

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR DE HUMO PARA
VISUALIZACIÓN DE FLUJOS EN TÚNEL DE VIENTO**

GUARRY KEVIN STEVEN MATACEA ZAMBRANO

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURAS**



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, diciembre 1 de 2022

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR DE HUMO PARA
VISUALIZACIÓN DE FLUJOS EN TÚNEL DE VIENTO**

GUARRY KEVIN STEVEN MATACEA ZAMBRANO

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

Director: JUAN PABLO FLÓREZ MERA
Doctor de Ingeniería Mecánica
JUAN.FLOREZ37@UNIPAMPLONA.EDU.CO

Director: JUAN CARLOS SERRANO RICO
Doctor de Ingeniería Mecánica
JCSERRANO@UNIPAMPLONA.EDU.CO

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURAS
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
Pamplona, diciembre 1 de 2022**

Dedicatoria

Ante todo, a Dios, por darme
te
proceso para cumplir uno de mis
grandes logros.

Mis padres por todo el amor,
trabajo y sacrificio en todos
estos años, gracias a ellos he
podido llegar hasta este
momento de felicidad, un gran
orgullo el poder ser su hijo.

Mis hermanos por estas siempre
presente y apoyándome en todo
momento.

Mi director y codirector de
grado por acompañarme
profesionalmente y el apoyo
moral en los momentos más
cruciales.

AGRADECIMIENTOS

- Agradecimiento a mi familia por su apoyo moral y económico, mis padres, mi hermano mayor y mi hermana menor, por tener la paciencia de esperarme y de apoyarme en las circunstancias difíciles. Un agradecimiento especial a mi madre Adriana Zambrano y mi padre Eder Matacea por su apoyo incondicional, el soporte moral y por esperarme durante los años que tardé en la universidad.
- A la Universidad de Pamplona, por ser mi alma mater, por instruirme en el desarrollo de mi proyecto de vida, por compartirme sus conocimientos y por darme la oportunidad de conocer personas de diversas culturas, costumbre y en especial por las experiencias aprendidas
- A los profesores de mi carrera por desarrollar en mí el amor por el aprendizaje, por compartir sus saberes y por darme las bases para el desempeño en mi vida laboral. Agradecimiento especial para mis directores de tesis, mi director de tesis Dr. Juan Pablo Flórez Mera y Co-Director el Dr. Juan Carlos Serrano por su invaluable soporte durante el desarrollo de mi tesis, por su apoyo en desarrollo teórico y técnico, además de la ayuda en el montaje y elaboración de mi tesis en cada uno de sus etapas
- A mis compañeros de la carrera de Ingeniería mecánica Oscar Contreras Torres, Luis Martin Suarez, y Yerson Ferney Rico, con los que logré una gran amistad y fueron un gran soporte teórico, técnico y moral durante el desarrollo de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	20
1.1 JUSTIFICACIÓN	20
1.2 OBJETIVOS	21
1.2.1 Objetivo general	21
1.2.2 Objetivos específicos.....	21
2. ESTADO ACTUAL	23
2.1 ANTECEDENTES	23
2.2 MARCO TEÓRICO	25
2.2.1 Visualización del flujo mediante la técnica del hilo de humo.....	26
2.2.2 Hielo seco	27
2.2.3 Pirotécnicos	27
2.2.4 Generadores de humo comercial	28
2.2.5 Caracterización de flujos	29
2.2.5.1 Flujos externos	29
2.2.5.2 Arrastre y sustentación.....	29
2.2.5.3 Arrastre debido a fricción y a presión.....	30
2.2.5.4 Flujo sobre placas planas	31
2.2.5.5 Flujos sobre cilindros y esferas.....	32
2.2.5.6 Flujos internos.....	33
2.2.5.7 Patrones de flujo bifásico	34
2.2.6 Punto de ebullición.....	35
2.2.7 Curva de ebullición	35
2.2.8 Entalpía de vaporización	37
2.2.9 Técnicas de visualización.....	37
2.2.9.1 Visualización de humo del flujo	37
2.2.9.2 Visualización por diferentes partículas pequeñas	39
2.2.9.3 Visualización de flujo por lanas “tufts”	40
2.2.9.4 Visualización de flujo superficial	40
2.2.10 Polímeros.....	44
2.2.10.1 Efectos de la temperatura.....	45
2.2.10.2 Transiciones térmicas de los polímeros	45

3.	PROYECTO CONCEPTUAL	47
3.1	selección del generador de humo.....	47
3.1.1	Tipos de generadores de humo comercial	47
3.1.1.1	Sin extractor, intercambiador de calor, evaporación indirecta	47
3.1.1.2	Con extractor, evaporación directa del fluido.....	48
3.1.1.3	Con resistencia sumergida en el fluido	48
3.1.1.4	Funciones y componentes del generador de humo	49
3.2	Combustible productor del humo	53
3.2.1	Propiedades de la glicerina.....	53
3.3	Ferroníquel.....	54
3.4	DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO	55
3.4.1	Determinación de la longitud del tubo evaporador	56
3.4.1.1	Calor de vaporización	56
3.4.1.2	Calor sensible del punto inicial a ebullición	57
3.4.1.3	Distancia de calor sensible L_2	58
3.4.1.4	Distancia de calor de vaporización L_1	61
3.4.2	Perdida de calor por convección natural	65
3.4.3	Perdida de calor por convección forzada	67
3.4.3.1	Flujo a través de cilindros	68
3.4.3.2	Coeficiente de transferencia de calor	68
3.4.4	Determinación de la resistencia eléctrica evaporadora	72
3.4.5	Determinación de la resistencia eléctrica secundaria	74
3.4.6	Determinación de la potencia de la mini-bomba.....	76
4.	RESULTADOS.....	78
4.1	Prototipo en CAD	78
4.2	Construcción del generador de humo	82
4.3	Instalación en el túnel de viento	84
4.4	Operacionalización del equipo	86
4.4.1	Manejo del equipo	87
4.5	comparación con simulación numérica	88
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	101
5.1	Conceptualización	101
5.2	Construcción del generador de humo	101

5.3	Instalación del equipo en el túnel de viento y operacionalizar.....	101
5.3.1	Visualización de flujo.....	102
5.3.2	Condensación	103
5.3.3	Turbulencia en el túnel de viento	104
5.4	académicos.....	105
6.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	108
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109
8.	ANEXOS	114
8.1	plano del equipo con su respectivas partes	114

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Puntos de ebullición de diferentes sustancias.	35
Tabla 2. Valores de la T_g y T_m para distintos polímeros.....	46
Tabla 3. Características de diseño y dispositivos del generador de humo	50
Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas del glicerol a diferentes temperaturas.....	53
Tabla 5. Densidad de la glicerina a diferentes temperaturas	54
Tabla 6. Composición del Ferroníquel.....	54
Tabla 7. Propiedades del ferroníquel.....	55
Tabla 8. Condiciones del fluido	55
Tabla 9. Parámetros del túnel de viento y del rastrillo utilizado.....	56
Tabla 10. Número de Nusselt adquirido de transferencia de calor de Cengel.....	60
Tabla 11. Valores hallados con 5 agujeros de rastrillo	65
Tabla 12. Valores hallados con 9 agujeros de rastrillo	65
Tabla 13. Emisividad de algunos materiales a 300K	66
Tabla 14. Propiedades del aire	68
Tabla 15. Propiedades del teflón como aislante a 20°C.....	69
Tabla 16. Datos del ducto.....	69
Tabla 17. Propiedades del cobre a 20°C	70
Tabla 18. Pérdida de calor por convección forzada sin teflón	70
Tabla 19. Pérdida de calor por convección forzada con teflón como aislante	71
Tabla 20. Porcentaje ahorrado en la pérdida de calor	71
Tabla 21. Resistividad de algunos metales.....	73
Tabla 22. Coeficiente de temperatura α de algunas sustancias	74
Tabla 23. Características de aleación de Fe-Cr-Al.....	75
Tabla 24. Piezas del generador diseñadas en SolidWorks	78
Tabla 25. Datos del túnel de viento.....	86
Tabla 26. Parámetros de análisis de la calidad de malla para cilindro circular.....	89
Tabla 27. Parámetros de análisis de la calidad de malla para barra cuadrada.....	90
Tabla 28. Clasificación de Y^+ según la Nasa (datos tomados de AIAA 2008)	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Auto de líneas: esquema del montaje del método de inyección de humo	26
Figura 2. Visualización de flujo utilizando la técnica de hilo de humo	27
Figura 3. Hielo en humo seco a la salida.....	27
Figura 4. Humo pirotécnico blanco.....	28
Figura 5. Generador de humo comercial: Humo comercial bajo un sistema de resistencia para calentar el humo	28
Figura 6. Perfil aerodinámico.....	30
Figura 7. Capa limite.....	31
Figura 8. Visualización de capa limite en un cilindro.....	32
Figura 9. Desarrollo del perfil de la velocidad en un flujo turbulento en tubo	33
Figura 10. Patrones de flujo bifásico en tuberías horizontales.....	34
Figura 11. Curva de ebullición.....	36
Figura 12. Visualización de flujo en una esfera.....	38
Figura 13. Método laser	38
Figura 14. Dos cilindros.....	39
Figura 15. Visualización de vórtices	40
Figura 16. Visualización de una esfera	41
Figura 17. Visualización de flujo en un túnel de viento.....	41
Figura 18. Visualización de flujos en mecánica computacional	42
Figura 19. a) cuerpo aerodinámico. b) Diferentes generadores de vórtices [3]	42
Figura 20. Clasificación del tipo de flujo sobre un cilindro circular según su número de Reynolds	43
Figura 21. Comportamiento de los vórtices según su número Reynolds a) $Re=150$ y b) $Re=250$	43
Figura 22. Estructura molecular de los polímeros termoplásticos y termoestables	44
Figura 23. Efectos de la temperatura en los materiales.....	45
Figura 24. Determinación de la transición vítrea y temperaturas de fusión cristalina por cambios en el volumen específico.....	46
Figura 25. Esquema de un generador de humo sin ventilador de extracción.....	47
Figura 26. Generador de humo con ventilador de extracción	48
Figura 27. Resistencia sumergida en el fluido	49
Figura 28. Recipiente del combustible.....	50
Figura 29. Recipiente hecho de acero inoxidable con una salida en la parte de abajo y entrada del líquido por arriba.....	50
Figura 30. Mini-bomba vertical	50
Figura 31. Mini-Bomba. Sumergible tipo industrial, trabajo continuo	50
Figura 32. Mini-bomba no sumergible, semiindustrial	50
Figura 33. Caída del fluido del recipiente por gravedad	50
Figura 34. Mini-extractor centrifugo.....	50
Figura 35. Fuente de poder regulador de voltaje dimmer 4000W, 220v AC.....	51
Figura 36. Voltímetro amperímetro digital AC 50-500 V 100 ^a	51
Figura 37. Transformador de corriente AC a DC para la mini-bomba	51
Figura 38. Modulo controlador de velocidad PWM de 0-28 v 3 ^a DC.....	51
Figura 39. Mini voltímetro y amperímetro digital 100v 10A DC	51

Figura 40. Resistencia térmica	51
Figura 41. Resistencia eléctrica de 2000W corriente AC 220 V	51
Figura 42. Mechero bunsen	51
Figura 43. Resistencia secundaria creada a partir de ferroníquel.....	51
Figura 44. Tubo de PVC flexible	52
Figura 45. Tubo capilar	52
Figura 46. Tubo capilar de cobre	52
Figura 47. Manguera de silicona, altas temperatura.....	52
Figura 48. Llave de paso de flujo	52
Figura 49. Aislante térmico de la resistencia.	52
Figura 50. Aislante térmico, soporta temperaturas altas de 300 °C	52
Figura 51. Cinta térmica aislante, 300°	52
Figura 52. Cinta térmica de sosto, 1100 °C	52
Figura 53. Teflón multiusos	52
Figura 54. Termo encogible para instalación eléctrica	52
Figura 55. Cinta eléctrica	52
Figura 56. Pasta disipadora	53
Figura 57. Alambre de cobre.....	53
Figura 58. Esquema del tubo productor de humo	57
Figura 59. sección transversal del ducto que sufre convección forzada	67
Figura 60. Resistencia evaporadora	78
Figura 61. Resistencia secundaria	78
Figura 62. Ducto evaporador.....	78
Figura 63. Ducto de segunda resistencia	78
Figura 64. Desvío de líquido	78
Figura 65. Ducto dirigido al túnel de viento	78
Figura 66. Recipiente del líquido	79
Figura 67. Estructura del equipo	79
Figura 68. Llave de paso de flujo	79
Figura 69. Mini-bomba no sumergible.....	80
Figura 70. Pantalla de mando con sus respectivos reguladores y pantallas	80
Figura 71. Racor doble macho	80
Figura 72. T	80
Figura 73. Equipo ensamblado en SolidWorks	81
Figura 74. resistencia primaria	82
Figura 75. resistencia térmica terminada.....	82
Figura 76. Detalle interno de regulador PWM.	82
Figura 77. a) cinta térmica aislante, 300°C, b) resistencia eléctrica con ferroníquel, c) resistencia térmica secundaria terminada.	83
Figura 78. Ducto envuelto en teflón encargado de llevar el humo al túnel de viento	83
Figura 79. a) y b) Construcción de la estructura para montar los equipos.	84
Figura 80. a) lado de control de temperatura de las resistencias y la bomba b) conexión eléctrica y de las piezas del prototipo	84
Figura 81. Instalación del equipo en el túnel de viento.....	85

Figura 82. Túnel de viento cubierto con plástico negro para mejor la observación de las líneas de flujo	85
Figura 83. Instalación de bombillos led dentro del túnel de viento	85
Figura 84. Velocidad (m/s) vs frecuencia del túnel de viento.....	86
Figura 85. a), b) y c) Pruebas de velocidades con 5, 9 y un agujero.....	87
Figura 86. Selección del Software de simulación de fluidos	88
Figura 87. Dominio computacional a) cilindro circular y b) barra cuadrada.....	89
Figura 88. Malla de la geometría a) malla burda, b) malla media y c) malla fina para cilindro circular, lo mismo para la barra cuadrada	91
Figura 89. Lanzador de Fluent	92
Figura 90. Coeficiente de arrastre para los diferentes tipos de malla	93
Figura 91 . <i>Scaled residuals</i> para los tres en mallados en los dos casos de Reynolds de cilindro circular.....	94
Figura 92. Contorno de velocidad para ambos casos de Reynolds para cilindro circular.....	95
Figura 93. Líneas de velocidad para cilindro circular	96
Figura 94. Contorno de velocidad para ambos casos de Reynolds para la barra cuadrada.....	97
Figura 95. Líneas de velocidad para ambos casos de Reynolds para la barra cuadrada	98
Figura 96. Energía cinética de turbulencia a) Re: 25,4 b) Re: 12, Líneas de velocidad de cilindro circular en el túnel de viento c) Re:25,4 y d) Re:12.....	99
Figura 97. Energía cinética de turbulencia a) Re: 25,4 b) Re: 12, Líneas de velocidad la barra cuadrada en el túnel de viento c) Re:25,4 y d) Re:12	100
Figura 98. Visualización de las líneas de humo	102
Figura 99. Visualización de líneas de humo con una parte cubierta de la cámara de humo.	102
Figura 100. Visualización de líneas de humo	103
Figura 101. Laboratorio después de realizar una prueba con el equipo.....	103
Figura 102. a), b) y c) Comportamiento de líneas de humo a velocidades menores de 12Hz con los tres ductos.....	104
Figura 103. a), b) y c) Visualización de líneas a más de 12Hz	105
Figura 104. Resultados académicos. a) Certificado de participación en REDCOLSI a nivel regional, b) Certificado de participación en REDCOLSI a nivel nacional.	106
Figura 105. a) Carta de aceptación al COIIM 2022 y b) reconocimiento de la participación en el COIIM	107
Figura 106. Plano con su respectiva tabla indicando la cantidad de las piezas que lo forman. ...	114

Diseño y construcción de un generador de humo para visualización de flujo en túnel de viento

Guarry Matacea Zambrano, Juan Pablo Flórez M, Juan Carlos Serrano Rico

Pamplona University, Km 1 Vía B/manga, Pamplona, Colombia

Resumen—En este trabajo se describe el proceso que se llevó a cabo para el diseño y la construcción de un generador de humo para visualizaciones de flujo en un túnel de viento el cual se encuentra en la universidad de pamplona. Se presenta una descripción del análisis de funciones empleados para la selección de los diferentes equipos y dispositivos que conforman el prototipo final de generador del humo. Glicerina fue seleccionada como fluido de trabajo para la generación del vapor introducido en el túnel de viento a través de varios chorros que acompañan las líneas de corriente sobre un cuerpo de prueba. Se realizó unos cálculos previos para la selección de dispositivos. Es incluida una descripción dispositivos comerciales seleccionados y se presenta el montaje final del equipo. Finalmente, imágenes de pruebas de visualización son presentados con una comparación de simulación numérica en ANSYS fluent.

Palabras clave—Túnel de viento, aerodinámica, flujo externo, generador de humo.

Abstract— This paper describes the process that was carried out for the design and construction of a smoke generator for flow visualizations in a wind tunnel located at the University of Pamplona. A description of the analysis of the functions of the employees is presented for the selection of the different equipment and devices that make up the final prototype of the smoke generator. Glycerine was selected as the working fluid for the generation of the steam introduced into the wind tunnel through several jets that accompany the current lines on a test body. Some previous calculations were made for the selection of devices. A description of selected commercial devices is included and the final assembly of the equipment is presented. Finally, display test images are presented with a numerical simulation comparison in ANSYS fluent.

Keywords— Wind tunnel, aerodynamics, external flow, smoke generator.

1. Introducción

En las diversas áreas de estudio donde están implicados análisis aerodinámicos en los que se requiere la visualización del flujo, tales como análisis de tipo estructural, para determinar el comportamiento de puentes colgantes y edificios altos al momento de ser interceptados perpendicularmente por el viento (Ma et al., 2020), la estabilidad y seguridad de trenes de carga (Xia et al., 2021), el rendimiento y desarrollo de tecnologías deportivas (Bäckström et al., 2016), la exactitud de predicciones del comportamiento de la resistencia del aire en vehículos (Fitzgerald et al., 2020) y el efecto causado por la turbulencia de flujo en diferentes geometrías (Zhao et al., 2021).

Existen diversos métodos para la medición y visualización de flujo, como el anemómetro de hilo y película caliente, la erosión de arena, la termografía infrarroja y la velocimetría de imagen de partículas. Sin embargo, para los anemómetros de hilo y película de temperatura ambiente, existen desventajas como lo son su fragilidad, además requieren alta pureza del fluido, tienen una baja sensibilidad a los cambios de temperaturas ambientes y deben ser calibrados continuamente. La erosión de arena a pesar de ser un método de bajo costo, no obstante, tiene baja precisión para regiones de alta turbulencia, además que requiere de precauciones con el tipo y tamaño de las partículas. Termografía infrarroja y la velocimetría de imagen de partículas, a su vez requieren de un complejo montaje experimental y que debe ser nuevamente adaptado al tipo de ensayo, junto con un alto costo de los dispositivos (Blocken et al., 2016).

Una de las técnicas más efectivas para la visualización de flujo, es la de generación de humo, ya que permite producir una imagen macroscópica cualitativa del campo de flujo en general, a comparación de las otras técnicas que se limitan solo un punto en específico. Además, la generación de humo es una técnica que se caracteriza por su bajo costo de construcción y montaje (Shamsuddin & Kamaruddin, 2020) (Libardo et al., 2014). En este trabajo es presentado el

proceso de diseño de producto partiendo del concepto, las técnicas de análisis de funciones y construcción de un generador de humo para visualización de flujo en túnel de viento.

