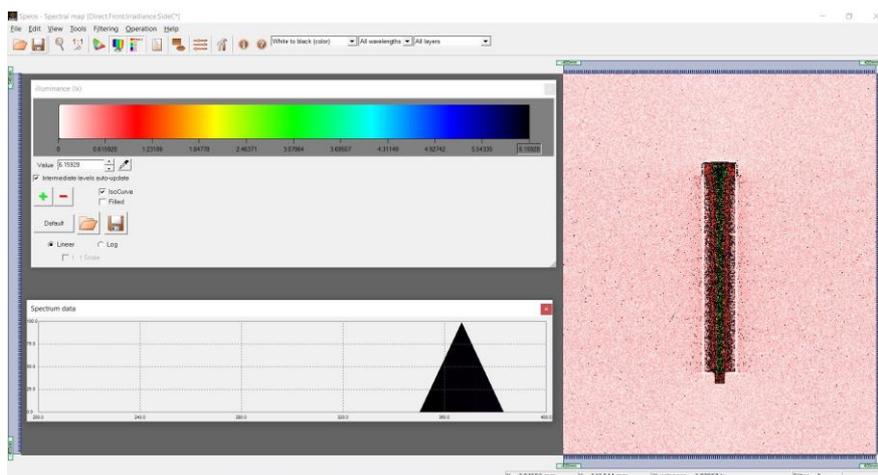


Figura 50. Imagen y métrica del análisis lateral.

Con los resultados de las simulaciones 2D en conjunto realizadas se obtuvo datos de iluminancia dentro del sensor de irradiancia que dimensiona su anchos y altura de alcance en cada simulación, los datos recabados se reflejan en la tabla 16. En esta ocasión se analizó en solitario una de las lámparas para obtener sus medidas de

irradiancia de la misma forma que en conjunto con sensores de irradiancia de 1000mmX800mm.

Tabla 16. Iluminancias o irradiancias resultantes en las simulaciones frontal y lateral.

| Simulación | Iluminancia (lx) |
|------------|------------------|
| Frontal | 0.52 |
| Lateral | 0.65 |

Estos datos demuestran que la lámpara emite un 20% más irradiancia en la vista lateral que en la simulación frontal; con los datos de espectrómetro concluyo que la longitud de onda que emanaba la lámpara se encontró en un rango de 350nm-380nm para ambos casos.

5.4.3.2 Simulaciones Sobre las Paredes Exteriores

La simulación con una geometría ajena a la principal de la lámpara se usó 2 de los 4 lados debido a que contaron como reflejos de las simulaciones frontal y lateral.

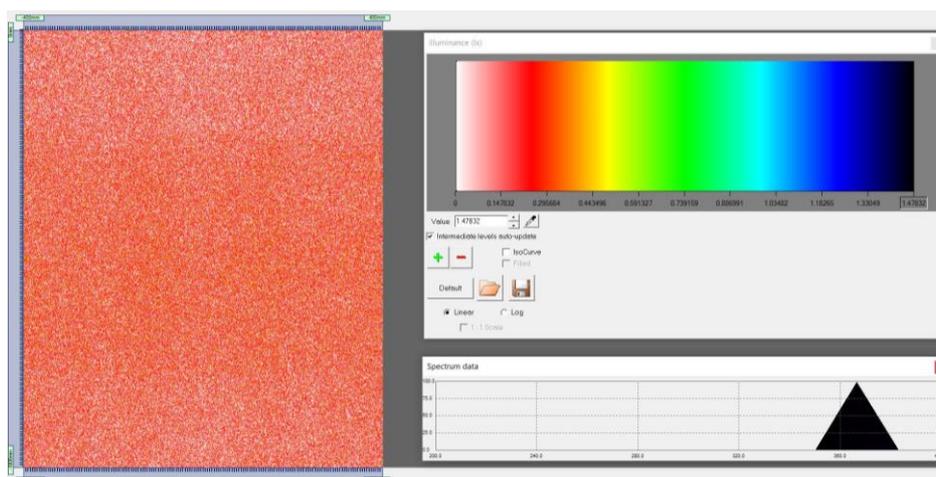


Figura 51. Imagen y métrica del análisis de la pared lateral.

En ambas simulaciones se apreció que la longitud de curva no cambia y sigue en rango de 350nm-380nm. La irradiancia tiene una ligera variación, los valores en la pared lateral son mayores en cuanto a sus valores máximos a las de la pared frontal.

La pared lateral cuenta con una irradiancia máxima de 1.478lx mientras que la frontal cuenta con 1.296lx Los valores promedios presentan una irradiancia promedio de 0.3lx

en toda la superficie del sensor frontal, para la pared lateral presenta una irradiancia promedio de 0.25lx.

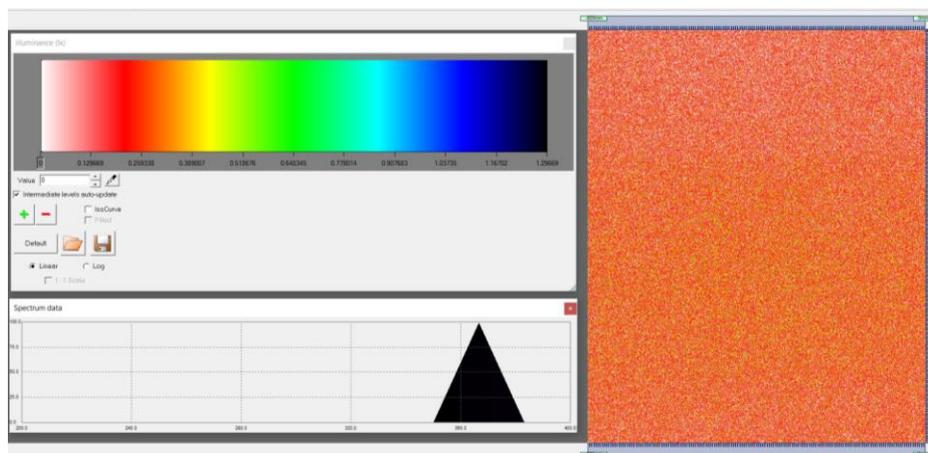


Figura 52. Imagen y métrica del análisis de la pared posterior.

Las paredes exteriores analizadas se localizaron al lado izquierdo y delante de la fuente de luz, donde se aplicó de igual forma sensores de irradiancia con una medida de 800mmx1000mm para cada uno como en casos anteriores. Los resultados de irradiancia obtenidos se aprecian en la tabla 17.

Tabla 17. Iluminancias o irradiancias resultantes en las paredes frontal y lateral.

| Simulación | Iluminancia (lx) | Iluminancia promedio (lx) |
|---------------|------------------|---------------------------|
| Pared Frontal | 1.296 | 0.31 |
| Pared Lateral | 1.478 | 0.25 |

5.4.3.3 Simulaciones Sobre la Lámpara en Sección

Para las simulaciones se colocó sensores de 400mmx400mm a lo largo de la lámpara.

El sensor localizado en la parte superior de la geometría recibe mayor irradiancia por lo cual el valor promedio es de 1.1lx en la mayoría de su superficie llega a valores de 0.3lx en sus zonas exteriores y con un valor máximo de 3.56lx en la zona entre sus lámparas. Pero en este caso y del inferior sus valores quedan atrapados a las dimensiones de la geometría debido que no logra escapar más allá de su estructura.

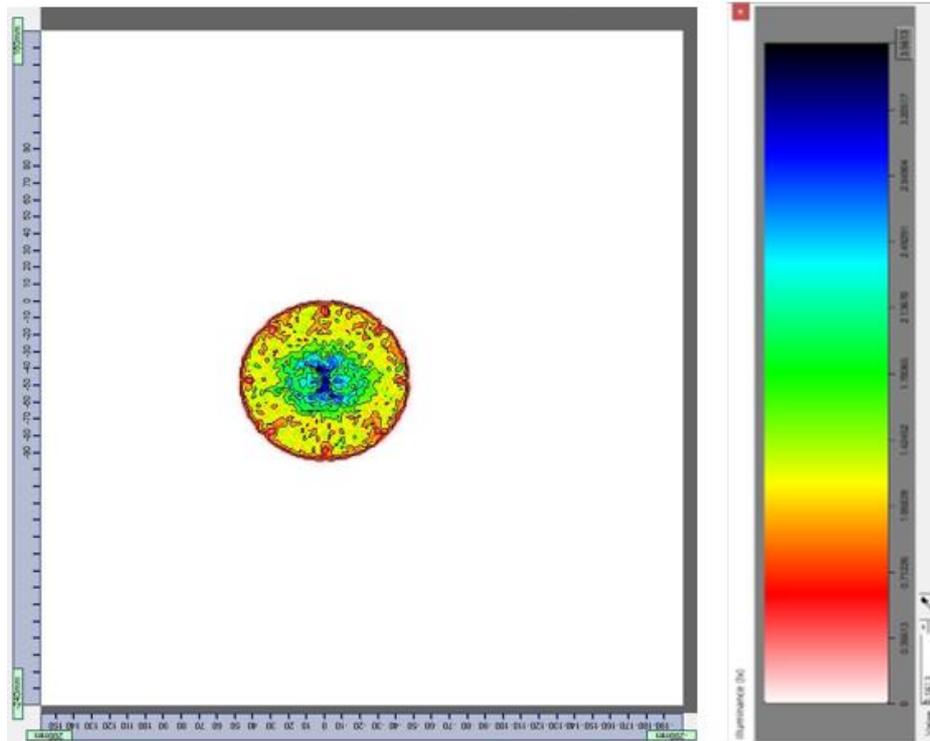


Figura 53. Resultado y métricas desde el sensor de la parte superior.