2. Metodología

En la elaboración del concepto de este equipo fue realizando un análisis de funciones, seguidamente fue realizada una etapa de diseño empleando modelos matemáticos disponibles en la literatura. Fueron seleccionados diferentes dispositivos comerciales de bajo costo y reducido mantenimiento que consiguieran cumplir con las funciones principales y secundarias del dispositivo.

2.1. Análisis de funciones

El análisis conceptual del generador de humo permitió identificar las siguientes funciones y los equipos genéricos que deben ser empleados para su ejecución:

- Almacenar el fluido de trabajo – Deposito de fluido.
- Impulsar el fluido productor de humo desde el tanque hasta el recipiente de humo – Bomba.
- Transportar fluido de trabajo – Tubería de cobre
- Regular el flujo de alimentación del fluido de trabajo a través de la bomba.
- Calentar el fluido de trabajo hasta su evaporación -Resistencia para incrementar la temperatura del fluido productor de humo.
- Regular la temperatura en la resistencia encargada de evaporar el fluido de trabajo
- Compensar perdidas de calor a través del ducto de entrega del humo en el túnel de viento para evitar la condensación del fluido de trabajo (Baja temperatura ambiente de pamplona) - Resistencia ubicada en el tubo capilar que es encargado de llevar el humo al túnel de viento.
- Regular la temperatura de la resistencia secundaria en el ducto de entrega del humo en el túnel de viento- regulador de potencia eléctrica en la resistencia.

2.2. Modelos matemáticos empleados

2.2.1. Determinación de la longitud del tubo evaporador

Se calculó el calor necesario para corresponder con los parámetros del túnel de viento, este proceso se realiza en dos pasos. Primero se calcula el calor sensible para hallar la distancia de la resistencia térmica; la finalidad de esta resistencia es convertir el flujo líquido a el flujo saturado. En secuencia, se calcula el flujo de calor necesario para evaporar el líquido (figura 1). En este trabajo fueron usadas versiones recientes de correlaciones para los factores del abordaje propuesto por Chen (1966) para mejorar los resultados al trabajar con la glicerina.

2.2.2. Calor de vaporización y calor sensible del punto inicial a ebullición

La ecuación (1) para calcular el calor de vaporización y de la ecuación (2) para el calor sensible.

$$Q = \dot{m}_t \cdot h_{fg} \quad (1)$$

Donde Q es el calor de vaporización en (W)

$\dot{m}_t$ es el flujo masico total del humo que sale por los 5 orificios del tubo capilar en (kg/s)

h_{fg} es el calor latente del vapor en $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$.

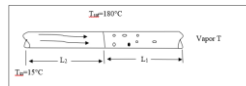


Figura 1. Esquema del tubo productor de humo

$$Q_2 = \dot{m} C_p T_{prom} \Delta T = \dot{m} C_p (T_{sat} - T_{in.}) \quad (2)$$

Donde C_p es el calor específico en $\frac{J}{kg^\circ C}$.

Q_2 es el calor sensible en (W)

T_{sat} temperatura de saturación en $^\circ C$.

T_{in} temperatura de entrada en $^\circ C$.

2.2.3. Distancia de calor sensible L_2

Se identifica para flujo interno el número de Reynolds para determinar el tipo de flujo y a su vez es calculado el coeficiente de transferencia de calor h_2 (W/m²°C) de convección forzada, que servirá para el cálculo de L_2 ecuación (4) Se identifica el número de Reynolds que el flujo es laminar. Para el cálculo de la transferencia de calor por convección es estimado el número de Nusselt para un flujo de calor constante y así calcular la longitud que se debe utilizar para disipar este calor.

$$Nu = \frac{hD_h}{K} = 4.36 \quad (3)$$

h_2 es el coeficiente de transferencia de calor es (W/m²°C).

D_h es el diámetro hidráulico del ducto en (m).

k es la conductividad térmica en (W/m°C).

$$Q_2 = h_2 \pi D L_2 (T_{sat} - T_{in}) \quad (4)$$

2.2.4. Distancia de calor de vaporización L_1

Se procede hallar el coeficiente de transferencia de calor h_1 ($\frac{W}{m^2^\circ C}$) del evaporador para poder hallar la distancia L_1 ecuación (11). Para hallar esta distancia de la resistencia térmica en el punto de vaporización se utilizó la correlación de Chen (1966)

$$h_e = h_{evap} + h_{adv} \quad (5)$$

Donde h_e es el coeficiente de transferencia de calor en el evaporador en (W/m²°C).

h_{evap} es el coeficiente de evaporación en (W/m²°C)

h_{adv} es el coeficiente de convección en (W/m²°C)

Se conoce también las constantes que maneja esta correlación, X_{tt} es el parámetro turbulento-turbulento de Martinelli. (Mostafa Ghiaasiaan, 2007) y El factor F es la relación entre el número de Reynolds del flujo de dos fases y el número de Reynolds del flujo de líquido. S se la propuesta por Bennett y Chen (1980). (Mostafa Ghiaasiaan, 2007).

$$X_{tt} = \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0,5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_v}\right)^{0,1} \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,9} \quad (6)$$

$$F = \left(\frac{Pr_l + 1}{2}\right)^{0,444} (1 + X_{tt}^{-0,5})^{1,78} \quad (7)$$

La componente del coeficiente de transferencia de calor para la convección forzada se encuentra a partir de la Ec. (9)

$$h_{adv} = 0,023 \left(\frac{k_l}{D_h}\right) Re_l^{0,8} Pr_l^{0,4} F \quad (8)$$

Donde Re_l es el número de Reynolds del líquido y Pr_l es el número de Prandtl de la fase líquida.

$$S = 0,9622 - 0,582 \tan^{-1} \left(\frac{Re_l F^{1,25}}{6,18 \cdot 10^4}\right) \quad (9)$$

$$h_{evap} = 0,00122 \left\{ \frac{K_l^{0,79} c_{p_l}^{0,45} \rho_l^{0,49} \{g_c\}^{0,43}}{\sigma^{0,5} \mu_l^{0,29} h_{fg}^{0,24} \rho_v^{0,24}} \right\} \Delta T_{sat}^{0,24} \Delta P_{sat}^{0,75} S \quad (10)$$

$\{g_c\}^{0,43}$ solo se utiliza para unidades inglesas.

σ es la tensión superficial en (N/m).

μ_l es la viscosidad dinámica del líquido en (kg/ms).

ρ_v densidad del vapor a presión constante en (kg/m³).

h_{fg} es el calor latente de vaporización en (J/kg).

$T_{w,e}$ es la temperatura superficial del evaporador en (K).

T_{sat} es la temperatura de saturación del el líquido fluido en (K).

P_{sat} es la presión de saturación en (Pa).

$$Q_1 = hA(T - T_{sat}) = h\pi DL_1(T - T_{sat}) \quad (11)$$

2.2.5. Pérdida de calor por convección natural y por convección forzada

Antes de ser dirigido el vapor al túnel de viento este pasa por un ducto donde sufre una pérdida de calor por convección natural, radiación y la convección forzada generada por la corriente de aire. El modelo físico empleado para este problema es presentado en la Figura 2.

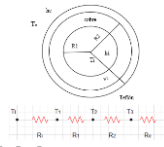


Figura 2. Sección transversal del ducto que sufre convección forzada

2.2.6. Determinación de la resistencia eléctrica evaporadora y secundaria

Resulta pertinente calcular el valor exacto de las resistencias al momento de alcanzar la temperatura del punto de ebullición de la glicerina, con el fin de no superar este valor de temperatura de forma excesiva y causar daños colaterales en el generador de humo.

Los cálculos que se realizaron son de utilidad para la compra de partes y construcción del equipo con el fin de no tener gastos innecesarios según su funciones, también ayudan para solucionar obstáculos que se presentaron en la instalación del equipo, como la convección forzada. La correlación que se utiliza para la evaporización se escogió por su facilidad de entendimiento y a la alta gama de fluidos que es utilizada, además tiene una serie de variables que son halladas de manera concreta.

2.3. Materiales.

Con los datos obtenidos a partir de la capacidad del túnel de viento se empieza con la construcción del prototipo del generador de humo. Las piezas son adquiridas de manera comercial o dado el caso son construidas. A continuación, se presenta una Tabla 1. Características de diseño y dispositivos del generador de humo de las piezas principales para la generación del humo

Tabla 1. Características de diseño y dispositivos del generador de humo

Dispositivo: Recipiente de fluido	Función: Almacenar fluido en estado de líquido.
	

Figura 3. Recipiente hecho de acero inoxidable con una salida en la parte de abajo y entrada del líquido por arriba.

Dispositivo: Encargado de transportar el fluido		Función: impulsar fluido	
 Figura 4. Mini-bomba no sumergible Mini-bomba no sumergible, semi-industrial, trabajo continuo, variable Fuente: (mercado libre 2022)			
Dispositivo: encargado de dirigir el fluido		Descripción: Función: dirigir fluido	
 Figura 5. Tubo capilar de cobre		 Figura 6. Manguera de silicona para altas temperaturas	
Dispositivo: Encargado de regular la temperatura de las resistencias eléctricas		Función: Regular y energizar las resistencias eléctricas	
 Figura 7. Fuente de poder regulador de voltaje dimmer 4000W, AC	 Figura 8. Modulo controlador de velocidad PWM de 0-28 v 3ª DC	 Figura 9. voltímetro amperímetro digital AC 50-500 V 100 A	
Dispositivo: Regulador de flujo del líquido		Función: Regular el flujo en estado líquido	
 Figura 10. Convertidor de corriente AC a DC para la mini-bomba		 Figura 11. Mini voltímetro y amperímetro digital 100v 10A DC	
Dispositivo: Encargado de evaporar fluido		Funcion: Llevar el fluido de estado líquido a vapor	
 Figura 12. Mini voltímetro y amperímetro digital		 Figura 13. Ferroniquel	

Cuando hablamos de humo de generadores de humo, nos referimos no solo al humo producto de combustión, sino también al vapor, a la neblina y a aerosoles, pues debe de cumplir con la condición de servir como trazador de las líneas de flujo, y también debe de ser neutro, es decir, no debe de ser toxico, poseer bajas velocidades de mezcla con el fluido principal (Merzkirch, 1987). De acuerdo con estas indicaciones fue seleccionada la glicerina como fluido de trabajo.

2.4. Construcción del prototipo

En esta sección es presentada una descripción del proceso de fabricación de los principales componentes empelados en la construcción del prototipo de generador de humo propuesto. En la Figura 14 se presenta el detalle de elaboración de la resistencia principal responsable por el calentamiento y evaporación del fluido de trabajo.



Figura 14. resistencia primaria

La resistencia es acoplada al tubo de transporte de fluido empleador soldadura de oxiacetilénica. Luego se procede a rellenar con pasta térmica los espacios vacíos (sin soldadura) para aumentar la conducción de calor, alrededor del conjunto tubo-resistencia eléctrica se enrolla alambre de cobre con el mismo propósito como se observa en la 15. Seguidamente, se cubre todo el montaje con cinta térmica que soporta 1100 °C con el fin de aislar del ambiente. Finalmente es colocada una cubierta de teflón sobre la cinta térmica fabricada de fibra de vidrio para evitar el contacto con el operador como se muestra en la Figura 15.



Figura 15: resistencia térmica terminada

Luego se procede a la conexión del PWM con la bomba elegida para impulsar el fluido de trabajo, esto con el fin de regular la cantidad de flujo a evaporar según sea requerido por el túnel de viento como se observa en la Figura 16.



Figura 16: Detalle interno de regulador PWM.

Fuente: Autor

Para compensar las pérdidas de calor con el ambiente en las líneas de vapor es adicionada una segunda resistencia basada en un alambre de ferroníquel. Primero se aísla el ducto encargado de llevar el humo con cinta térmica que se muestra en la Figura 17 a), para luego enrollar el ferroníquel y crear una resistencia encargada de evitar la condensación del humo hasta su inyección en el túnel de viento, mostrada en la Figura 17 b). La resistencia es cubierta por cinta térmica con el fin de aislarla térmicamente y seguido de una cubierta de teflón como descrito para la resistencia evaporadora (Ver Figura 17 c)).

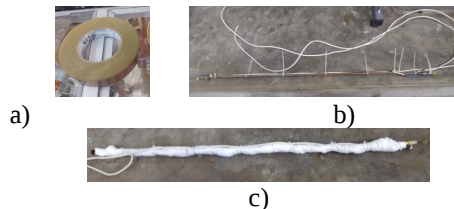


Figura 17. a) cinta térmica aislante, 300°C, b) resistencia eléctrica con ferroníquel, c) resistencia térmica secundaria terminada.

Se realiza conexiones del recipiente de almacenamiento del líquido hasta la bomba. La bomba es a su vez conectada a una válvula manual que actúa como un segundo controlador del flujo que va para la resistencia primaria. Una segunda resistencia es instalada en la tubería que transportar el vapor hasta el túnel de viento. La tubería final que contiene los agujeros de inyección es aislada por medio de un recubrimiento de cinta de teflón para evitar las pérdidas de calor por la convección forzada que sufre por las velocidades del túnel de viento como se observa en la Figura 18.



Figura 18. Ducto envuelto en teflón encargado de llevar el humo al túnel de viento

Se procede a realizar las conexiones eléctricas para el control térmico de las dos resistencias y de la bomba, a cada conexión se le implanta un fusible para evitar daños a las partes del equipo por una sobrecarga o cualquier incidente,

esto con todo el equipo de seguridad y los materiales requeridos para el aislamiento eléctrico. Las dos resistencias y la bomba se dejan con pantalla led de acuerdo a su corriente AC y DC con el fin de poder controlar la velocidad de la bomba y temperatura de estas nos basamos en el voltaje y la corriente. De aquí sacamos la cantidad de calor que se le está añadiendo al líquido, en la figura Figura 80. a) lado de control de temperatura de las resistencias y la bomba se muestra la pantalla principal para el control y las conexiones eléctricas.

Sin olvidar lo menos importante pero vital tenemos la estructura en donde se ponen las piezas en la figura se observa la construcción de la estructura.



Figura 19. a) y b) Construcción de la estructura donde se va distribuir los equipos.

Una vez realizado lo anterior se procede a distribuir los equipos y la parte reguladora en una estructura construida anteriormente.

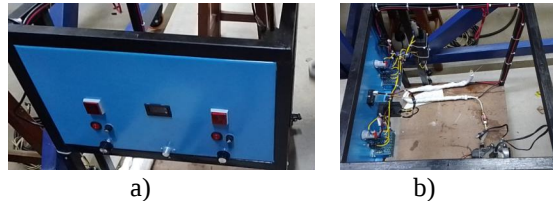


Figura 20. a) mando de control de las resistencias y la bomba b) conexión eléctrica y de las piezas del prototipo

3. Resultados

Como resultados obtenidos se obtiene un generador de humo construido con piezas comerciales, como se observa en la Figura 21.

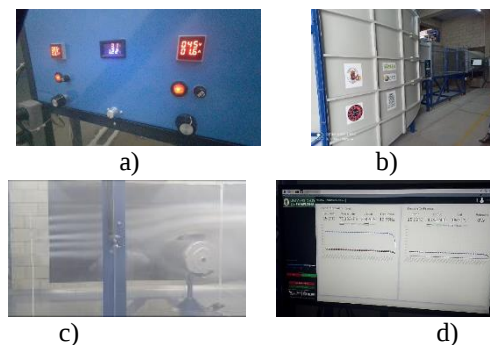


Figura 21. a) Generador de humo encendido en pruebas en el túnel de viento de la Universidad de pamplona, b) Túnel de viento, c) y d) pruebas a diferentes velocidades

4. Discusiones y conclusiones

El desarrollo del presente trabajo permitió identificar las siguientes conclusiones:

Del seguimiento de una metodología de desarrollo de producto basado en el análisis de funciones permitió obtener un equipo que cumple actualmente con los requisitos de operación y la visualización de flujos en el túnel de viento. Durante las pruebas y cálculos de diseño no incluidos en la presente publicación se identificó la importancia de la

temperatura ambiente en la operación del dispositivo, una vez que las condiciones climáticas de la ciudad de Pamplona producen pérdida de calor importantes que pueden causar la condensación del fluido de trabajo en el momento de la inyección a la corriente de aire del túnel. Además del efecto de la convección forzada inserida por el flujo del aire del túnel a velocidades altas (aprox. 10 m/s).

En el proceso de selección de las piezas y componentes es importante que sean comercialmente conocidas, esto facilita su reemplazo en caso de una avería.

La glicerina mostro ser un fluido de trabajo adecuado para la aplicación de generación de humo como recomendado en trabajos de la literatura, por su alto punto de inflamabilidad, menor riesgo de toxicidad y menor riesgo de contaminación del túnel de viento.

Agradecimientos

Lo autores expresa sus agradecimientos a la universidad de Pamplona por el apoyo logístico en equipos para el desarrollo del presente trabajo. El primer autor también expresa su agradecimiento a sus padres Eder Matacea y Adriana Zambrano por el apoyo económico y personal para la construcción del prototipo. Agradece a los profesores, Juan Pablo Flórez M. y Juan Carlos Serrano R. por su apoyo en desarrollo teórico, técnico, montaje y elaboración en cada una de sus etapas del equipo.

5. Referencia

- Bäckström, M., Carlsson, P., Danvind, J., Koptug, A., Sundström, D., & Tinnsten, M. (2016). A New Wind Tunnel Facility Dedicated to Sports Technology Research and Development. *Procedia Engineering*, 147, 62–67. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.190>
- Blocken, B., Stathopoulos, T., & van Beeck, J. P. A. J. (2016). Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment. *Building and Environment*, 100, 50–81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.004>
- Fitzgerald, S., Kelso, R., Grimshaw, P., & Warr, A. (2020). *Observations of the flow experienced by a track cyclist using velodrome, wind tunnel, and potential flow investigations with an instrumented bicycle*. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104374>
- Libardo, C., Sierra, H., Jahir, J., Molano, G., David, J., & Coca, T. (2014). *ESTUDIO SOBRE TÉCNICAS DE VISUALIZACIÓN Y MEDICIÓN DE FLUJO PARA SU USO DENTRO DEL TÚNEL DE VIENTO ACTUAL DE LA UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA*.
- Ma, C., Pei, C., Liao, H. li, Liu, M., & Li, M. (2020). Field measurement and wind tunnel study of aerodynamic characteristics of twin-box girder. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 202, 104209. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104209>
- Merzkirch, W. (1987). *REPORT DOCUMENTATION PAGE 1. Recipient's Reference 2. Originator's Reference*.
- Shamsuddin, M. S. M., & Kamaruddin, N. M. (2020). Design and Development of a Small-Scale Wind Tunnel for Flow Visualization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 920(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/920/1/012001>
- Xia, Y., Liu, T., Li, W., Dong, X., Chen, Z., & Guo, Z. (2021). Numerical comparisons of the aerodynamic performances of wind-tunnel train models with different inter-carriage gap spacings under crosswind. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104680>
- Zhao, C., Wang, H., Zeng, L., Alam, M. M., & Zhao, X. (2021). Effects of oncoming flow turbulence on the near wake and forces of a 3D square cylinder. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 214(January), 104674. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104674>

1. INTRODUCCIÓN

En las diversas áreas de estudio donde están implicados análisis aerodinámicos se requiere la visualización del flujo, tales como análisis de tipo estructural, para determinar el comportamiento de puentes colgantes y edificios altos al momento de ser interceptados perpendicularmente por el viento (Ma et al., 2020), la estabilidad y seguridad de trenes de carga (Xia et al., 2021), el rendimiento y desarrollo de tecnologías deportivas (Bäckström et al., 2016), la exactitud de predicciones del comportamiento de la resistencia del aire en vehículos (Fitzgerald et al., 2020) y el efecto causado por la turbulencia de flujo en diferentes geometrías (Zhao et al., 2021).