La simulación del sensor inferior se notó los cambios del valor de la irradiancia sobre su superficie de forma más gradual desde el interior hacia el exterior de la superficie con una irradiancia promedio de 0.5lx sobre su superficie y alcanzando un valor de irradiancia máxima de 2.4lx.

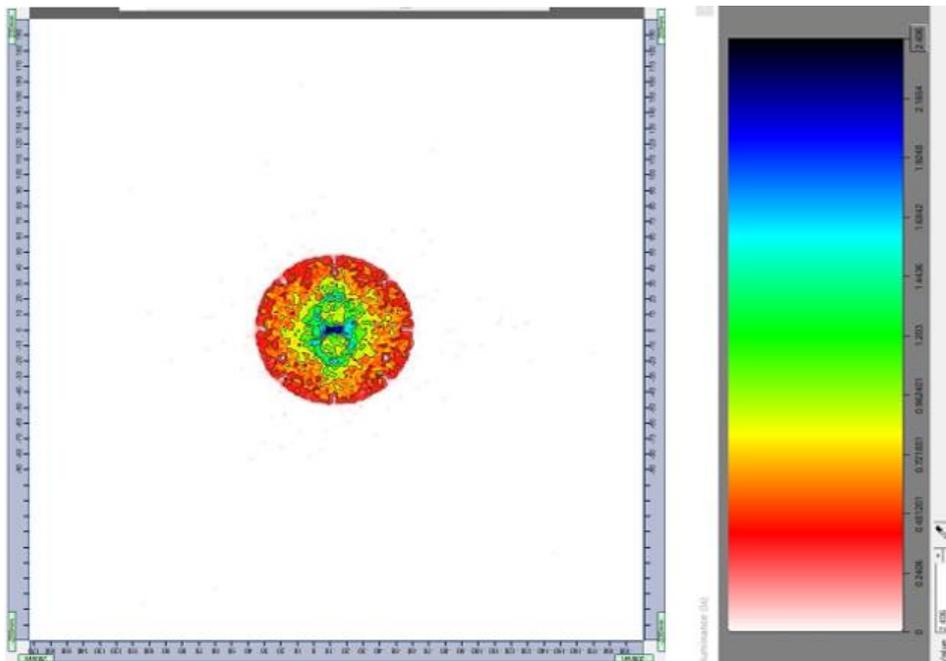


Figura 54. Análisis y métricas del sensor de la parte inferior.

La simulación del sensor alejado de las superficies se observó que los haces salen y se distribuyen alrededor de la fuente de luz. La irradiancia que en promedio llega a las superficies aledañas a la fuente de luz tienen un valor en promedio de 0.22lx; desde los límites de los protectores hacia la fuente el valor promedio de su irradiancia aumenta a 0.5lx y alcanza una irradiancia máxima de 2.26lx.

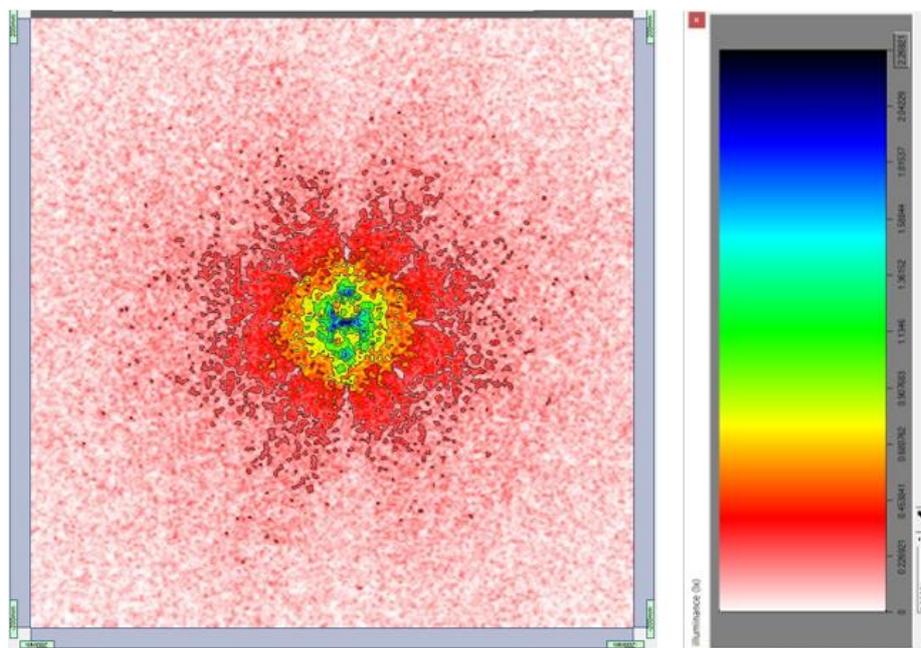


Figura 55. Análisis y métricas del sensor de la parte media.