En este proyecto se planea desarrollar un generador de humo para apoyar las investigaciones actuales y futuras en el área de la aerodinámica. El dispositivo permitirá visualizar el flujo de aire en la cámara de pruebas de un túnel de viento, mejorando el análisis de múltiples estudios en una amplia gama de geometrías y aplicaciones. Para el diseño, construcción e instalación del dispositivo, se parte de la conceptualización del generador de humo, analizando cuál es el diseño adecuado de acuerdo con las condiciones y necesidades propias del túnel de viento; posteriormente, se definen los parámetros geométricos del dispositivo a partir de la geometría del túnel y las variables que se desean controlar en la generación de humo. Con base a estos parámetros, se definieron los materiales y procesos adecuados para la fabricación y montaje del dispositivo. Después del montaje, se realizaron pruebas en diferentes condiciones de flujo en el túnel de viento y para una geometría cilíndrica. Finalmente, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos de las pruebas experimentales, con los resultados computacionales, generados mediante una simulación en ANSYS Fluent.

1.1 JUSTIFICACIÓN

Existen diversos métodos para la medición y visualización de flujo como: el anemómetro de hilo, película caliente, la erosión de arena, la termografía infrarroja y la velocimetría de imagen de partículas. Sin embargo, para los anemómetros de hilo y película de temperatura ambiente, existen desventajas como lo son su fragilidad, además requieren alta pureza del fluido, tienen una baja sensibilidad a los cambios de temperaturas ambientes y deben ser calibrados continuamente. La erosión de arena a pesar de ser un método de bajo costo, no obstante, tiene baja precisión para regiones de alta turbulencia, además que requiere de precauciones con el tipo y tamaño de las partículas. La termografía infrarroja y la velocimetría de imagen de partículas, requieren de un complejo montaje experimental que debe ser nuevamente adaptado al tipo de ensayo, junto con un alto costo de los dispositivos (Blocken et al., 2016).

Una de las técnicas más efectivas para la visualización de flujo, es la de generación de humo, ya que permite producir una imagen macroscópica cualitativa del campo de flujo en general, a comparación de las otras técnicas que se limitan solo a un punto en específico. Además, la generación de humo es una técnica que se caracteriza por su bajo costo de construcción y montaje (Libardo et al., 2014). Con la construcción de este dispositivo, se buscó complementar la

funcionalidad del túnel de viento disponible en el laboratorio de fluidos de la Universidad de Pamplona, tal que, con la implementación de esta técnica, sea posible visualizar el comportamiento del flujo sobre diferentes objetos de prueba en las actividades investigativas.

Con la implementación de este dispositivo, serán beneficiados los estudiantes y grupos de investigación concernientes a la aerodinámica y demás disciplinas que requieran de su uso. Así como promover al interés por parte de las diferentes áreas de investigación relacionadas, para el estudio y construcción de modelos a escala y para la mejora de la calidad de prototipos fabricados a nivel nacional. Entre las principales ventajas de la visualización de flujos, se pueden encontrar el diseño de aeronaves y sus componentes, el análisis de las líneas de flujo del aire, la predicción del desempeño aerodinámico de modelos geométricos, la detección de vórtices y ondas de choque y el desprendimiento de la capa límite. (Nuñez & Córdoba, 2014).

1.2 OBJETIVOS

El desarrollo de este proyecto parte de un objetivo general el cual es cumplido de unos objetivos específicos que se detallan a continuación:

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un generador de humo para la visualización de flujos en un túnel de viento de circuito abierto del laboratorio de fluidos de la Universidad de Pamplona.

1.2.2 Objetivos específicos

- ✓ Conceptualizar un generador de humo basado en los requisitos de flujo del túnel de viento.
- ✓ Definir los parámetros geométricos y materiales para la construcción del equipo propuesto.
- ✓ Construir un prototipo de generador de humo.
- ✓ Operacionalizar el prototipo para diferentes condiciones de prueba en el túnel de viento sobre diversas geometrías.
- ✓ Comparar los resultados de visualización con una simulación numérica.

Para el desarrollo de este proyecto, en el capítulo 1 se presenta la justificación para la ejecución del presente proyecto y los objetivos que se propusieron para el cumplimiento del mismo, el capítulo 2 con la apropiación teórica del generador de humo, es decir, antecedentes, fenómenos físicos que rigen el dispositivo, clasificaciones comerciales, técnicas de visualización del humo comunes. En el capítulo 3, se muestra la metodología para la selección del dispositivo desde cada uno de sus sistemas. Posteriormente en el capítulo 4, se toman como resultados del proyecto todos los prototipos creados en el proceso de construcción, desde la creación del modelo CAD, la construcción del modelo funcional, por último, el montaje e instalación en el túnel de viento. El documento continúa al capítulo 5, en donde se discuten los resultados obtenidos del prototipo, del montaje y de la instalación, es decir, si se visualizan los perfiles de forma adecuada, si el dispositivo

funciona de forma correcta, entre otras. Por último, en el capítulo 6 se realizan conclusiones desde el punto de vista de la mecánica de fluidos a cerca del adecuado funcionamiento del dispositivo en el análisis de pruebas al interior del túnel de viento.

2. ESTADO ACTUAL

2.1 ANTECEDENTES

1. Trinder and Jabbal (2013) en su trabajo titulado “Desarrollo de un sistema de visualización de humo para experimentos de laboratorio en túneles de viento”, que tenía como objetivo principal visualizar el humo en experimentos de laboratorio, utilizaron la siguiente metodología: 1) recolección de información de sistema de visualizaciones de humo; 2) diseño de los rastrillos de humo para mejor visualizaciones; 3) renderizado de SolidWorks de la sección de pruebas y el rastrillo de humo; 4) instalación del generador de humo y del sistema de visualizaciones ; 5) recolección de información del comportamiento de las líneas de humo a diferentes velocidades; La instalación demostró ser una adquisición económica para apoyar otros proyectos de investigación y para la enseñanza de las prácticas de su laboratorio aeroespacial (Trinder & Jabbal, 2013).
2. Delgado, Hassan, and Anand (2019), en su trabajo titulado “Estudio de visualización de flujo experimental utilizando velocimetría de imagen de partículas en un generador de vapor de bobina helicoidal con geometría de paso lateral cambiante”, tuvieron como objetivo principal, estudiar los componentes de la velocidad vertical y transversal promedio, este trabajo fue realizado de acuerdo a la siguiente metodología: 1) Búsqueda de toda información disponible sobre el generador de vapor de bobina helicoidal y visualización del flujo; 2) Desarrollo del generador de vapor de bobina helicoidal y la instalación para realizar las pruebas de visualización de flujo; 3) Toma de datos de las diferentes pruebas; el análisis demuestra que los componentes de la velocidad entre la primera lineal del perfil y las líneas centrales no evidencian cambios significativos en su fuerza y velocidad, pero si muestran un aumento en la tensión de Reynolds (Delgado et al., 2019).
3. Kareem, Abbas, and Khammas (2021), en su investigación titulado, “Estudio aerodinámico de la sección de contracción del túnel de viento a baja velocidad: diseño y fabricación”, que tuvo como objetivo principal mejorar la visualización de un túnel de humo subsónico tipo sección abierta, que se encontraba en el Laboratorio del Departamento de Mecánica de la Universidad AL-Nahrain, estos autores utilizaron la siguiente metodología: 1) Revisión de trabajos pasados a lo que respecta la visualización de flujo en túneles de viento; 2) Realización de estudios numéricos en el programa de ANSYS FLUENT R19.0 y algunos matemáticos; 3) En la secuencia desarrollaron un trabajo experimental, construyendo: el generador de humo y el túnel de viento esta etapa concluyó una calibración del túnel de humo con un anemómetro; 4) Recolección y análisis de datos. El resultado final de la

visualización mostró una mejora significativa en el rendimiento del túnel, la parte numérica dio a conocer una ventaja para el perfil de noveno orden con punto de inflexión de 0.65L (L, largo del cono de contracción), para explicar esto se puede decir, el perfil de la contracción del túnel de viento se determina mediante modelos matemáticos ya definidos experimentalmente que implementan ecuaciones polinomiales de distinto orden, estas ecuaciones ya traen definidos sus factores polinomiales en tablas, y el punto de inflexión es una distancia en el plano horizontal en la cual las curvaturas de la contracción del cono se unen suavemente a fin de evitar turbulencias causadas al reducir el área. (Alaa A et al., 2021).

4. Purwanto, Andary, and Hartono (2019), en su trabajo titulado “diseño de túnel de viento con generador de humo sobre aerodinámica de vehículos”, el objetivo general es proporcionar conocimientos prácticos a los estudiantes para utilizarse como nueva información en el mundo de la ingeniería y aprendizaje sobre el flujo de aire, utilizó la siguiente metodología; 1) adquirir información sobre túneles de viento subsónicos; 2) diseñar y construir el túnel de viento y un generador de humo; 3) se obtienen datos a partir de pruebas experimentales utilizando un anemómetro, las pruebas demostraron que de acuerdo a la potencia de succión se verán claramente los flujos de visualizaciones proporcionalmente a la cantidad de humo producido (Purwanto et al., 2019).
5. Parker and Brusset (1976), en su aporte científico titulado “nuevo generador de humo para flujo visualización a baja velocidad en un túnel de viento”, el objetivo principal fue crear un generador de humo que no fuera tóxico para el operario y el ambiente, manejo la siguiente metodología: 1) Revisión de todos los tipos de generadores de humo; 2) Descripción de la función del sistema y los procedimientos para construirlo; 3) Realización de pruebas correspondientes para analizar los resultados junto con un estudio matemático y así teorizar la función del generador de humo, se creó un nuevo generador de humo que era eficiente para visualizar el flujo dentro de un túnel de viento, siendo amigable con el ambiente y al cuerpo humano (Parker & Brusset, 1976).
6. Shamsuddin and Kamaruddin (2020), en su trabajo titulado “Diseño y desarrollo de un túnel de viento a pequeña escala para visualización de flujo”, su objetivo principal es de diseñar y construir un túnel de viento a pequeña escala mostrando de manera efectiva la visualización de flujo, utilizaron la siguiente metodología: 1) investigación de todo lo que tuviera que ver con el túnel de viento desde su diseño hasta el sistema de generar humo; 2) realizar el diseño y la construcción del túnel de viento, el generador de humo y el sistema de visualización del flujo, 3) análisis de datos de las pruebas de ensayo, se construyó el túnel de viento y el generador de humo, logrando así que el sistema de visualización de

humos mostrara con éxito las líneas de rayas de humo para un perfil aerodinámico que representa el comportamiento aerodinámico clásico (Shamsuddin & Kamaruddin, 2020).

7. Terry Beck, Anderson, and Hosni (2008), en su publicación titulada “una configuración de túnel de viento educativo simple para la visualización de flujos de flujo de conductos y separación de capas límite de boquilla / difusor”, el objetivo principal de la actividad de laboratorio fue demostrar las características del flujo de ductos de área variable y la separación de la capa límite del difusor utilizando visualización de flujo mediante inyección de humo, se utilizó la siguiente metodología: 1) se argumentan de las funciones del túnel de viento y el generador de humo; 2) se realiza modificaciones a la región de la sección de la prueba del viento, o configuración en el sistema de visualizaciones de flujo; 3) se realiza también el sistema de rastrillo para mejor visualización en la capa límite; 4) posterior a la instalación del túnel de viento con el generador de humo; 5) análisis de los resultados de las pruebas realizadas; se logró que el túnel de viento fuera completamente útil para cursos de estudiantes de pregrado, y posgrados que se ocupen de fenómenos de separación de capas límite, además de presentarse un método económico para construir modelos de conductos internos simples y funcionales, que podrían incorporarse en prácticamente cualquier instalación educativa de túnel de viento. También se probó buenos resultados al usarse el rastrillo de humo (Terry Beck et al., 2008).

2.2 MARCO TEÓRICO

Los instrumentos de visualización en los túneles de vientos son ahora una herramienta estándar, y el desarrollo de las técnicas de visualización está principalmente enfocado en la implementación en túneles de viento. Un aporte importante en esta técnica ha sido desarrollado por Brown de la universidad de Notre Dame quien fue el desarrollador del sistema de generación de humo para visualización de flujos externos sobre objetos de prueba (Merzkirch, 1987).

Cuando hablamos de generadores de humo, nos referimos no solo al humo producto de combustión, sino también al vapor, a la neblina y aerosoles, pues debe de cumplir con la condición de servir como trazador de las líneas de flujo, y también debe de ser neutro, es decir, no debe de ser toxico, poseer bajas velocidades de mezcla con el fluido principal (Merzkirch, 1987). En la Figura 1 se puede observar la implementación del humo en un túnel de viento implementado para el análisis de un automóvil de alta velocidad.

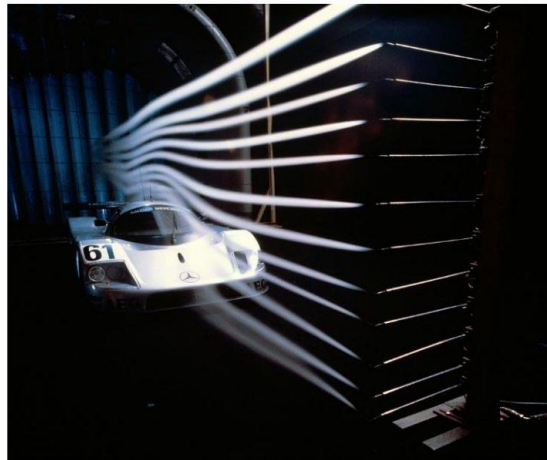


Figura 1. Auto de líneas: esquema del montaje del método de inyección de humo
Fuente: (Merzkirch, 1987)

La producción de humo por combustión se da principalmente con: madera, paja y tabaco. La producción de humo sin combustión se da al vaporizar aceites minerales; la neblina es producida como reacción de diversas sustancias químicas y vapores condensados que producen la niebla, a excepción de esta última, las demás sustancias tienen un cierto grado de toxicidad. La densidad de estos trazadores es mayor que la del aire, pero como el tamaño de los trazadores es pequeño ($1\ \mu\text{m}$) no se dan los efectos de sedimentación y la difusión del humo en el aire es alta, por lo cual, los trazos solo pueden identificarse de forma definida solo en flujo laminar (Merzkirch, 1987).

El humo de cigarrillo es el que forma las líneas más finas para trazar el flujo, sin embargo, no resulta ser la mejor elección para un túnel de viento. También, la neblina de queroseno es ampliamente utilizada en la producción de humo para túneles de viento. La generación de neblina de dióxido de titanio (TiO_2) a partir de Tetracloruro de titanio (TiCl_4) no es un método de generación de humo por inyección, sino un método de producción controlada químicamente del material trazador. Los dispositivos que producen humo son; el cable de humo, que es un dispositivo controlado eléctricamente y que permite la generación de líneas de humo muy finas, y la pipa o rastrillo, el cual inyecta el humo por varios orificios hasta que hacen notar los trazos del flujo. Algunas de las técnicas y equipos que se utilizan para producir el humo se presentan a continuación.

2.2.1 Visualización del flujo mediante la técnica del hilo de humo

El procedimiento implica cepillar un alambre delgado (para generar micro ranuras en la superficie), que luego forma una gran cantidad de pequeñas gotas. Al calentar el alambre se evapora el aceite con cada gota proporcionando una línea fina en el flujo. Con la iluminación adecuada, los trazos de humo parecen tan brillantes que se pueden observar y fotografiar. Esta técnica básicamente requiere un alambre fino de aproximadamente $0,1\ \text{mm}$ de diámetro de acero al cromo, níquel y el aceite adecuado, que se puede vaporizar rápidamente, y además de una corriente continua para calentar el alambre (Muzafferuddin Mahmood, 2011). En la Figura 2 es presentada una fotografía de la visualización de un flujo a través de un objeto con la técnica de hilo de humo.

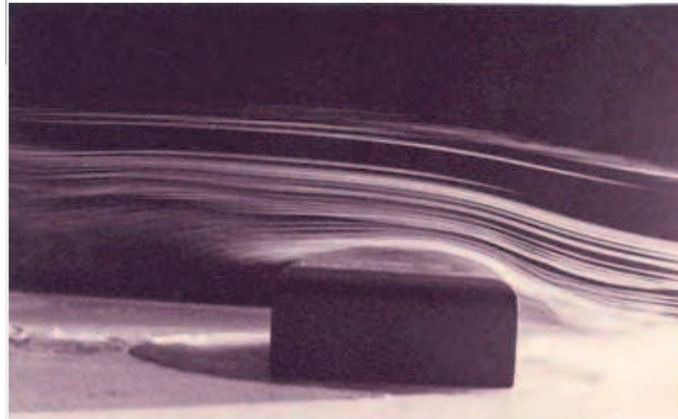


Figura 2. Visualización de flujo utilizando la técnica de hilo de humo
Fuente: (Muzafferuddin Mahmood, 2011)

2.2.2 *Hielo seco*

La técnica consiste en tomar el hielo seco que ya se encuentra en forma de gas y bombearlo por medio de un ventilador hacia el interior de la cámara de pruebas del túnel de viento. Para lo cual se requiere de un ventilador de alta potencia evitando el calentamiento del hielo seco. Para la adecuada instalación de esta técnica, se debe de acoplar el ventilador a un embudo con el mismo diámetro, el cual, a su vez cuenta con varios tubos endotraqueales, que son los encargados de dirigir e introducir el humo a la zona de prueba (Barrero, 2003). la Figura 3 muestra la salida de humo producido a partir de la técnica de hielo seco.



Figura 3. Hielo en humo seco a la salida
Fuente: (Barrero, 2003)

2.2.3 *Pirotécnicos*

Esta técnica consiste en la combustión de una mezcla conformada de una sustancia base (combustible) oxígeno y calor, como se observa en la Figura 4 el proceso se inicia mediante diferentes métodos de combustión como: llama directa, fricción, impacto o choques eléctricos. Los combustibles principales son la pólvora negra, el fosforo, una mezcla de azúcar pulverizada y

cloruro de potasio, que con la adición de colores pueden ser visualizados fácilmente. Para el transporte e inserción se usa la misma técnica que el humo seco, pero este método resulta ser contaminante tanto en el ventilador como en el embudo debido a los desechos de la combustión, además, este produce mal olor y sin un adecuado manejo representan un alto riesgo de explosión (Barrero, 2003).



Figura 4. Humo pirotécnico blanco
Fuente: (Barrero, 2003)

2.2.4 Generadores de humo comercial

Estos dispositivos generan humo a partir de aceites minerales y la glicerina mezclados con agua. Estos generadores se componen de tres dispositivos básicos entre los que se encuentran un intercambiador de calor, una bomba y el sistema de control. Estos dispositivos varían según la cantidad de humo que se desea producir y el fabricante. Los generadores de humo son ampliamente utilizados en eventos artísticos y están disponibles en el mercado.



Figura 5. Generador de humo comercial: Humo comercial bajo un sistema de resistencia para calentar el humo
Fuente: (Barrero, 2003)

De acuerdo con la Figura 5, el sistema se basa en el calentamiento de una sustancia productora de humo como la glicerina, después de producido el humo se dirige al exterior por uno orificio o con la ayuda de un ventilador, este sistema está automatizado con un controlador PID comúnmente.