En este caso se buscó concluir sobre si es comportamiento de la luz emitida por la lámpara era uniforme y cómo se comportaría la luz con un objeto opaco a los extremos de la fuente.

Tabla 18. Iluminancias o irradiancias resultantes en las secciones de la lámpara.

| Sección | Iluminancia máxima (lx) | Iluminancia promedio (lx) |
|----------|-------------------------|---------------------------|
| Superior | 3.56 | 1.1 |
| Medio | 2.26 | 0.22 |
| Inferior | 2.40 | 0.5 |

Con los datos de iluminancia obtenidos en la tabla 18, se observa que los valores de la simulación en la parte media e inferior son bastante similares, mientras que en la sección superior de la lámpara el valor aumenta un 36.51% en promedio con las otras simulaciones, esto es debido al rebote de los rayos de luz en la parte superior de la carcasa; al momento que la fuente emite dichos rayos estos chocan con un objeto opaco el cual los hace rebotar de vuelta o los redirecciona.

Para el caso del resultado a media altura se procede a tomar datos en 10 puntos y graficarlos para observar la línea de tendencia que se obtendrá en este caso.

Tabla 19. Datos de iluminación a media altura.

| Posición | Iluminancia |
|----------|-------------|
| 0 | 2.26 |
| 1 | 1.99 |
| 2 | 0.88 |
| 3 | 0.76 |
| 4 | 0.45 |
| 5 | 0.21 |
| 6 | 0.17 |
| 7 | 0.16 |
| 8 | 0.14 |
| 9 | 0.06 |

La línea de tendencia determina que la ecuación que predice el comportamiento de la irradiancia será un modelo exponencial con un coeficiente de relación de 96.13%.

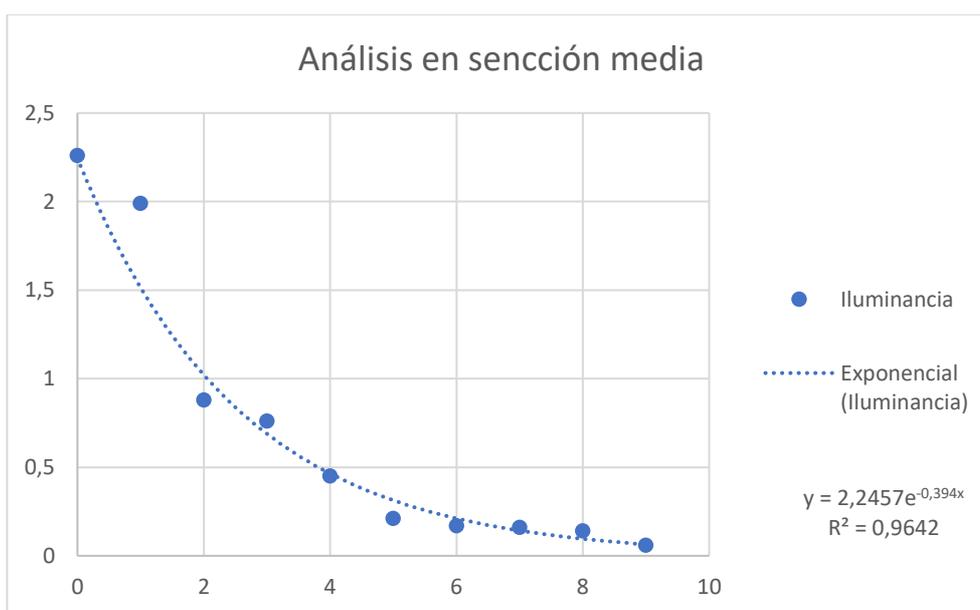


Figura 56. Gráfico de dispersión del análisis en sección media de la altura.

5.4.3.4 Simulación de Intensidad o Radiancia

Se aprecia que la mayor cantidad de intensidad radiante se encuentra en las zonas ecuatoriales del sensor donde alcanza valores de 5W/sr -6.5W/sr; mientras más se aleja del ecuador del sensor recibe menos intensidad hasta recibir 0W/sr en los polos del sensor.