2.2.5 Caracterización de flujos

Los flujos se pueden caracterizar por la forma en que el fluido se mueve sobre, o en el interior de un sólido, es decir, pueden ser fluidos externos o internos. El flujo no limitado sobre una superficie es flujo externo. Mientras que el flujo en un tubo o ducto es flujo interno. “Los flujos internos están caracterizados por la influencia de la viscosidad en todo el campo de flujo. En los flujos externos, los efectos viscosos quedan limitados a la capa límite cercana a las superficies sólidas y a las regiones de la estela corriente abajo de los cuerpos” (Cimbala & Cengel, 2001).

2.2.5.1 Flujos externos

Fenómenos físicos como la sustentación, la fuerza de arrastre y las corrientes de aire se presentan a causa de los flujos externos, los flujos externos se dan por el movimiento de un fluido sobre un cuerpo solido estático o viceversa. Dependiendo del marco de referencia estos flujos pueden ser estacionarios o no estacionarios para análisis, además según las velocidades que se presentan puede clasificar como compresible o incompresible ($Mach < 0.3$).

2.2.5.2 Arrastre y sustentación

El arrastre de un fluido se debe a las fuerzas ejercidas por el flujo sobre la superficie del sólido, esta fuerza es una variable de análisis importante debido a la energía requerida para contrarrestar este efecto, tal es el caso de los automóviles, aviones y submarinos, ya que es la responsable de afectar su resistencia estructural y vibraciones. Sin embargo, existen casos en que esta fuerza es maximizada como por el ejemplo los salvavidas.

Cuando un fluido está en reposo y tiene contacto con un sólido inmóvil solo hay presentes fuerzas normales debidas a la presión, sin embargo, cuando el fluido o el objeto se encuentra en movimiento se ejercen fuerzas tangenciales de corte debidas a las características viscosas del fluido. La sustentación, se debe a la suma de las fuerzas de presión y las fuerzas de corte en dirección normal al flujo, por su parte el arrastre se debe a estas fuerzas en dirección paralela al flujo (Cimbala & Cengel, 2001).

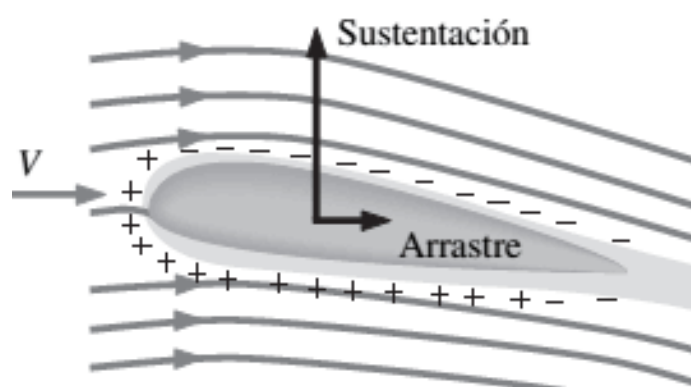


Figura 6. Perfil aerodinámico
Fuente: (Cimbala & Cengel, 2001)

El perfil de las alas de los aviones está diseñado con la forma y posición para generar suficiente sustentación durante el vuelo mientras mantienen el arrastre en un mínimo (ver Figura 6). Las presiones sobre y bajo la presión atmosférica se indican con signos más y menos, es decir, la parte frontal del perfil que es la expuesta primero al fluido es la zona de alta presión, mientras que la zona trasera del perfil es la zona de baja presión.

Las fuerzas de arrastre y sustentación dependen de variables como la velocidad del flujo, la densidad, la forma y orientación del objeto, por lo cual, para su análisis se utilizan dos parámetros adimensionales denominados coeficientes de arrastre Ec. (1) y coeficientes de sustentación Ec. (2) (Cimbala & Cengel, 2001).

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (1)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (2)$$

Donde F_L es la fuerza de sustentación en N.

F_D es la fuerza de arrastre en N.

ρ es la densidad en $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$.

v es la velocidad en (m/s).

A es el área de referencia en m^2 .

2.2.5.3 Arrastre debido a fricción y a presión

El esfuerzo de corte de la pared causa fuerzas de arrastre que se denominan arrastre de fricción en la superficie o arrastre de fricción; mientras que el arrastre por presión, se denomina arrastre debido

a presión o arrastre de forma. Estos dos fenómenos también son definidos por la Ec. (3), coeficiente de fricción y Ec. (4) que es la fuerza de fricción (Cimbala & Cengel, 2001).

$$C_D = C_{D,\text{fricción}} + C_{D,\text{presión}} \quad (3)$$

$$F_D = F_{D,\text{fricción}} + F_{D,\text{presión}} \quad (4)$$

El coeficiente de fricción varía desde cero, en caso de una placa plana paralela al fluido y se hace máximo cuando la placa es perpendicular al mismo. El arrastre por fricción depende de la viscosidad de fluido, por lo cual, según aumente o disminuya el coeficiente de fricción esta también se verá afectado.

2.2.5.4 Flujo sobre placas planas

Sobre una placa plana paralela a la velocidad del fluido, el coeficiente de arrastre por presión es cero y solo existe arrastre por fricción (C_d) como se observa en la Ec. (3), el fluido que se encuentra pegado a la superficie tiende a reducir su velocidad para esa primera capa, como causa de la viscosidad del fluido este se adhiere a la placa, a medida que el fluido avanza la primera capa ralentiza la capa inmediatamente superior y de esta forma con las demás hasta llegar a la capa final. La coordenada de capa final se denomina capa límite, que es hasta donde las fuerzas cortantes viscosas del fluido son considerables. En la región por encima de esta capa la velocidad y fuerzas cortantes por viscosidad son despreciables. La Figura 7 muestra la capa límite para flujo sobre una placa plana, y los patrones de flujo, laminar, de transición y turbulento. La fuerza por fricción sobre una placa plana está dada por la Ec. (5), mostrada a continuación (Cimbala & Cengel, 2001).

$$F_D = F_f = \frac{1}{2} C_f A \rho V^2 \quad (5)$$

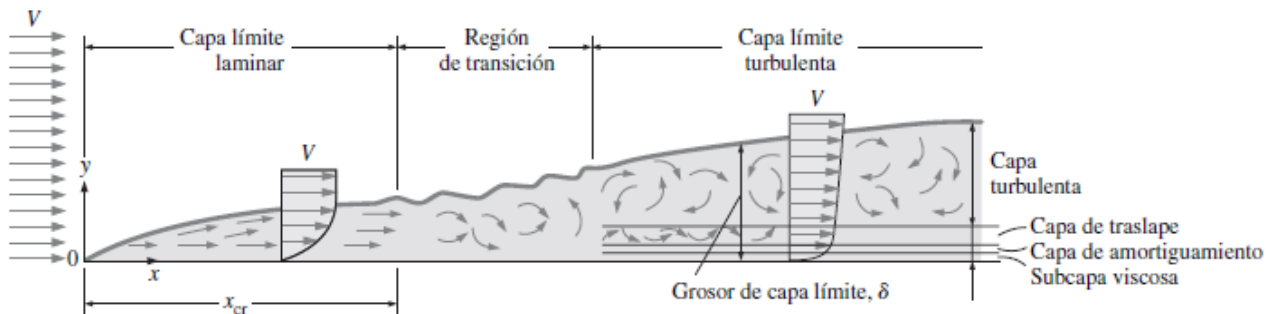


Figura 7. Capa limite
Fuente:(Cimbala & Cengel, 2001)

Para las placas planas la transición laminar a turbulento está dado por número de Reynolds de 100.000, el valor crítico se encuentra en el orden de 500.000 (Cimbala & Cengel, 2001).

$$Re_x = \frac{\rho Vx}{\mu} = \frac{Vx}{\nu} \quad (6)$$

Donde μ es la viscosidad dinámica $\left(\frac{Kg}{m*s}\right)$.

ρ es la densidad en $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$.

ν es la viscosidad cinemática $\left(\frac{m^2}{s}\right)$.

V es la velocidad corriente arriba (m/s).

x la longitud característica de la geometría (m).

El coeficiente de fricción para una placa plana está determinado a partir del Número de Reynolds Ec. (6), variando la ubicación para los cambios dentro de la capa límite a lo largo de una longitud característica x , para los casos en que se requiere estudiar la placa de forma total, por medio del cálculo de coeficiente promedio para la placa, se analiza un coeficiente para el régimen laminar y otro para el turbulento, como se muestra en la Ec. (7).

$$A) C_{f,x} = \frac{0,664}{Re_x^{1/2}}, Re_x < 5 * 10^5, \quad B) C_{f,x} = \frac{0,59}{Re_x^{1/5}}, 5 * 10^5 < Re < 10^7 \quad (7)$$

2.2.5.5 *Flujos sobre cilindros y esferas*

Los flujos externos en geometrías cilíndricas y esféricas, se definen mediante una longitud característica como el diámetro externo del cuerpo. El número de Reynolds para flujo turbulento es del orden de 200.000, además para estas geometrías presentan coeficiente de arrastre tanto para presión como para fricción.

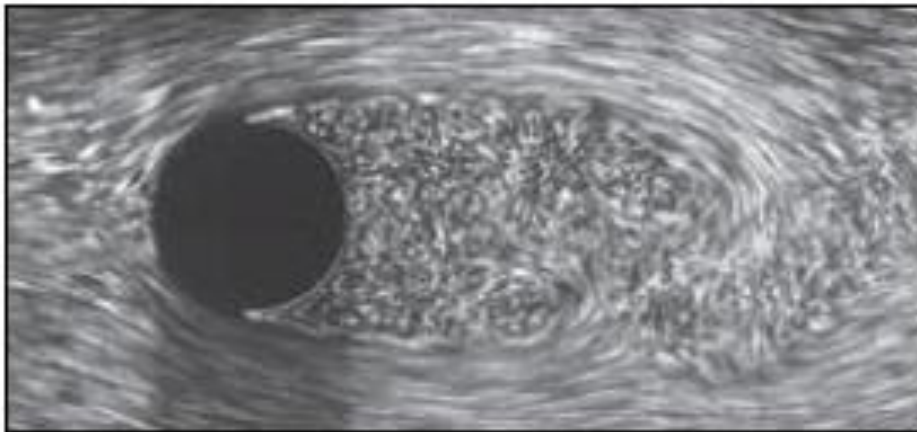


Figura 8. Visualización de capa límite en un cilindro
Fuente: (Cimbala & Cengel, 2001)

Los patrones de flujo sobre un cilindro son más complicados, pues presentan puntos de estancamiento que causan aumentos de presión en ellos, esta presión disminuye en la dirección de flujo, haciendo que la velocidad del fluido aumente.

Para bajas velocidades de flujo el cilindro es rodeado totalmente por el fluido laminar, siguiendo una trayectoria igual a la geometría. Pero cuando la velocidad aumenta la trayectoria del fluido se separa de la parte superior e inferior del cilindro (ver Figura 8), lo que produce un espacio de separación detrás del cilindro, llamado región de estela donde se presentan vórtices y presiones bajas con respecto a los puntos de estancamiento.

El comportamiento del flujo afecta directamente el coeficiente de arrastre de un cilindro o de una esfera, la fuerza de arrastre es dependiente de la fricción para números de Reynolds bajos ($Re > 10$). Mientras el arrastre por presión depende de números de Reynolds altos ($Re > 5000$) y para números de Reynolds intermedios se presentan ambas fuerzas de arrastre (Cimbala & Cengel, 2001).

2.2.5.6 Flujos internos

Los flujos internos desarrollados en conductos se presentan cuando el perfil de la velocidad deja de cambiar en la dirección del flujo. En la Figura 9 se muestra el flujo idealizado saliendo de un depósito hacia la entrada de un tubo como un flujo uniforme, luego esta capa viscosa de la pared crece a lo largo de la longitud del núcleo inviscido L_i , hasta que los esfuerzos viscosos dominan toda la sección transversal; el perfil entonces continúa cambiando debido a los efectos viscosos hasta alcanzar un flujo desarrollado. La longitud del núcleo inviscido es de un cuarto a un tercio de la longitud de entrada L_E , dependiendo de la geometría del conducto, de la forma del perfil de la velocidad de entrada y del número de Reynolds (Potter et al., 2015).

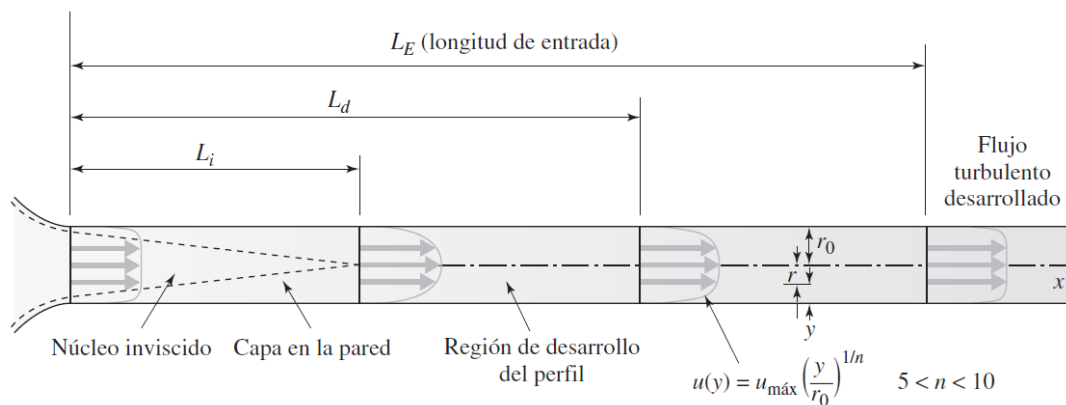


Figura 9. Desarrollo del perfil de la velocidad en un flujo turbulento en tubo
Fuente: (Potter et al., 2015)

2.2.5.7 Patrones de flujo bifásico

Los flujos bifásicos difieren de los flujos monofásicos porque tienen interfaces móviles, además tienen una variedad de configuraciones confusas y difíciles de clasificar. El flujo de un componente de dos fases existe cuando dos de las tres fases del mismo fluido (sólido, líquido y gas) fluyen juntas, por ejemplo vapor de agua o hielo de agua; con sustancias diferentes, como agua-aire o aceite-gas el flujo bifásico es de dos componentes (Hernández Pérez et al., 2002).

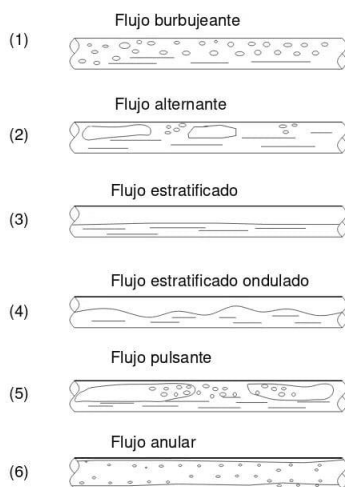


Figura 10. Patrones de flujo bifásico en tuberías horizontales
Fuente: (Hernández Pérez et al., 2002)

Los patrones de flujo bifásico de la Figura 10 se explican a continuación:

- (1) **Flujo burbujeante**. Cuando la velocidad superficial del líquido es elevada, las burbujas de gas se desplazan a una velocidad un poco mayor que la del líquido, estas se mantienen gracias a la turbulencia del flujo.
- (2) **Flujo alternante**. Cuando la velocidad del líquido baja, también disminuye la cantidad de burbujas, lo que provoca la unión de las burbujas pequeñas para formar burbujas más grandes, las cuales fluyen más rápido que el líquido. Ambas fases pueden fluir alternadamente.
- (3) **Flujo estratificado**. Cuando el flujo de líquido disminuye, las burbujas de gas se hacen más grandes rellenoando completamente la parte superior del tubo, mientras que el líquido fluye en la pared inferior del tubo con una interfase lisa. Este tipo de flujo solo se presenta en tuberías horizontales.
- (4) **Flujo estratificado ondulado**. Si se incrementa la velocidad del gas, se perturba la interfase por la formación de ondas viajando en la dirección del flujo.
- (5) **Flujo Pulsante**. Al subir la velocidad del gas la interfase es perturbada por formación de ondas en la superficie de líquido, cuando estas crecen interrumpen el paso del flujo de gas

formando algo denominado tapones de líquido. La fase líquida en fase continua en forma de tapones, y con burbujas en su interior.

- (6) Flujo Anular. Cuando aumenta el flujo de fase gaseosa, la fuerza superficial predomina sobre la fuerza gravitacional, el líquido forma una película delgada alrededor del tubo. El flujo de gas por el centro del tubo puede contener gotas de líquido, (Hernández Pérez et al., 2002).

2.2.6 Punto de ebullición

Las presión y temperatura influyen en el cambio de fases de las sustancias, para una presión determinada existe un valor de temperatura que al ser alcanzado produce un cambio de fase, esta es denominada temperatura de saturación, igualmente, para un valor de temperatura existe un valor de presión al cual se produce el cambio de fase denominado presión de saturación. La ebullición ocurre en la zona de contacto entre sólido y líquido, al encontrarse sobre una superficie con una temperatura superior a la de saturación del líquido, esta se caracteriza por la aparición de burbujas cuyo desplazamiento es rápido al momento que de alcanzar un cierto tamaño para flotar hacia la superficie.

En el punto de ebullición una sustancia empieza a evaporarse progresivamente; al mantenerse la temperatura constante el líquido se transforma en vapor siempre que la presión sea constante. Durante este proceso, se puede observar un gran aumento de volumen de la sustancia y la coexistencia de una parte líquida denominada líquido saturado y otra de vapor denominado vapor saturado, las cuales se encuentran en equilibrio. La Tabla 1 muestra los puntos de ebullición de diferentes sustancias a presión atmosférica (Cimbala & Cengel, 2001).

Tabla 1. Puntos de ebullición de diferentes sustancias.

Sustancia	Punto de ebullición (°C)	Punto de ebullición (°F)
Alcohol etílico	78.6	173.5
Benceno	80.2	176.4
Glicerina	179.9	355.8
Metano	-161.5	-258.7
Propano	-42.1	-43.7
Queroseno	204-293	399-599

Fuente: (Cimbala & Cengel, 2001)

2.2.7 Curva de ebullición

La curva de ebullición consiste en graficar el flujo de calor (q/A), contra el exceso temperatura $T - T_{SAT}$ (T_{exceso}), la cual, se obtiene por la diferencia entre la temperatura superficial y la temperatura de saturación del fluido. La curva se compone de cuatro regiones, un valor máximo y un valor

mínimo de calor, la Figura 11 muestra la gráfica de ebullición para el agua a presión atmosférica, para diferentes sustancias el comportamiento es similar que la del agua (Cengel, 2007).

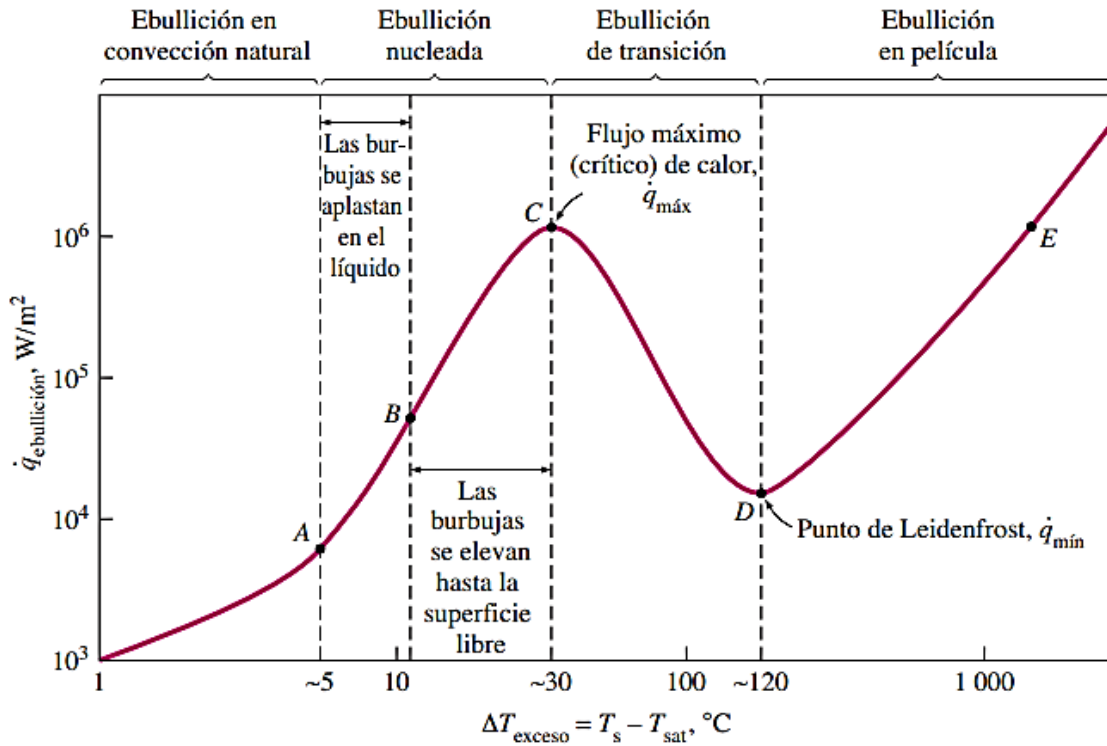


Figura 11. Curva de ebullición
Fuente: (Cengel, 2007)

En la primera región, existe un exceso de temperatura inferior a 5°C , donde la transferencia de calor presente se da por convección natural.

La segunda región, denominada región de ebullición nucleada es para valores de temperatura de exceso entre 5 y 30°C . En el valor inferior del intervalo, se presentan las burbujas justo sobre la superficie del sólido; cuando este exceso de temperatura aumenta, las burbujas se empiezan a desplazar hacia la superficie (Cengel, 2007).

La tercera región, se denomina región de transición de ebullición, donde el intervalo de exceso de temperatura se encuentra entre los 30 y 120°C , en esta región se forman burbujas mucho más rápidamente que la segunda región. En esta región también, tiende a formarse una capa de vapor sobre la superficie sólida de calentamiento que obstaculiza la transferencia de calor al líquido, lo

que provoca una disminución en el flujo de calor por parte de la superficie, mientras el exceso de la temperatura aumenta. Esta región también recibe el nombre de región de película inestable.

La cuarta región, es la de ebullición de la película, donde se tiene un exceso de temperatura alto mayor a los 120°C. La transferencia de calor por radiación en la película aumenta en gran medida cuando el exceso de temperatura es mayor.

El punto A es el punto crítico o punto de agotamiento, donde se tiene un flujo de calor máximo, cuando se alcanza este punto crítico, al realizar un aumento extra de la transferencia de calor, se produce un salto del punto crítico (punto A) al punto D, sin seguirse la curva de ebullición, por un aumento brusco de la temperatura en la superficie de calentamiento; si esta temperatura sobrepasa la temperatura de fusión del material de la superficie se produce un fallo en el sistema de calentamiento.

Con el fin de evitar estos fallos, dispositivos son diseñados para que operen entre la región de ebullición nucleada (segunda región) y el punto crítico (Punto A), donde el flujo de calor es alto y el exceso de temperatura es bajo.

El punto B es el punto de flujo de calor mínimo, denominado punto de Leidenfrost, donde la película de vapor cubre la superficie de calentamiento en su totalidad (Cengel, 2007).

2.2.8 Entalpía de vaporización

La entalpía de vaporización es la energía necesaria para que una unidad de masa de una sustancia pase completamente de líquido (L. F. Cardona, 2017).

2.2.9 Técnicas de visualización

2.2.9.1 Visualización de humo del flujo

Es una de las técnicas de visualización más antiguas, su generación e inyección de humo, la iluminación y técnicas de adquisición y cálculo han sido mejoradas a través del tiempo, la cual la pone un alto valor científico en este método (Ristić, 2007).

Hay tres tipos básicos de humo: humo generado por la vaporización de aceite mineral resultante de la vaporización de ciertas sustancias que contienen bromuro o cloruro y humo de madera. Algunos de ellos son; el papel, tabaco ardiendo o humeando, la parafina y el queroseno (Ristić, 2007).

La visualización de humo, sin un generador de humo, es posible, y se tiene que despreciar el tetracloruro de titanio, se deposita bromnaftalina sobre una superficie del modelo de prueba en el túnel de viento, a lo que una corriente de humo se origina a partir de esta gota (Ristić, 2007).

El tetracloruro de titanio en contacto con el aire húmedo produce polvo de dióxido de titanio y ácido clorhídrico, lo que resulta que para este método no es necesario un generador de humo; a su vez se ha utilizado en túneles al aire libre, las ventajas que tiene es que se puede visualizar toda la

sección de prueba, la desventaja es que tiene es que se tiene que utilizar protección porque es un método corrosivo (Ristić, 2007).

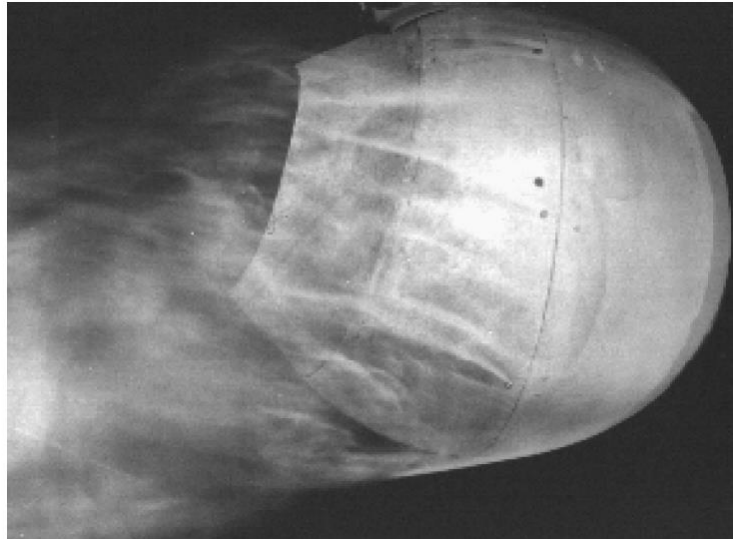


Figura 12. Visualización de flujo en una esfera
Fuente: (Ristić, 2007)

En la Figura 12 se tiene la visualización del flujo sobre una esfera mediante la implementación de tetracloruro de titanio

Una de las mejoras significativas en el campo de la visualización de humo ha sido la introducción de la iluminación con láser. Consta del uso de una hoja de luz, que ilumina la sección transversal de la estela y puede localizar la posición de los vórtices. Por ejemplo, el flujo inestable se puede probar con un láser de rubí pulsado, el problema es que la grabación del efecto visual del flujo puede verse afectada (Ristić, 2007). En la Figura 13, se observa la visualización del flujo con el método de laser en un ala delta.

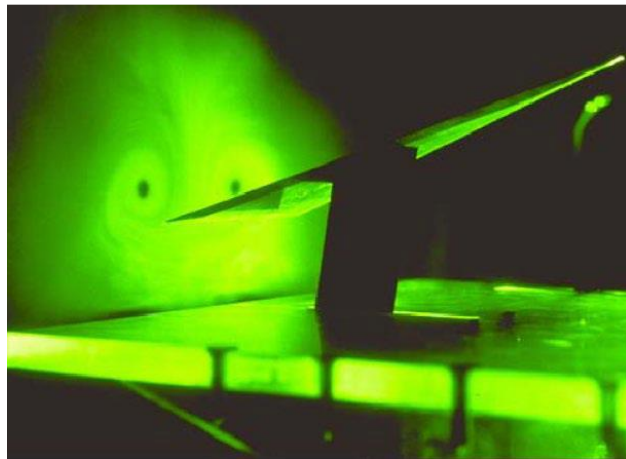


Figura 13. Método laser
Fuente: (Ristić, 2007)

2.2.9.2 Visualización por diferentes partículas pequeñas

Consiste en la adición de pequeñas partículas al flujo, ya sea en estado gaseoso o líquido, las cuales permiten la visualización y medición de la velocidad del flujo. La suposición fundamental es que tanto la velocidad de las partículas como la del fluido es idéntica (Ristić, 2007).

El trazador de partículas puede ser sólido, líquido o gaseoso y actuar en un medio de flujo tanto líquido como gaseoso, algunas partículas que suelen utilizarse en este método son; el polvo, magnesio, aluminio, polietileno o polvo cosmético, licopodio, hostaflon, humo de cigarrillo, metaldehído, esfera de vidrio, polvo de mármol, gotas de aceite, gotas de agua, hidrógeno, gas, burbujas de helio entre otras. El diámetro de las partículas suele ser de (0.1-20) micras (Ristić, 2007).

Los métodos presentados se combinan con el método de trazador cuantitativo con un sistema de cómputo automático, donde implica rastrear a una partícula detectando su posición sucesiva mediante cámaras en ciertos intervalos. Además, hay que resolver una ecuación de conservación de la cantidad de movimiento para una sola partícula, completando con la gravedad y la fuerza de sustentación (Ristić, 2007). En la Figura 14 se puede observar el fluido sobre dos cilindros mediante la implementación de este método; se puede apreciar en la mitad de los dos cilindros, se crea una sección de flujo turbulento de baja presión, mientras que flujo laminar, rodea los cilindros, se observa a continuación.

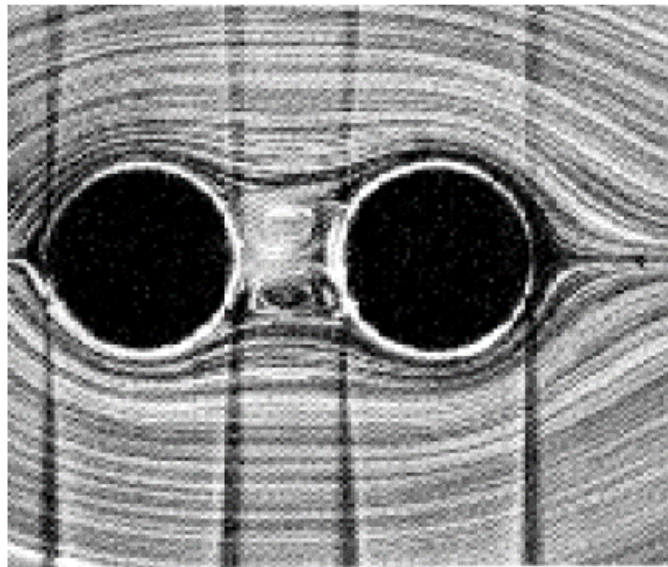


Figura 14. Dos cilindros
Fuente: (Ristić, 2007).

2.2.9.3 Visualización de flujo por lanas “tufts”

Esta técnica se utiliza para flujos subsónicos y se realiza mediante mechones. Sin embargo, el tamaño del mechón, la distribución en la superficie del modelo y la adherencia son importantes para las pruebas de flujo turbulento y la visualización de la capa límite de mayor calidad en modelos complejos (Ristić, 2007).

Este método se puede utilizar para todo el campo de estudio en el túnel de viento. Por ejemplo, utilizar una cuadrícula para poder mirar si hay o no flujo turbulento detrás del modelo (Ristić, 2007).

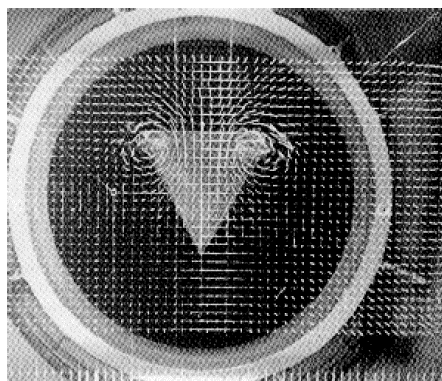


Figura 15. Visualización de vórtices

Fuente: (Ristić, 2007)

la Figura 15 muestra la visualización de vórtices mediante mechones en un ala delta. El mechón ha de ser de un tamaño adecuado para su visualización no menor a 0,1 mm porque no se puede apreciar bien su comportamiento, si se usan tintes fluorescentes el tamaño del mechón puede disminuir a (0,001-0,1) mm y no afecta la visualización, la ventaja de que sean pequeños es que no interfieren en la capa límite (Ristić, 2007).

2.2.9.4 Visualización de flujo superficial

Si se desea observar las características del flujo sobre la superficie del modelo, entonces se recubre con cierto material que indica la temperatura local de la pared, la presión de la superficie o el patrón de la línea corriente del flujo adyacente a la pared (Ristić, 2007).

2.2.9.4.1 Película de aceite de superficie

El aceite en la superficie del modelo se obtiene una imagen del patrón de flujo. La mezcla especial se puede preparar a partir de aceite apropiado y pigmento fino de trióxido de aluminio, óxido de titanio, polvo, tinte fluorescente, pigmentos colorante y grafito. La técnica permite la observación de las líneas de separación y la reincorporación del flujo al cuerpo (Ristić, 2007). A continuación, en la Figura 16 se muestra el flujo en una esfera mediante una película de aceite.

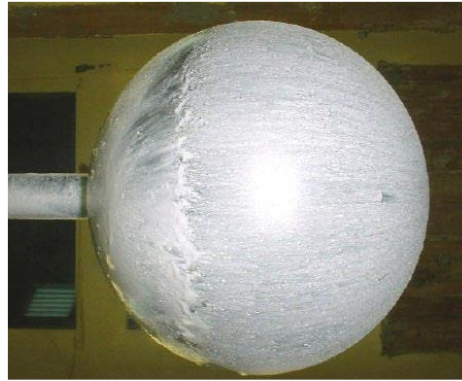


Figura 16. Visualización de una esfera
Fuente: (Ristić, 2007)

2.2.9.4.2 *Cristales líquidos y pinturas sensibles a la temperatura*

Se puede obtener una distribución de la temperatura superficial recubriendo el modelo de prueba con cristales líquidos colestéricos. Si los cristales se iluminan con una luz blanca bajo un ángulo de incidencia, los cristales líquidos solo reflejan una longitud de onda para cada ángulo de visión dependiendo de pequeños cambios de temperatura en la lámina de cristal (Ristić, 2007).

Los cristales pueden responder a cambios más finos de temperatura en la capa límite, debido a transiciones del flujo laminar a turbulento o simplemente donde se indican choques de ondas. Los colores de los cristales líquidos se invierten en la medida que cambia la temperatura en la dirección opuesta. Por lo que este método es atractivo para estudios de la capa límite, además el modelo a probar debe estar hecho de un material con baja conductividad térmica y recubierto con pintura negra como base (Ristić, 2007).

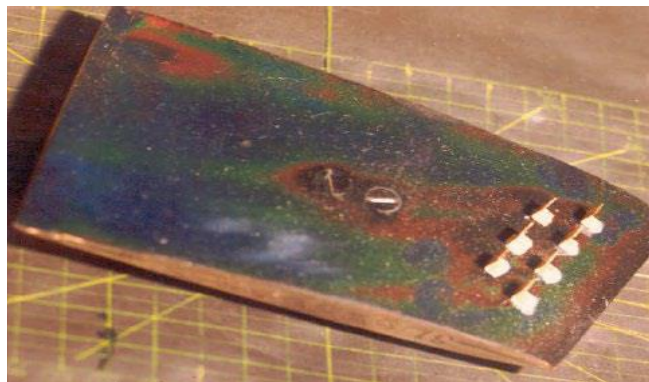


Figura 17. Visualización de flujo en un túnel de viento
Fuente: (Ristić, 2007)

La Figura 17 da un ejemplo visualización del flujo en el túnel de viento mediante cristales líquidos.

2.2.9.4.3 Pintura sensible a la presión (PSP)

La tecnología PSP ha surgido como una alternativa para determinar los campos de presión superficial estáticos y transitorios para aplicaciones aerodinámicas y visualización del flujo (Ristić, 2007). En la práctica el recubrimiento de PSP se ilumina con luz de la energía apropiada para excitar las moléculas de sonda atrapadas en el recubrimiento. La salida de luminiscencia resultante es inversamente proporcional a la presión superficial o temperatura del modelo de prueba (Ristić, 2007).

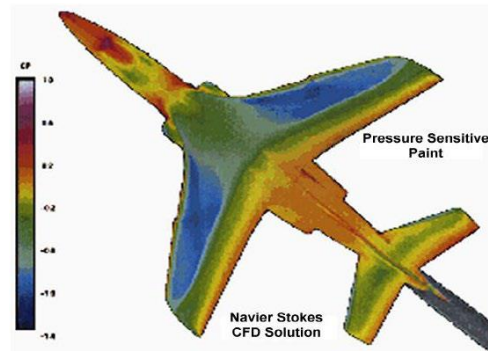


Figura 18. Visualización de flujos en mecánica computacional
Fuente: (Ristić, 2007)

En la Figura 18 se presenta la comparación de los resultados de presión entre PSP (el lado derecho) y la dinámica de fluidos computacional (del lado izquierdo).

De acuerdo a la visualización de flujo mediante la técnica de humo es importante tener un comparativo con algún método numérico, esto para detallar el comportamiento de los vórtices en diferentes geometrías y diferentes velocidades, por lo que se debe conocer como es dicho comportamiento (Rodrigo Andrés Soto Valle, 2016). En la Figura 19 se muestran algunos objetos aerodinámicos y generadores de vórtices.

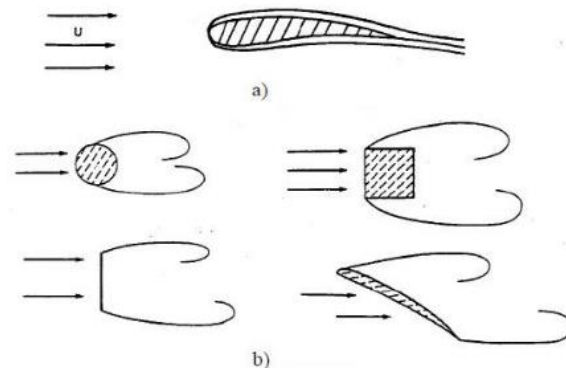


Figura 19. a) cuerpo aerodinámico. b) Diferentes generadores de vórtices [3]
Fuente: (Rodrigo Andrés Soto Valle, 2016)

Al tener identificado algunos objetos también se debe clasificar el tipo de flujo en diferentes régimen de acuerdo a su número de Reynolds, así como su punto crítico de ocurrencia del desprendimiento de vórtices (Rodrigo Andrés Soto Valle, 2016), se presenta una clasificación para cilindros circulares en la Figura 20.