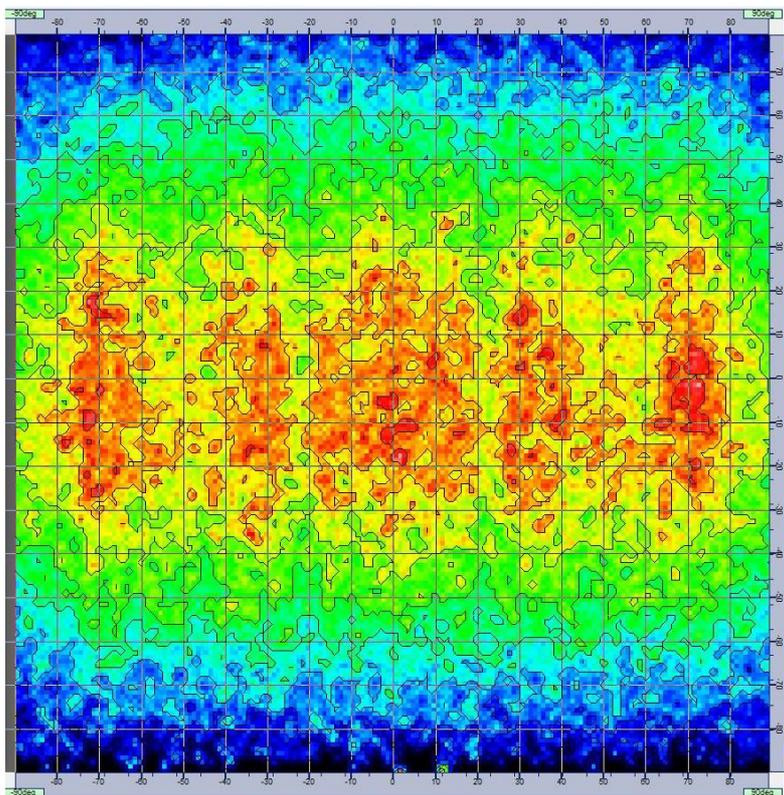


Figura 57. Imagen resultada del análisis de intensidad.

Para este caso la longitud de onda oscila en valores similares a los anteriormente obtenidos, en este caso se encuentran entre 340nm-370nm.

Tabla 20. Datos de intensidad.

| Posición | Intensidad |
|----------|------------|
| 0 | 7.69 |
| 1 | 6.92 |
| 2 | 6.15 |
| 3 | 5.38 |
| 4 | 4.61 |
| 5 | 3.84 |
| 6 | 3.07 |
| 7 | 2.3 |
| 8 | 1.53 |
| 9 | 0.76 |
| 10 | 0 |

Como se aprecia en la figura 58 la gráfica demuestra una pérdida lineal de la intensidad del sensor que se reduce a lo largo del sensor hacia sus polos hasta llegar a cero. Con la línea de tendencia se demostró que su ecuación es de un modelo lineal con un coeficiente de relación del 100%.

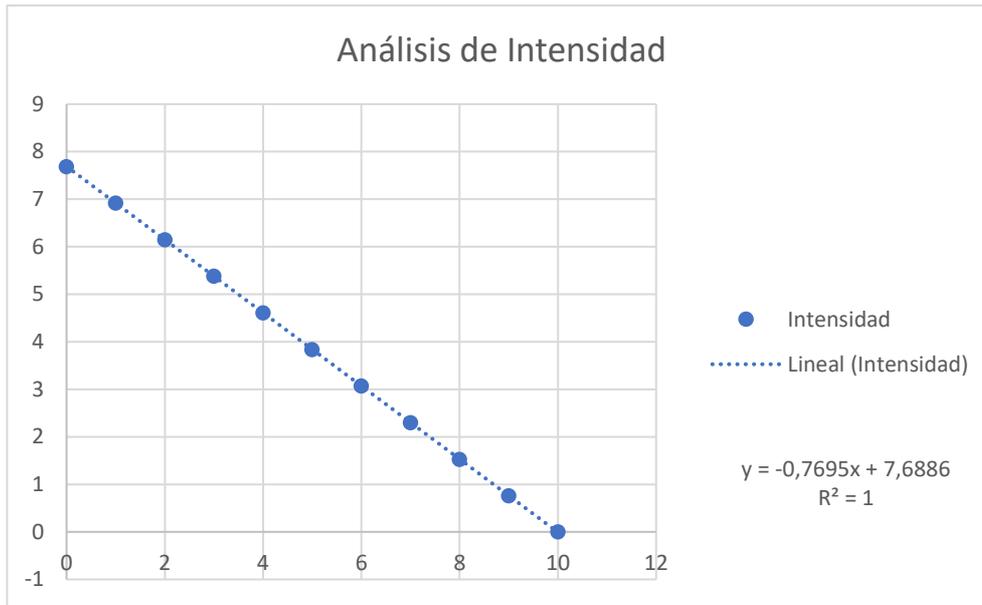


Figura 58. Gráfico de dispersión del análisis de intensidad.

5.4.4 ILUMINANCIA DE LAS SIMULACIONES 3D

5.4.4.1 Simulación en Conjunto

Los resultados demostraron cómo la luz irradia los protectores que rodean las lámparas; en promedio, concentra un valor de 1.3lx como máximo y un mínimo de 0.02lx en sus partes exteriores.

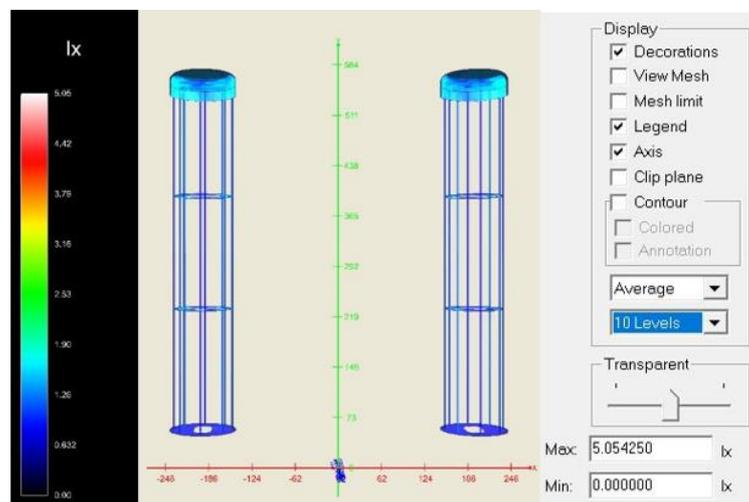


Figura 59. Resultado y métricas de la simulación 3D.

Se realizó dos simulaciones 3D más, la primera con las geometrías de la lámpara y otra con la geometría que encierra toda la lámpara.

5.4.4.2 Resultado del Primer Análisis

Toda la estructura tiene una irradiancia promedio de 1lx, una pequeña zona entre sus lámparas presenta una irradiancia de hasta 4lx. La geometría alcanzó un valor máximo de 13.54lx, este valor es irrelevante debido a que el área que cubre es muy pequeña, por lo tanto, se desprecia.

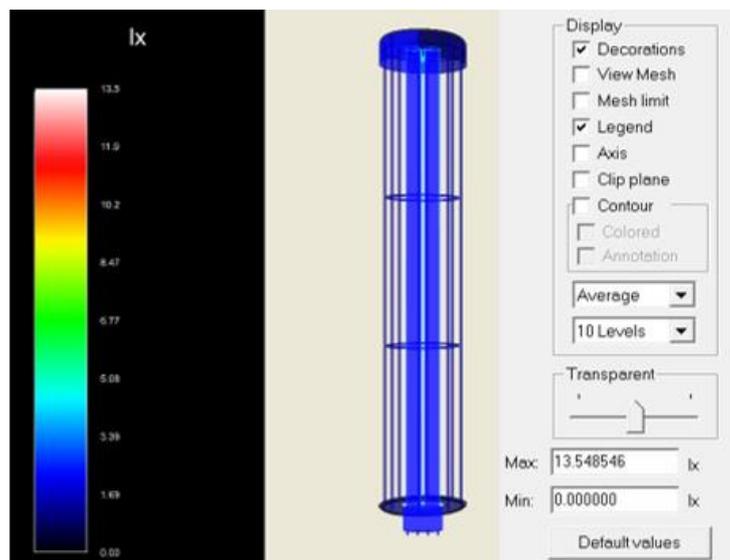


Figura 60. Resultado del primer análisis.

5.4.4.3 Resultado del Segundo Análisis

El valor promedio es cercano al valor máximo el cual se encuentra en 0.24lx, los 0.22lx que llegan desde la lámpara permiten apreciar que este valor será la constante de transmisión, llega a tener un valor bastante similar al de la simulación 2D de las paredes exteriores que obtuvieron 0.31lx y 0.25lx en las paredes frontal y lateral respectivamente como se aprecia en la tabla 17.