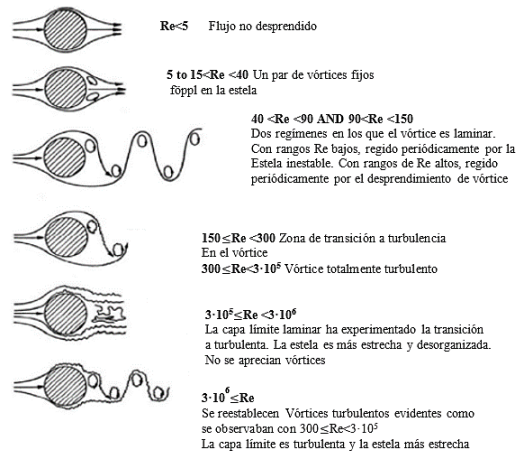


Figura 20. Clasificación del tipo de flujo sobre un cilindro circular según su número de Reynolds
 Fuente: (Rodrigo Andrés Soto Valle, 2016)

Otro tipo de geometría que se tiene en cuenta es la barra cuadrada, a la que se debe tener claro el comportamiento de los vórtices a diferentes números de Reynolds. en la Figura 21 se encuentra para dos números de Reynolds relativamente bajos (Okajima A, 1982).

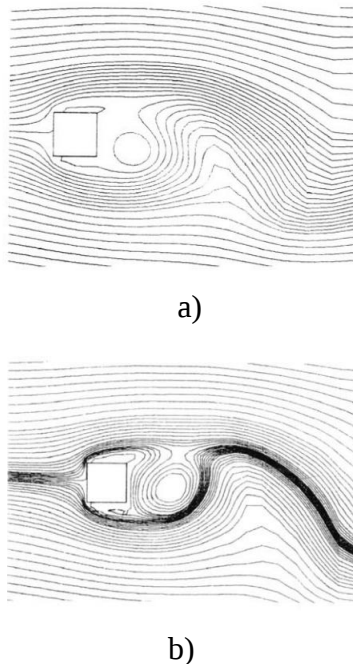


Figura 21. Comportamiento de los vórtices según su número Reynolds a) Re=150 y b) Re=250
 Fuente: (Okajima A, 1982)

2.2.10 Polímeros

Se hace necesario hablar acerca de los materiales poliméricos en este documento debido a que algunos componentes del generador de humo estarán fabricados con este tipo de material, cuya finalidad es evitar posibles fallas como:

- Fusión de los aislantes al momento en que la resistencia alcance su temperatura de trabajo
- Deformación por el efecto de la temperatura
- Que el punto de fusión de los aislantes sea menor que el punto de evaporación del combustible productor de humo, porque esto significaría que el polímero se incendiaría causando la salida de humo negro en la cámara de pruebas

Los polímeros son materiales orgánicos, producidos por polimerización, son buenos aislantes eléctricos y térmicos, por lo general no son adecuados para el uso a altas temperaturas, tiene buena resistencia a sustancias químicas corrosivas. Existe una clasificación para los polímeros de acuerdo con su estructura molecular (Askeland et al., 2013), lo que define sus propiedades físicas:

Los polímeros termoplásticos no tienen grandes cadenas moleculares conectadas de manera rígida, y tiene buena ductilidad y formabilidad, (Ver Figura 22)

Los polímeros termoestables son más resistentes, pero más quebradizos pues sus cadenas moleculares se enlazan de forma compacta (Ver Figura 22)

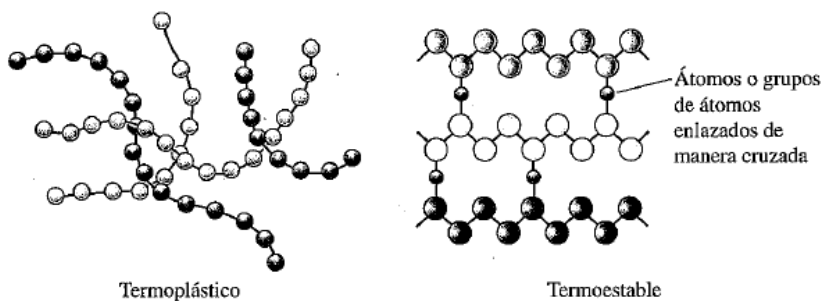


Figura 22. Estructura molecular de los polímeros termoplásticos y termoestables

Fuente: (Askeland et al., 2013)

La polimerización es la combinación de moléculas pequeñas para producir moléculas más grandes o polímeros, la estructura de las moléculas de polímeros puede tener una estructura de varias cadenas enredadas, pero no conectadas (termoplásticos) (Askeland et al., 2013).

2.2.10.1 Efectos de la temperatura

Los cambios de temperatura pueden cambiar de forma drástica las propiedades de los materiales. Para los polímeros las altas temperaturas pueden causar que estos se fundan (termoplásticos) o se carbonicen (termoestables) (Askeland et al., 2013).

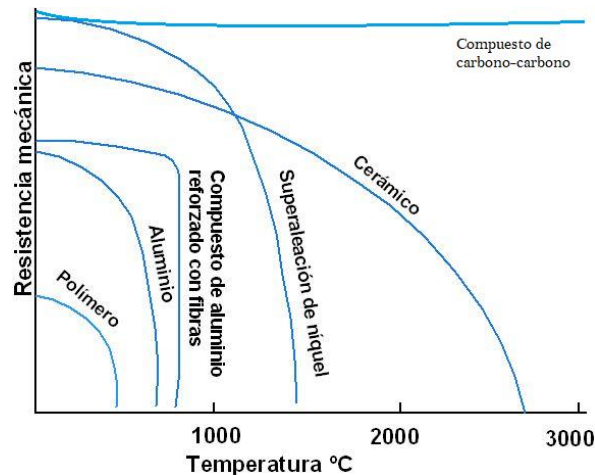


Figura 23. Efectos de la temperatura en los materiales
Fuente: (Askeland et al., 2013)

El incremento en la temperatura por lo general tiene como efecto la reducción de la resistencia de un material, como presentado en la Figura 23. Los polímeros son adecuados para resistir a bajas temperaturas.

2.2.10.2 Transiciones térmicas de los polímeros

2.2.10.2.1 Temperatura de transición vítrea

“Todos los polímeros amorfos toman, a temperaturas suficientemente bajas, las características de los vidrios, incluida la dureza, rigidez y fragilidad. Una propiedad asociada con el estado vítreo es un bajo coeficiente de expansión volumétrico (T_g)” (Francisco López & Mendizábal, 2015).

2.2.10.2.2 La temperatura de fusión

“La temperatura de fusión T_m , en los polímeros, es un proceso de pseudo-equilibrio, o un equilibrio entre el volumen cristalino del polímero y el estado fundido del mismo” (Francisco López & Mendizábal, 2015).

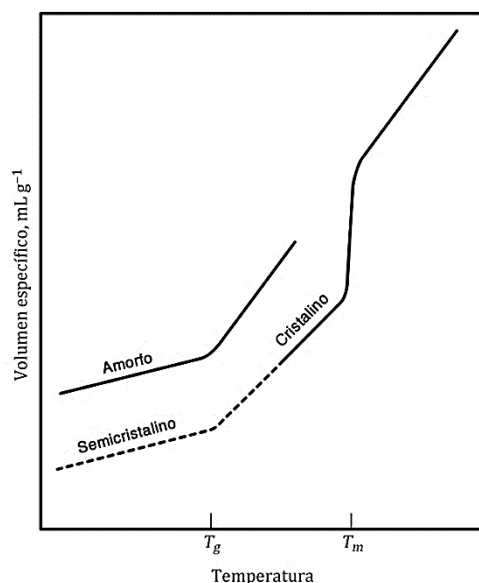


Figura 24. Determinación de la transición vítrea y temperaturas de fusión cristalina por cambios en el volumen específico.

Fuente: (Textos científicos, 2022)

La Figura 24 muestra la variación en el volumen específico con la temperatura para los polímeros completamente amorfos y totalmente cristalinos (las líneas continuas). En la temperatura de fusión se da una transición de primer orden con un cambio discontinuo en el volumen específico a la temperatura de transición. En la temperatura T_g se da una transición de segundo orden que implica solamente un cambio en el coeficiente de temperatura del volumen específico.

Tabla 2. Valores de la T_g y T_m para distintos polímeros

Polímero	Unidad repetitiva	T_g (°C)	T_m (°C)
Polietileno	CH_2CH_2	125	137
Polioximetileno	CH_2O	82	181
Poli isopreno	$\text{CH}_2\text{C}(\text{CH}_3)\text{CHCH}_2$	73	28
Poliisobutileno	$\text{CH}_2\text{C}(\text{CH}_3)_2$	73	44
Poli (óxido de etileno)	$\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O}$	41	66
Poli fluoruro de vinilideno	CH_2CR_2	40	185
Polipropileno	$\text{CH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)$	8	176
Poli fluoruro de vinilo	CH_2CHR	41	200
Policloruro de vinilo	CH_2CCl_2	18	200
Poli acetato de vinilo	$\text{CH}_2\text{CH}(\text{OCOCH}_3)$	32	
Policlorotrifluoroetileno	CR_2CRCl		220
Poli (ε-caprolactona)	$(\text{CH}_2)_5\text{CONH}$	52	223
Poli (hexametenadipamida)	$\text{NH}(\text{CH}_2)_6\text{NHCO}(\text{CH}_2)_4\text{CO}$	50	265

Fuente: (Textos científicos, 2022)

3. PROYECTO CONCEPTUAL

Este capítulo inicia con la definición teórica de un generador de humo, la selección según los tipos de generador de humo que pueden implementarse en el túnel de viento, y los cálculos de las magnitudes de los instrumentos que se implementarán en el diseño. Posteriormente, se analizan las características del combustible que se implementará en la producción del humo

3.1 SELECCIÓN DEL GENERADOR DE HUMO

El generador de humo que se implementó en el túnel de viento está conformado de componentes comerciales por motivos de mantenimiento y facilidad para realizar posibles cambios en las piezas, por lo tanto, la selección se hará de acuerdo a los generadores comerciales.

3.1.1 Tipos de generadores de humo comercial

Para esta clasificación de generadores de humo comercial se fija principalmente en la forma de enviar el fluido de visualización al interior de la cámara de prueba del túnel de viento, es decir, si es necesario utilizar un ventilador para proporcionar energía al humo. Es importante, la forma de calentar el fluido productor de humo, es decir, si se utiliza resistencia o mechero y finalmente la forma en que la resistencia calienta el fluido, es decir, si está sumergida en el fluido, si calienta el fluido por convección o por conducción del calor.

3.1.1.1 Sin extractor, intercambiador de calor, evaporación indirecta

Este tipo de generador no implementa un ventilador para extraer el humo, sino que aprovecha el viento que se mueve en la cámara de pruebas del túnel de viento para impulsar el humo desde el generador, los componentes principales son:

- El tanque contenedor del fluido que produce el humo
- Mini-bomba para mover el fluido productor de humo hacia el recipiente contenedor del humo
- Intercambiador de calor
- Tubos capilares para llevar el humo a la cámara de pruebas

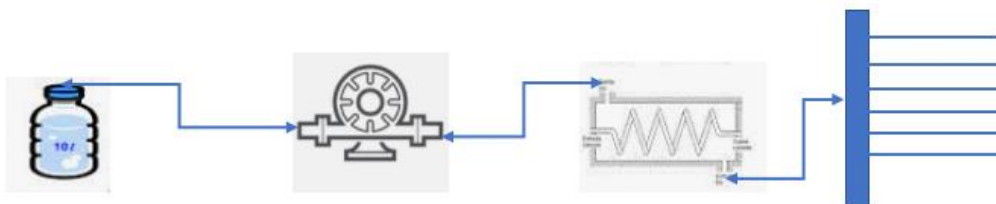


Figura 25. Esquema de un generador de humo sin ventilador de extracción

No se implementa un ventilador para proporcionar energía al fluido a la salida. Este generador está compuesto de cuatro partes principales:

1. El recipiente de combustible.
2. Una mini bomba para mover el combustible.
3. Un intercambiador de calor que es donde el combustible se vuelve humo.
4. El tubo capilar con los orificios por donde el fluido sale hacia la cámara de pruebas

3.1.1.2 Con extractor, evaporación directa del fluido

Este tipo de generador implementa un ventilador para extraer el humo del interior del recipiente. Los componentes principales son:

- El tanque contenedor del fluido que produce el humo
- Mini-bomba para mover el fluido productor de humo hacia el recipiente contenedor del humo
- Intercambiador de calor
- Extractor de humo
- Tubos capilares para llevar el humo a la cámara de pruebas

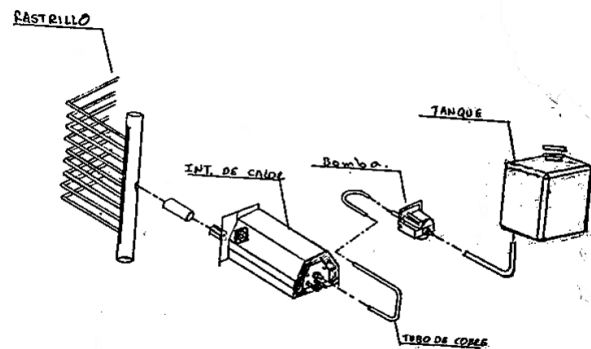


Figura 26. Generador de humo con ventilador de extracción

Se implementa un ventilador para proporcionar energía al fluido. Este generador consta de un dispositivo adicional y es el ventilador que se implementa después del intercambiador de calor y antes del tubo capilar y tiene la función de proporcionar energía al humo al salir a la cámara de pruebas.

3.1.1.3 Con resistencia sumergida en el fluido

Para este tipo de generador la resistencia se encuentra sumergida al interior del fluido combustible que produce el humo; al momento en que la resistencia alcanza la temperatura de vaporización del fluido, se produce humo que se almacena en el reservorio de humo para su posterior extracción.

Los componentes principales son:

- El tanque contenedor del fluido que produce el humo
- Resistencia eléctrica
- Extractor de humo
- Tubos capilares para llevar el humo a la cámara de pruebas

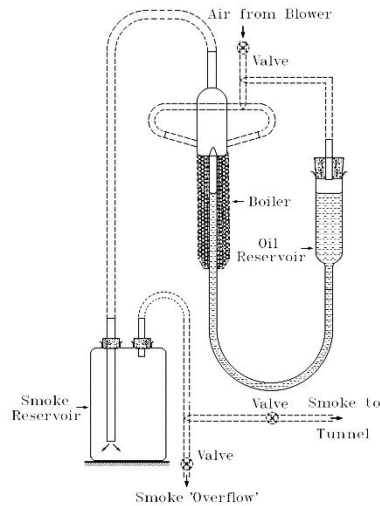


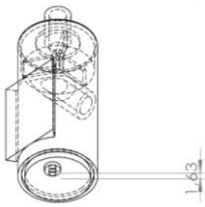
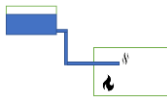
Figura 27. Resistencia sumergida en el fluido
Fuente: (Querin, 2015)

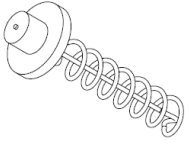
3.1.1.4 Funciones y componentes del generador de humo

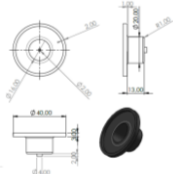
De los generadores de humo comercial mencionados anteriormente se implementó el generador que tendrá las siguientes características en su diseño (Tabla 3):

- Mini-bomba para mover el fluido productor de humo desde el tanque hasta el recipiente de humo
- Resistencia eléctrica para incrementar la temperatura del fluido productor de humo
- Regulación del aumento de temperatura en la resistencia encargada de evaporar
- Regulación del flujo a través de la mini-bomba
- Resistencia eléctrica de ferroníquel u otro material por el tubo capilar que es el encargado de llevar el humo al túnel de viento,
- Regulación del aumento de temperatura de la resistencia secundaria

Tabla 3. Características de diseño y dispositivos del generador de humo

Componente: Recipiente de fluido		Función Diseñado para contener el fluido de trabajo.		
 Figura 28. Recipiente del combustible Fuente: (Kalasab, 2022)		 Figura 29. Recipiente hecho de acero inoxidable con una salida en la parte de abajo y entrada del líquido por arriba		
Componente: Dispositivo encargado de hacer fluir el fluido de trabajo		Función: Transportar el fluido de trabajo desde el recipiente en estado líquido hasta el intercambiador de calor y del intercambiador de calor a la cámara de pruebas		
 Figura 30. Mini-bomba vertical	 Figura 31. Mini-Bomba. Sumergible tipo industrial, trabajo continuo Fuente: (MercadoLibre, 2022a)	 Figura 32. Mini-bomba no sumergible, semiindustrial Fuente: (MercadoLibre, 2022a)	 Figura 33. Caída del fluido del recipiente por gravedad	 Figura 34. Mini-extractor centrifugo Fuente: (Rakuten, 2022)

Componente: Dispositivo encargado de energizar resistencias eléctricas		Función: Regulador de voltaje y corriente AC de las resistencias eléctricas	
 Figura 35. Fuente de poder regulador de voltaje dimmer 4000W, 220v AC Fuente: (MercadoLibre, .)		 Figura 36. Voltímetro amperímetro digital AC 50-500 V 100ª Fuente:(merkatronix.)	
Componente: Regulador de flujo en estado de líquido		Función: Controlar el Flujo de la mini-bomba energizado por el transformador	
 Figura 37. Transformador de corriente AC a DC para la mini-bomba Fuente:(MercadoLibre, 2021b)	 Figura 38. Modulo controlador de velocidad PWM de 0-28 v 3ª DC Fuente: (Modulocontrolador De Velocidad Pwm 0 A 28v 3a, n.d.)	 Figura 39. Mini voltímetro y amperímetro digital 100v 10A DC Fuente: (merkatronix.)	
Componente: Evaporador de fluido		Función: Encargados de llevar el fluido de estado líquido a gaseoso y sobrecalentar el vapor	
 Figura 40. Resistencia térmica	 Figura 41. Resistencia eléctrica de 2000W corriente AC 220 V	 Figura 42. Mechero bunsen Fuente: (Grettel Valle B et al., 2016)	 Figura 43. Resistencia secundaria creada a partir de ferróníquel Fuente:(mercado libre.)

Componente: Ducto			Función: Encargados de dirigir el flujo tanto en estado líquido como en vapor	
 Figura 44. Tubo de PVC flexible Fuente:(Pentech Moulding Co Ltd, 2022)	 Figura 45. Tubo capilar Fuente: (MercadoLibre, 2022)	 Figura 46. Tubo capilar de cobre Fuente:(mercado libre 2022)	 Figura 47. Manguera de silicona, altas temperatura Fuente: (mercado libre.)	 Figura 48. Llave de paso de flujo (Almacén Electroluz En Pamplona, n.d.)
Componente: Aislantes térmicos			Función: Encargado de suprimir el calor generado por las resistencias eléctricas con el fin de no generar daños en el equipo y al operador	
 Figura 49. Aislante térmico de la resistencia.	 Figura 50. Aislante térmico, soporta temperaturas altas de 300 °C	 Figura 51. Cinta térmica aislante, 300°	 Figura 52. Cinta térmica de sosto, 1100 °C Fuente: (Mercado libre)	 Figura 53. Teflón multusos Fuente: (MercadoLibre, 2022a)
Componentes: Aislantes térmicos			Función: Encargado de aislar la uniones eléctricas realizadas en el equipo para no generar cortocircuitos y evitar contacto con el operador	
 Figura 54. Termo encogible para instalación eléctrica Fuente: (MercadoLibre, 2021)			 Figura 55. Cinta eléctrica Fuente: (MercadoLibre, 2020a)	

Componentes: Conductores térmicos	Función: Aumentar la conducción térmica entre dos superficies o más objetos que no logran hacer contacto directo
 Figura 56. Pasta disipadora Fuente: (MercadoLibre, 2020)	 Figura 57. Alambre de cobre Fuente: (MercadoLibre, 2022)

3.2 COMBUSTIBLE PRODUCTOR DEL HUMO

3.2.1 Propiedades de la glicerina

La glicerina es un líquido incoloro, inodoro, viscoso y de sabor dulce, cuyo nombre se origina de la palabra griega para "dulce" glykys. Es un anhídrido puro a condiciones atmosféricas normales, el glicerol tiene una gravedad específica de 1,261 g/cm³, un punto de fusión de 18,2 °C y un punto de ebullición de 180 °C (4)(Pagliaro, 2017).

Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas del glicerol a diferentes temperaturas

T °C	Densidad ρ (Kg/m ³)	Calor específico C_p J/kg°C	Viscosidad Cinemática ν , $10^{-4}(\frac{m^2}{s})$	Conductividad térmica "K" W/m°C	Difusividad Térmica α , $10^7(m^2/s)$	N° de Prandtl Pr	Viscosidad Dinámica $(\frac{Kg}{m*s})$
0	1276	2261	83,1	0,282	0,983	84700	10,6
10	1270	2319	30	0,284	0,965	31000	3,81
20	1264	2386	11,8	0,286	0,947	12500	1,49
30	1258	2445	5	0,286	0,929	5380	0,63
40	1252	2512	2,2	0,286	0,914	2450	0,28
50	1245	2583	1,5	0,287	0,893	1630	0,19

Fuentes: (Pagliaro, 2017),(Incropera & DeWitt, 1999)

Tabla 5. Densidad de la glicerina a diferentes temperaturas

T (°C)	Densidad (kg/m ³)	T (°C)	Densidad (kg/m ³)	T (°C)	Densidad (kg/m ³)
0	1272,7	75,5	1225,6	180	1148,6
10	1267,0	99,5	1209,7	200	1131,8
15	1264,4	110	1201,8	220	1114,9
20	1261,3	120	1194,5	240	1098,6
30	1255,1	130	1187,2	260	1082,7
40	1249,0	140	1179,5	280	1067,2
54	1239,7	160	1164,4	290	1059,7

Fuente: (Jungermann & Lynch, 2018)

3.3 FERRONÍQUEL

Es una ferroaleación producida por reducción carbotérmica de minerales tipo serpentinitico como limonita, serpentina o Garnierita. Los mayores productores de ferroníquel son China, Japón, Colombia y Nueva Caledonia. La situación en China es única porque produce mucho arrabio de ferroníquel y obteniendo variedad de ferroníquel con un contenido de níquel del 1,5% al 80% (Lázaro Galdiano, 2020). En la Tabla 6 se presenta una lista de los ingredientes individuales que conforman la aleación de ferroníquel.

Tabla 6. Composición del Ferroníquel

Ingredientes peligrosos	composición típica	Número C.A. S	Nº de etiqueta EINECS/EC
Ferroníquel (Fe _{1,87} Ni)	>98,5%	11110-39-7	N/A
INGREDIENTES INDIVIDUALES			
Níquel (Ni)	25-45	7440-02-0	231-111-4
Cobalto (Co)	0,6-1,1	7440-48-4	231-158-0
Silicio (Si)	<= 0,06	7440-21-3	231-130-8
Cobre (Cu)	<=0,20	7440-50-8	231-159-6
Cromo (Cr)	<=0,05	7440-47-3	231-157-5
Fósforo (P)	<=0,03	7723-14-0	231-768-7
Azufre (S)	<=0,06	7704-34-9	231-722-6
Carbono (C)	<=0,06	7440-44-0	231-153-3
Hierro (Fe)	Resto	7439-89-6	231-096-4

Fuente: (SDS, 2020)

El ferroníquel es una aleación estable en condiciones normales de almacenamiento, debe evitarse contacto con ácidos, agentes oxidantes fuertes y con óxidos de carbono en atmósferas reductoras por el riesgo de generar níquel carbonilo siendo un gas tóxico $\text{Ni}(\text{CO})_4$. La gran parte del ferroníquel es destinado en su gran mayoría a la fabricación de aceros inoxidable austeníticos. También se utiliza en baterías, en electrónica, en turbinas de gas, etc. (Lázaro Galdiano, 2020). En la Tabla 7 se muestran las propiedades de la aleación de ferroníquel.

Tabla 7. Propiedades del ferroníquel

ESTADO FÍSICO	Sólido
COLOR	Metálico brillante
OLOR	Inodoro
PUNTO DE FUSIÓN	1500 °C aprox.
PUNTO DE EBULLICIÓN	2900 °C aprox.
DENSIDAD RELATIVA	3,8 g/cm ³

Fuente: (Lázaro Galdiano, 2020)

3.4 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO

Ya definido el tipo de generador y el combustible se procede a realizar los cálculos de los parámetros más determinantes a la hora de la construcción del generador de humo (Tabla 8), también se tiene en cuenta los siguientes parámetros preestablecidos del túnel de viento del laboratorio de termo-fluidos (Tabla 9).

Tabla 8. Condiciones del fluido

GLICERINA $\text{C}_3\text{H}_5(\text{OH})_3$	
PROPIEDAD	DATOS
calor latente de vaporización (h_{fg} =kJ/kg)	974
temperatura de ebullición(T =°C)	180
Tensión superficial σ N/m	0,0063
Temperatura Ambiente Pamplona (T =°C)	15
Densidad en vapor = 3,2 ρ aire (kg/m ³)	4,0064

Fuentes: (Cengel & Boles, 2009)

Tabla 9. Parámetros del túnel de viento y del rastrillo utilizado

Parámetros del túnel y del equipo	
Velocidad máxima (m/s)	25
diámetro interno rastrillo(d(m))	1xE ⁻⁰³
Orificios del rastrillo	5

3.4.1 Determinación de la longitud del tubo evaporador

Primero se calculó el calor necesario para corresponder con los parámetros del túnel de viento, este proceso se realiza en dos pasos. Primero se calcula el calor sensible para hallar la distancia de la resistencia térmica; la finalidad de esta resistencia es convertir el flujo líquido a el flujo saturado. En secuencia, se calcula el flujo de calor necesario para evaporar el líquido (Figura 58), en este paso una vez estudiado diferentes métodos se opta por una de las correlaciones más empleadas la cual es la regla sumatoria de Chen (1966) que ha servido para el agua y algunos líquidos. En este trabajo fueron usadas versiones recientes de correlaciones para los factores del abordaje propuesto por Chen para mejorar los resultados al trabajar con la glicerina.

3.4.1.1 Calor de vaporización

Haciendo el cálculo de $\dot{m}$ remplazaremos los valores en la ecuación (8), para calcular el calor de vaporización.

$$Q = \dot{m}_t \cdot h_{fg} \quad (8)$$

Donde Q es el calor de vaporización en (W)

$\dot{m}_t$ es el flujo masico total del humo que sale por los 5 orificios del tubo capilar en (kg/s)

h_{fg} es el calor latente del vapor en $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$.

Flujo masico por un solo orificio.

$$\dot{m} = \rho_v \cdot V_v \cdot A \quad (9)$$

Donde ρ_v es la densidad del vapor en $\left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)$.

V_v velocidad del vapor que corresponde al túnel de viento en (m/s)

A área del tubo capilar en (m^2)

El área del tubo capilar de salida del humo es:

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (10)$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4} \cdot (1 \cdot 10^{-3} \text{m})^2 = 7,85 \cdot 10^{-7} \text{m}^2$$

Entonces el flujo masico con el que sale el humo es (los valores se toman de la Tabla 9 y Tabla 8):

$$\dot{m} = 4,0064 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot 25 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \cdot 7,85 \cdot 10^{-7} (\text{m}^2)$$

$$\dot{m} = 7,86 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Se halla el flujo total del rastrillo.

$$\dot{m}_t = 5 \cdot 7,86 \cdot 10^{-5} = 3,93 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Remplazando en la Ec. ((8)), se tiene que el calor de vaporización es:

$$\dot{Q}_1 = 3,93 \cdot 10^{-4} * 974 \cdot 10^3 = 383 \text{ W}$$

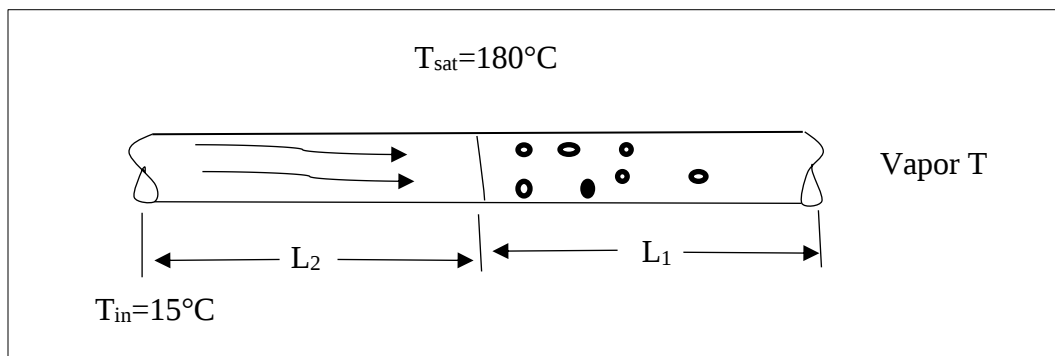


Figura 58. Esquema del tubo productor de humo

3.4.1.2 Calor sensible del punto inicial a ebullición

Haciendo uso de la ecuación (11)

$$Q_2 = \dot{m} C_p T_{prom} \Delta T = \dot{m} C_p (T_{sat} - T_{in.}) \quad (11)$$

Donde C_p es el calor especifico en $\frac{\text{J}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}$.

Q_2 es el calor sensible en (W)

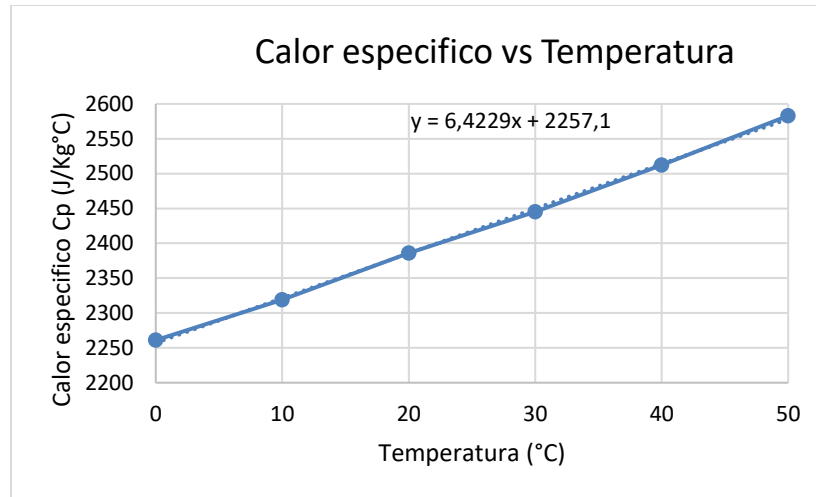
T_{sat} temperatura de saturación en $^\circ\text{C}$.

T_{in} temperatura de entrada en $^\circ\text{C}$.

Se realiza el promedio entra T_{sat} y T_{in} para determinar el C_p a utilizar en la ecuación (11).

$$T_{prom} = \frac{180 + 15}{2} = 97,5^\circ\text{C}$$

Se trabaja con una función de acuerdo a los valores de la Tabla 4 para hallar las propiedades de la glicerina; debido a que no se tienen datos verídicos a altas temperaturas, estos son presentados en graficas a los largo del presente capitulo.



$$y = 6,4229x + 2257,1 \quad (12)$$

Donde x representa la temperatura promedio hallada anteriormente.

$$\text{De la Ec. (12) se toma el } Cp_{97,5^{\circ}\text{C}} = 2883,33 \frac{\text{J}}{\text{Kg}^{\circ}\text{C}}.$$

$$Q_2 = 3,93 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 2883,33 \frac{\text{J}}{\text{Kg}^{\circ}\text{C}} (180 - 15)^{\circ}\text{C}$$

$$\dot{Q} = 187 \text{ W}$$

Conocidos el calor de vaporización y el calor sensible, el calor total que se le debe de inyectar para generar el vapor.

$$Q_t = 383 + 187 = 570 \text{ W}$$

3.4.1.3 Distancia de calor sensible L_2

Con la velocidad de L_2 que se halla despejando de la ecuación (9) se identifica para flujo interno el número de Reynolds para determinar el tipo de flujo y a su vez es calculado el coeficiente de transferencia de calor h_2 ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$) de convección forzada, que servirá para el cálculo de L_2 .

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (13)$$

La velocidad es determinada basado en el flujo másico necesario, para un tubo circular con un diámetro interno de 3mm. Los valores de la densidad se evaluaron a la temperatura promedio de entrada y salida de la sección de calentamiento correspondiente al calor sensible. $\rho_{97,5^{\circ}C} = 1211 \frac{Kg}{m^3}$, se interpola de la Tabla 5.

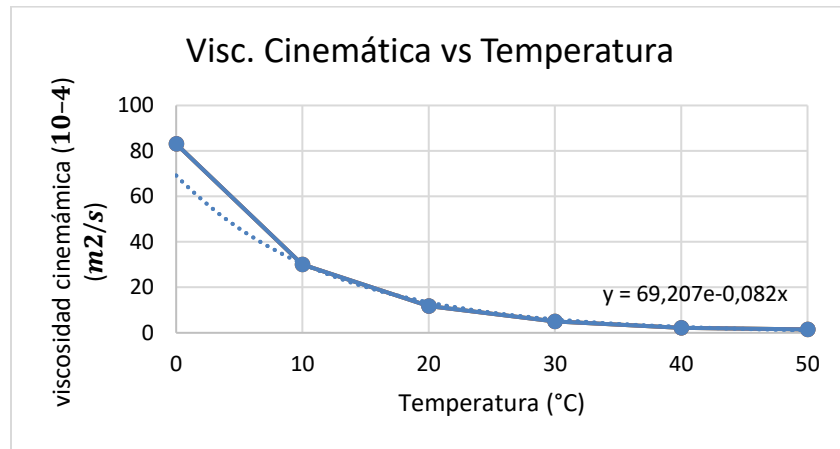
$$\dot{m}_v = \rho_l V_l A$$

$$A_2 = \frac{\pi}{4} (3 \cdot 10^{-3} m)^2 = 7,1 \cdot 10^{-6} m^2$$

$$3,93 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{s} = 1211 \frac{Kg}{m^3} \cdot V_l \cdot 7,1 \cdot 10^{-6} m^2$$

$$V_l = 0,046 \frac{m}{s}$$

De forma similar al procedimiento seguido para el calor específico se procedió para determinar la viscosidad cinemática.



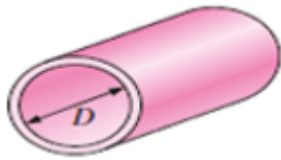
$$y = 69,207 e^{-0,082x} \quad (14)$$

De la Ec. (14), Se toma el $\nu_{97,5^{\circ}C} = 0,023 \cdot 10^{-4} \frac{m^2}{s}$ para calcular el Re.

$$Re = \frac{0,046 \frac{m}{s} \cdot 3 \cdot 10^{-3} m}{0,023 \cdot 10^{-4} \frac{m^2}{s}} = 60$$

Obtenido el número de Reynolds se identifica que es menor al crítico de 2300. Por lo tanto, el flujo es laminar.

Tabla 10. Número de Nusselt adquirido de transferencia de calor de Cengel

Configuración geométrica del tubo	Número de Nusselt		Factor de fricción f
	$T_s = \text{Const.}$	$q_s = \text{Const.}$	
Circulo 	3,66	4,36	$64,00/\text{Re}$

Fuente: (Cengel, 2007)

Para el cálculo de la transferencia de calor por convección es estimado el número de Nusselt de la Tabla 10 para un flujo de calor constante y así calcular la longitud que se debe utilizar para disipar este calor.

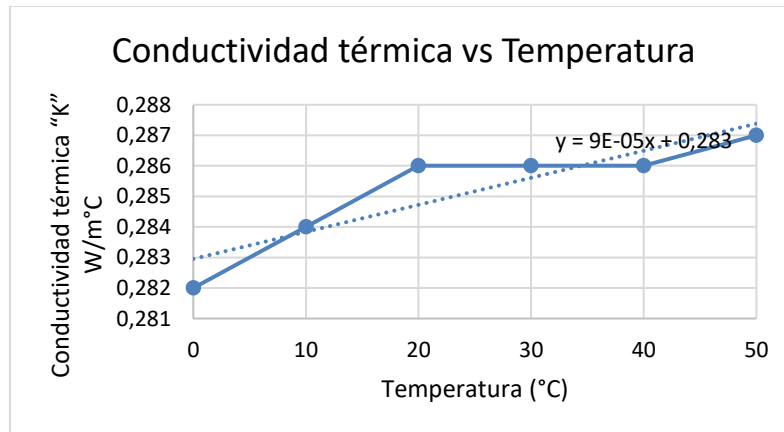
$$Nu = \frac{hD_h}{K} = 4.36 \quad (15)$$

Donde Nu es el número de Nusselt.

h_2 es el coeficiente de transferencia de calor es ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$).

D_h es el diámetro hidráulico del ducto en (m).

Y k la conductividad térmica en ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$).



$$y = 9 * 10^{-5}x + 0,283 \quad (16)$$

De la Ec. (16) se toma el $K_{97,5^{\circ}\text{C}} = 0,292 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}}$, el D_h de un tubo circular es igual al diámetro, con estos valores se halla h_2 despejando de la ecuación (15).

$$h_2 = \frac{4.36 \cdot K}{Dh}$$

$$h_2 = \frac{4.36 \cdot 0.292 \frac{W}{m^{\circ}C}}{3 \cdot 10^{-3} m} = 424,37 \frac{W}{m^2 \cdot C}$$

$$Q_2 = h_2 A (T_{sat} - T_{in}) \quad (17)$$

Una vez conocido h_2 despejamos L_2 de la ecuación (17) para hallar la distancia de calor sensible.

$$Q_2 = h_2 \pi D L_2 (T_{sat} - T_{in})$$

$$L_2 = \frac{Q_2}{h_2 \cdot \pi \cdot D \cdot (T_{sat} - T_{in})}$$

$$L_2 = \frac{187 W}{424,37 \frac{W}{m^2 \cdot C} \cdot \pi \cdot 3 \cdot 10^{-3} m \cdot (180 - 15)^{\circ} C}$$

$$L_2 = 0.284 m$$

3.4.1.4 Distancia de calor de vaporización L_1

Se procede hallar el coeficiente de transferencia de calor $h_1 \left(\frac{W}{m^2 \cdot C} \right)$ del evaporador para poder hallar la distancia L_1 , los valores de la glicerina en estado líquido se utilizan a la temperatura de 180°C y vapor a 188°C, de acuerdo a las funciones para hallar las propiedades de la glicerina.

Para hallar esta distancia de la resistencia térmica en el punto de vaporización se utilizó la correlación de Chen (1966)

$$h_e = h_{evap} + h_{adv} \quad (18)$$

Donde h_e es el coeficiente de transferencia de calor en el evaporador en (W/m²°C).