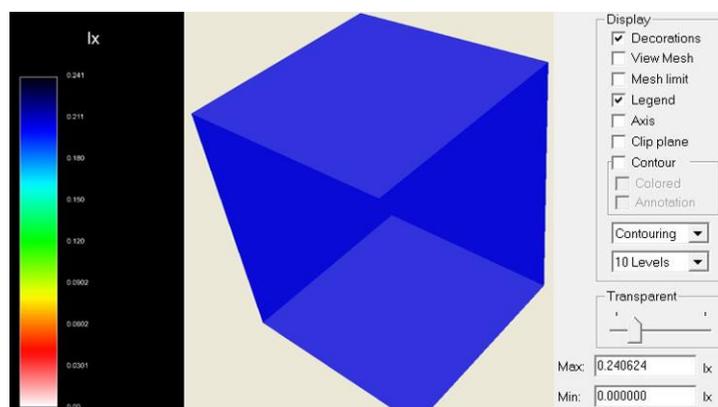


Figura 61. Resultado del segundo análisis.

6. CONCLUSIONES

A través de la realización de este proyecto, se obtuvo los análisis de los sistemas de aspersión y de luz ultravioleta de un Robot Desinfectador Autónomo a través de la aplicación del software de simulación ANSYS; que en el Ecuador aún no se la explota y donde existe un gran abanico de posibilidades con futuras aplicaciones en diferentes ámbitos, no solo en el análisis de fluidos y ópticos sino también industrial.

Así pues, tras la investigación del fundamento teórico y estado del arte sobre atomización y ópticos se pudo determinar los procesos de aplicación y simulación, además de los fundamentos teóricos y físicos que rigen las simulaciones analizadas en el capítulo 2.

Se determinó que los modelos matemáticos en mecánica de fluidos que rigen el sistema de aspersión del robot, se basan en el modelo de fase discreta (DPM), que por medio del modelo físico de ruptura y de viscosidad k- ϵ dentro de una fase de interacción continua que en este caso de estudio fue aire completaron el modelo de atomización.

Con el fin de que el robot desinfectador de la Universidad tenga la máxima optimización posible, por medio de pruebas físicas determinó que al colocar los atomizadores a 0° tendrán un alcance 24.24% mayor con respecto a la posición de $+15^\circ$ y de 57.57% con respecto a la posición de -15° , mientras que en el análisis del ancho presentan una eficiencia del 35.71% con respecto a la posición de $+15^\circ$ y de 21.42% con respecto a la posición de -15° .

Los resultados de los análisis de iluminancia 2D presentados en el capítulo 3 demuestran que la irradiancia emanada en conjunto será mucho mayor desde un plano XY que un YZ, su alcance será de igual manera mayor con un 23% y 18% más de alcance en el ancho y la altura respectivamente, y una lámpara en solitario emite un 20% más irradiancia en la vista lateral que en la simulación frontal; con los datos de espectrómetro concluyo que la longitud de onda se encontró en un rango de 350-380nm para ambos casos mientras que todas las distribuciones de luz al exterior presentan un modelo matemático de distribución exponencial en todas sus emanaciones de luz UV-C.

Por medio del análisis de modelo de fase discreta (DPM) se determinó que el modelo de atomización real, que fue programado para interactuar con una fase continua, siendo esta fase aire, no dista en gran porcentaje de las pruebas físicas realizadas al obtener un 0.9% de variación en el ancho del aspersor de la simulación con respecto a la prueba física, y un alcance que superó sin dificultades el establecido en un inicio de 450mm de longitud en solo 35ms, por lo que la posibilidad de que llegue a los 750mm de alcance es bastante alta.

REFERENCIAS

- Angela, A. (2012). Metodología para la simulación del flujo multifásico en un atomizador osprey de gas confinado. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Ansys. (2020). *Ansys SPEOS: Illuminating the Possibilities*. Obtenido de Ansys SPEOS: Illuminating the Possibilities: <https://www.ansys.com/content/dam/product/optical/speos/speos-white-paper.pdf>
- ANSYS. (2023). *Ansys Fluent Theory Guide*. Canonsburg, PA: ANSYS.Inc.
- Ansys, I. (2022). *Speos User's Guide*. Canonsburg, PA: Ansys, Inc.
- Bracco, R. D. (1982). "Mechanism of Atomization of a Liquid Jet". *Phys. Fluids*, 26(10).
- C. Soteriou, R. A. (1995). "Direct Injection Diesel Sprays and the Effect of Cavitation and Hydraulic Flip on Atomization". *SAE*, SAE Paper 950080.
- Calles-García, J., & González-Pérez, P. (2011). *La Biblia del Footprinting*.
- Corradini., D. P. (1997). "Analytical Prediction of the Exit Flow of Cavitating Orifices". *Atomization and Sprays*, 7. 6.
- Costanzo, S. (2023). *Study, design and optimization of a light guide on the door panel for interior lighting of a car*. Torino: Politecnico di Torino.
- Dumouchel, C. (2008). On the experimental investigation on primary atomization of liquid streams. vol. 45, pp. 371-422, 2008.
- Fritsching, U. (2004). Spray Simulation: Modeling and numerical simulation of spray. *Spray Simulation: Modeling and numerical simulation of spray*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ghadimi-Moghadam, A. (2020). COVID-19 Tragic Pandemic: Concerns over Unintentional "Accelerated Evolution" of Novel Coronavirus (SARS-COV-2) and Introducing a Modified Treatment Method for ARDS.
- Investigación, V. d. (12 de 08 de 2021). *Investigación UPS*. Obtenido de Investigación UPS: <https://www.investigacion.ups.edu.ec/noticia/el-gid-std-presenta-nuevos-dispositivos-tecnologicos-de-beneficio-para-la-comunidad/>

- Ioannides, A. D. (1983). "Aspects of computer simulation of liquid-fuelled combustors".
En *J. Energy* (págs. 7(6). 482–490).
- Iowa, U. o. (s.f.). *UNI*. (University of Northern Iowa) Recuperado el 22 de 01 de 2023, de
<https://sites.uni.edu/morgans/astro/course/Notes/section1/math4.html>
- Jeong, K. (2013). A Study on the Problem of Pressure and Flow Rate by Prescriptive Code
Based Design of Fire Sprinkler System. *Dept. of Fire & Disaster Prevention of
Semyung Univ.*, 6.
- Lefebvre, A. (1989). *Atomization and sprays*. West Lafayette: Taylor and Francis.
- Lefebvre, A. H. (1989). *Atomization and Sprays*. Hemisphere Publishing Corporation.
- Li, H. (2012). CFD–DEM simulation of material motion in air-and-screen cleaning device.
Elsevier, 9.
- Mehring, W. S. (2000). "Review of theory of distortion and disintegration of liquid
streams".
- Nurick., W. H. (1976). "Orifice Cavitation and Its Effects on Spray Mixing". *Journal of
Fluids Engineering*, 98.
- P.-K.Wu, L.-K. T. (1995). "Primary Breakup in Gas/Liquid Mixing Layers for Turbulent
Liquids". En *Atomization and Sprays* (págs. 2. 295–317.).
- Raga, C. (2016). Desarrollo de casos técnicos de fluidotécnica mediante simulación
numérica. Zaragoza: Universidad Zaragoza.
- Song, K. (2016). Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water
disinfection: A review. *Water Research*, 40.
- Szeto, W. (2020). The efficacy of vacuum-ultraviolet light disinfection of some common
environmental pathogens. *Springer*, 9.
- W., K. (2020). Ten Facts about UV Radiation and COVID-19. *LEUKOS*.
- White, F. M. (1998). *Fluid Mechanics*. Kingston: McGraw-Hill College.

ANEXOS

7.1 ANEXO1: TABLA DE PRESIÓN DE VAPOR DEL AGUA

| Presión de vapor de agua a diferentes temperaturas | | |
|---|-----------------------|-----------------------|
| <i>T</i> (°C) | <i>P</i> (atm) | <i>P</i> (kPa) |
| 0,01 | 0,006038 | 0,617 |
| 1 | 0,006487 | 0,6571 |
| 2 | 0,006969 | 0,7060 |
| 3 | 0,007484 | 0,7581 |
| 4 | 0,008031 | 0,8136 |
| 5 | 0,008614 | 0,8726 |
| 6 | 0,009234 | 0,9354 |
| 7 | 0,009892 | 1,0021 |
| 8 | 0,010592 | 1,0730 |
| 9 | 0,011336 | 1,1483 |
| 10 | 0,012124 | 1,2282 |
| 11 | 0,012962 | 1,3130 |
| 12 | 0,013848 | 1,4028 |
| 13 | 0,014789 | 1,4981 |
| 14 | 0,015785 | 1,5990 |
| 15 | 0,016839 | 1,7058 |
| 16 | 0,017955 | 1,8188 |
| 17 | 0,019135 | 1,9384 |
| 18 | 0,020382 | 2,0647 |
| 19 | 0,021701 | 2,1983 |
| 20 | 0,023093 | 2,3393 |
| 21 | 0,024563 | 2,4882 |
| 22 | 0,026114 | 2,6453 |
| 23 | 0,027750 | 2,8111 |
| 24 | 0,029475 | 2,9858 |
| 25 | 0,031292 | 3,1699 |
| 26 | 0,033207 | 3,3639 |
| 27 | 0,035223 | 3,5681 |
| 28 | 0,037346 | 3,7831 |
| 29 | 0,039577 | 4,0092 |
| 30 | 0,041925 | 4,2470 |