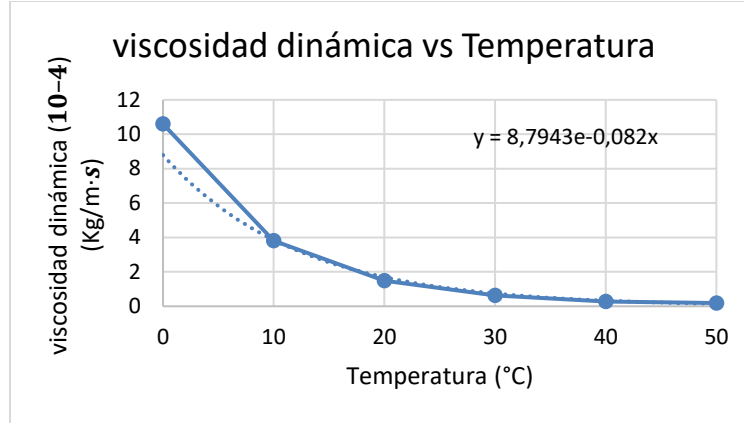
h_{evap} es el coeficiente de evaporación en (W/m²°C)

h_{adv} es el coeficiente de convección en (W/m²°C)

A través de este proceso matemático se conocen varias constantes, debido a que las correlaciones de evaporización manejan el concepto del multiplicador de dos fases, haciendo un concepto similar en el principio al concepto del multiplicador de caída de presión de dos fases de Lockhart y Martinelli (1949), donde X_{tt} es el parámetro turbulento-turbulento de Martinelli. (Mostafa Ghiaasiaan, 2007)

$$X_{tt} = \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0,5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_v}\right)^{0,1} \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,9} \quad (19)$$

Donde el subíndice v es en estado de vapor y el l en estado de líquido.

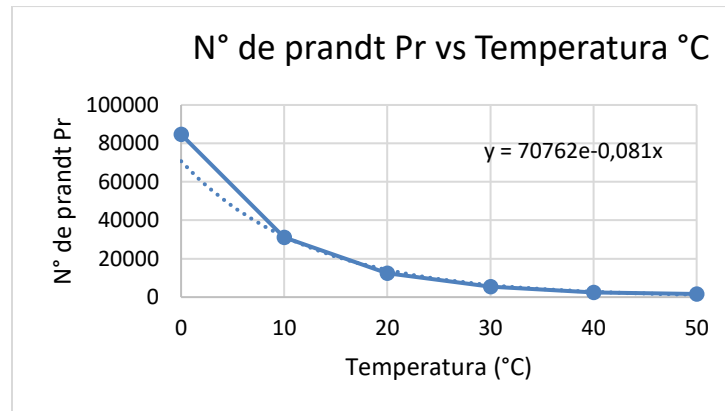


$$y = 8,7943 e^{-0,082x} \quad (20)$$

Se toma el $\mu_{180^{\circ}C} = 3,42 \cdot 10^{-6} \frac{Kg}{m \cdot s}$, $\mu_{188^{\circ}C} = 1,77 \cdot 10^{-6} \frac{Kg}{m \cdot s}$ de la Ec. (20) para encontrar X_{tt} .

$$X_{tt} = \left(\frac{4,0064}{1148}\right)^{0,5} \left(\frac{3,42 \cdot 10^{-6}}{1,77 \cdot 10^{-6}}\right)^{0,1} \left(\frac{1-0,5}{0,5}\right)^{0,9} = 0,063$$

El factor F es la relación entre el número de Reynolds del flujo de dos fases y el número de Reynolds del flujo de líquido, debido a que Chen lo correlacionó empíricamente en forma de gráfica y para el agua, se utiliza otra correlación Para F de Bennett y Chen (1980) de la Ec. (22) .



$$y = 70762 e^{-0,081x} \quad (21)$$

Se toma $Pr_{180^\circ C} = 0,033$, $Pr_{188^\circ C} = 0,017$ de la Ec. (21) y el valor hallado de la ecuación (20) tenemos que el valor de F de la ecuación (22) es:

$$F = \left(\frac{Pr_l + 1}{2} \right)^{0,444} (1 + X_{tt}^{-0,5})^{1,78} \quad (22)$$

$$F = \left(\frac{0,033 + 1}{2} \right)^{0,444} (1 + 0,063^{-0,5})^{1,78} = 13$$

La componente del coeficiente de transferencia de calor para la convección forzada se encuentra a partir de la Ec. (23)

$$h_{adv} = 0,023 \left(\frac{k_l}{D_h} \right) Re_l^{0,8} Pr_l^{0,4} F \quad (23)$$

Donde Re_l es el número de Reynolds del líquido Ec. (13) y Pr_l es el número de Prandtl de la fase líquida.

Se halla el número de Reynolds para la distancia L_1 de la ecuación (13), se toma $v_{180^\circ C} = 2,7 \cdot 10^{-9} \frac{m^2}{s}$.

$$Re = \frac{0,046 \frac{m}{s} \cdot 3 \cdot 10^{-3} m}{2,7 \cdot 10^{-9} \frac{m^2}{s}} = 51111,1$$

Una vez obtenido el Re en ese punto se halla h_{adv} de la ecuación (23). se toma el $K_{180^\circ C} = 0,2992 \frac{W}{m^\circ C}$, $Pr_{180^\circ C} = 0,033$ y F de la ecuación (22).

$$h_{adv} = 0,023 \left(\frac{0,2992 \frac{Kg}{m \cdot s}}{3 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot 51111,1^{0,8} \cdot 0,033^{0,4} \cdot 13$$

$$h_{adv} = 44526,2 \frac{W}{m^2^\circ C}$$

En esta parcela del coeficiente de transferencia de calor se tiene en cuenta la ebullición nucleada basada en la correlación de Forster y Zuber (1955), la cual se modifica para tener en cuenta el sobrecalentamiento promedio reducido en la capa límite térmica por la nucleación de burbujas en las cavidades de las paredes. Chen representó este efecto a través de un factor $S = (\Delta T_e / T_{sat})^{0,99}$, donde Te es el sobrecalentamiento líquido efectivo en la capa límite térmica, aunque también se

correlacionó gráficamente, esta curva es tomada de Collier (1981), y se utilizó la alternativa, propuesta por Bennett y Chen (1980). (Mostafa Ghiaasiaan, 2007)

$$S = 0,9622 - 0,582 \tan^{-1} \left(\frac{Re_l F^{1,25}}{6,18 \cdot 10^4} \right) \quad (24)$$

Nota: Trabajar en radianes la Ec. (24).

$$S = 0,9622 - 0,582 \tan^{-1} \left(\frac{51111,1 \cdot 13^{1,25}}{6,18 \cdot 10^4} \right) = 0,076$$

$$h_{evap} = 0,00122 \left\{ \frac{K_l^{0,79} C p_l^{0,45} \rho_l^{0,49} \{g_c\}^{0,43}}{\sigma^{0,5} \mu_l^{0,29} h_{fg}^{0,24} \rho_v^{0,24}} \right\} \Delta T_{sat}^{0,24} \Delta P_{sat}^{0,75} S \quad (25)$$

Donde K_l es la conductividad térmica del líquido en (W/mK).

$C p_l$ el calor específico del líquido en (J/kgK).

$\{g_c\}^{0,43}$ solo se utiliza para unidades inglesas.

σ es la tensión superficial en (N/m).

μ_l es la viscosidad dinámica del líquido en (kg/ms).

ρ_v densidad del vapor a presión constante en (kg/m³).

h_{fg} es el calor latente de vaporización en (J/kg).

$T_{w,e}$ es la temperatura superficial del evaporador en (K).

T_{sat} es la temperatura de saturación del el líquido fluido en (K).

P_{sat} es la presión de saturación en (Pa).

El delta de temperatura Ec. (26) se refiere a los modos de ebullición nucleada, en donde el ΔT_{sat} está entre 5-30 °C como se observa en la Figura 11.

$$\Delta T_{sat} = T_w - T_{sat} \quad (26)$$

$$\Delta T_{sat} = 188 - 180 = 8^\circ C$$

$$\Delta P_{sat} = P_{sat}(T_w) - P_l \quad (27)$$

Se utiliza la presión atmosférica de 1atm

$$P_{sat} = 101325 Pa$$

$$P_l = \rho g h_{liquido} \quad (28)$$

$$P_l = 1148 \frac{Kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,18m = 2027,14 Pa$$

$$\Delta P_{sat} = 101325 - 2027,14 = 99297,86 Pa$$

$$h_{evap} = 0,00122 \left\{ \frac{0,2992^{0,79} \cdot 3413,24^{0,45} \cdot 1148^{0,49}}{0,0063^{0,5} \cdot 3,42 \cdot 10^{-6^{0,29}} \cdot (974 \cdot 10^3)^{0,24}} \cdot 4,0064^{0,24} \right\} \cdot 8^{0,24} \cdot (101325 - 2027,14)^{0,75} \cdot 0,076$$

$$h_{evap} = 5167,38 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$h_e = 44526,2 + 5167,38 = 49693,58 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ C$$

Con el h_e de convección hallado para el cambio de dos fases se puede proceder para encontrar la distancia de la resistencia térmica en ese punto, la cual es encontrada despejando de la ecuación (29).

$$Q_1 = hA(T - T_{sat}) = h\pi D L_1 (T - T_{sat}) \quad (29)$$

$$L_1 = \frac{Q_{fg}}{h\pi D (T - T_{sat})} = \frac{383W}{49693,58 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \cdot \pi \cdot 3 \times 10^{-3} \cdot 8} = 0,102 \text{ m}$$

$$L_T = 0,284 + 0,102 = 0,39 \text{ m}$$

Tabla 11. Valores hallados con 5 agujeros de rastrillo

calor de vaporización =(Q=W)	383,1
calor sensible (Q=W)	187,1
calor total $C_{vap.} + C_{sens.}$ (W)	570,2
longitud de resistencia (m)	0,39

Tabla 12. Valores hallados con 9 agujeros de rastrillo

calor de vaporización =(Q=W)	689,58
calor sensible (Q=W)	336,83
calor total $C_{vap.} + C_{sens.}$ (W)	1026,41
longitud de resistencia (m)	0,7

3.4.2 Pérdida de calor por convección natural

Antes de ser dirigido el vapor al túnel de viento este pasa por un ducto donde sufre una pérdida de calor por convección natural y radiación, en donde esta última tiene un límite para la potencia emisiva explicada por la ley de Stefan-Boltzmann (Incropera & DeWitt, 1999).

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (30)$$

Donde T_s es la temperatura absoluta de la superficie en (K).
 σ es la constante Stefan-Boltzmann ($\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$).

Aunque el flujo de calor emitido por una superficie real es menor que la de un cuerpo negro a la misma temperatura y está dada por:

$$E = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (31)$$

Donde ϵ es una propiedad de la superficie denominada emisividad, con valores de $0 < \epsilon < 1$, el cual cada material y su tipo de acabado cuenta con su emisividad que se presenta en la Tabla 13. Emisividad de algunos materiales a 300K.

Tabla 13. Emisividad de algunos materiales a 300K

Material	Emisividad
Hoja de aluminio	0,07
Aluminio anodizado	0,82
Cobre pulido	0,03
Oro pulido	0,03
Plata pulida	0,02
Acero inoxidable pulido	0,17
Pintura negra	0,98
Pintura blanca	0,90
Pavimento de asfalto	0,85-0,93
Ladrillo rojo	0,93-0,96
Piel humana	0,95
Madera	0,82-0,92
Suelo	0,93-0,96
Agua	0,96
Vegetación	0,92-0,96

Fuente: (Cengel, 2007)

De acuerdo con (Incropera & DeWitt, 1999), se tiene que la pérdida de calor por radiación está dada por:

$$Q_{rad} = A \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{alr}^4) \quad (32)$$

Donde Q_{rad} es la pérdida de calor por radiación en (W); Aunque en este caso hay presente otra pérdida de calor que es la convección natural, la cual se da de la siguiente manera:

$$Q_{cov} = hA(T_s - T_{\infty}) \quad (33)$$

Donde T_{alr} y T_{∞} se toma la misma temperatura ambiente, a lo que nos da una sumatoria de:

$$Q = Q_{cov} + Q_{rad} = hA(T_s - T_{\infty}) + A \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{alr}^4) \quad (34)$$

De acuerdo al lugar donde se lleva a cabo las pruebas con el generador de humo realizamos una suposición del coeficiente de transferencia de calor de $10\text{W/m}^2\text{°C}$ para convección natural, teniendo en cuenta que el material del ducto por donde pasa el humo es de cobre. Tomamos los valores que se presentan en la Tabla 13, el área= $2\pi rh=2\pi \cdot 1,5 \times 10^{-3} \cdot 0,82 = 7,73 \cdot 10^{-3}\text{m}^2$

$$Q = \frac{10\text{W}}{\text{m}^2\text{°C}} (7,73 \cdot 10^{-3} \text{m}^2)(188 - 15) + (7,73 \cdot 10^{-3} \text{m}^2)(0,03) \left(\frac{5,67 \times \text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} \right) (188^4 - 15^4)$$

$$Q = 13,4 \text{ W} + 0,02\text{W} = 13,42 \text{ W}$$

3.4.3 Pérdida de calor por convección forzada

Otra de las pérdidas de calor que se presenta en el ducto que está dentro del túnel de viento es debida a la convección forzada generada por la corriente de aire, esta sección de ducto posee una longitud de 0,65m con un diámetro de 8mm, Para estimar esta pérdida de calor se emplea el abordaje de circuito térmico equivalente (Cengel, 2007).

El modelo físico empleado para este problema es presentado en la Figura 59.

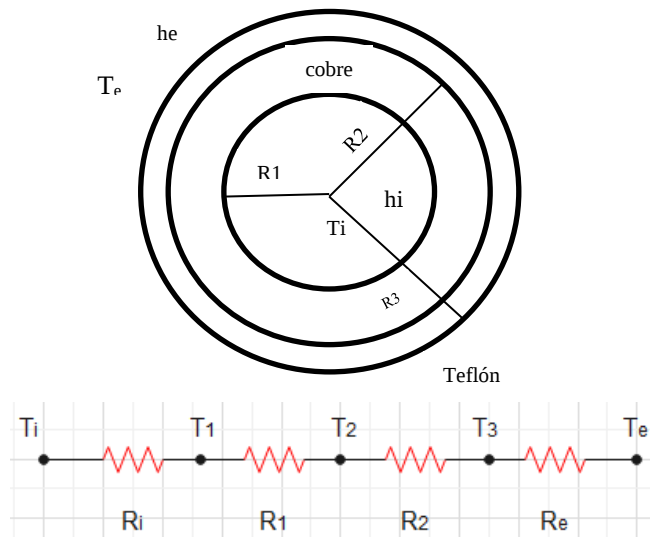


Figura 59. sección transversal del ducto que sufre convección forzada

Para el cálculo de la transferencia de calor por convección forzada es empleada una velocidad del viento, que va de 0-25 m/s, y una temperatura T del interior del túnel de viento a 15°C , T interna del ducto con la glicerina de 188°C .

3.4.3.1 Flujo a través de cilindros

La longitud característica para un cilindro circular se toma igual al diámetro externo, el número de Reynolds se define en la Ec. (13), donde la velocidad es la capacidad del túnel de viento. El número de Reynolds crítico para este problema es de $Re_{cr} \approx 200.000$, es decir que la capa limite es laminar $Re < 200.000$ y turbulento $Re > 200.000$ (Cengel, 2007).

3.4.3.2 Coeficiente de transferencia de calor

Para hallar la pérdida de calor por convección forzada es necesario determinar el coeficiente de transferencias de calor en las diferentes velocidades e identificar unas variables de los fluidos como el número de Nusselt para el flujo cruzado sobre un cilindro Ec. (35), se presenta por Churchill y Bernstein

$$Nu_{cil} = \frac{hD}{K} = 0,3 + \frac{0,62Re^{1/2}Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (35)$$

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor externo en ($W/m^2\text{°C}$).

k la conductividad del aire ($W/m\text{°C}$).

Pr número de Prandtl.

A pesar de saber las propiedades a emplear, las mismas están limitadas por la temperatura de película, $Re, Pr > 0,2$, estas se evalúan $T_f = (T_\infty + T_s) / 2$, la cual es el promedio de la temperatura de la corriente y de la superficie.

Tabla 14. Propiedades del aire

$T_\infty \text{°C}$	15
$T_s \text{°C}$	188
T_p	101,5
valores de T promedio	
$k \text{ (w/m k)}$	0,031055
$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	0,9422
Pr	0,710815
$\mu \text{ (kg/ms)}$	0,000021872

Fuente: (Cengel, 2007)

Tabla 15. Propiedades del teflón como aislante a 20°C

k teflón (W/m°C)	0,35
densidad (kg/m³)	2200
emisividad ξ teflón	0,9
cte. Stefan-Boltzmann σ (w/m²K⁴)	$5,67 \cdot 10^{-08}$
$Q_{rad} = \xi \sigma A (T_s^4 - T_{alr}^4)$ (W)	1,4318426

Fuente: (Incropera & DeWitt, 1999)

La conductividad térmica del cobre es de 401 W/m°C (Cengel, 2007). A continuación, se presentan las ecuaciones que se van utilizar para hallar las resistencias del circuito térmico presentadas en la Figura 59. junto con los parámetros geométricos del ducto y el túnel de viento.

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \quad (36)$$

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi KL} \quad (37)$$

Las resistencias térmicas R_i y la R_e se halla con la Ec. (36), las R_{cobre} y $R_{teflón}$ con la Ec. (37).

Se presentarán dos valores de perdida de calor de acuerdo a los parámetros del ducto y las propiedades indicadas en Tabla 14 (propiedades del aire), Tabla 15 (propiedades del teflón), Tabla 16 (parámetros del ducto que dirige al túnel de viento), Tabla 17 (propiedades del cobre).

Tabla 16. Datos del ducto

longitud (m)	0,65
Diámetro externo sin teflón (m)	0,005
Diámetro externo con teflón(m)	0,010
área externa sin teflón (m²)	0,0102
área externa con teflón (m²)	0,0204
área interna (m²)	0,0061
radio 1 (mm)	1,5
radio 2 (mm)	2,5
radio 3 (mm)	5

Tabla 17. Propiedades del cobre a 20°C

k (W/m°C)	401
emisividad ξ	0,03
Constante de Stefan-Boltzmann σ (w/m ² k ⁴)	5,67E ⁻⁰⁸
$Q_{rad}=\xi\sigma A(T_s^4-T_{alr}^4)$	0,021694585

Tabla 18. Perdida de calor por convección forzada sin teflón

v (m/s)	$Re= \rho vD/\mu$	Nu	h_{conv} (W/m ² °C) = Nuk/D	Q (W)= $hA(T_s-T_{am})$	$Q_t(W)= Q_{conv}+Q_{rad}$
1	215,39	10,20	63,32	111,85	111,87
2	430,78	13,22	82,14	145,09	145,11
3	646,17	15,57	96,72	170,84	170,86
4	861,56	17,57	109,11	192,73	192,75
5	1076,95	19,34	120,11	212,15	212,17
6	1292,34	20,95	130,11	229,82	229,85
7	1507,73	22,44	139,37	246,17	246,20
8	1723,12	23,83	148,03	261,48	261,50
9	1938,51	25,15	156,22	275,93	275,96
10	2153,90	26,40	163,99	289,67	289,69
11	2369,28	27,60	171,43	302,81	302,83
12	2584,67	28,75	178,57	315,41	315,43
13	2800,06	29,86	185,44	327,56	327,58
14	3015,45	30,93	192,09	339,29	339,32
15	3230,84	31,96	198,52	350,67	350,69
16	3446,23	32,97	204,78	361,71	361,73
17	3661,62	33,95	210,86	372,46	372,48
18	3877,01	34,90	216,79	382,93	382,95
19	4092,40	35,84	222,58	393,16	393,18
20	4307,79	36,75	228,24	403,15	403,18
21	4523,18	37,64	233,78	412,94	412,96
22	4738,57	38,51	239,21	422,53	422,55
23	4953,96	39,37	244,53	431,93	431,95
24	5169,35	40,21	249,76	441,16	441,19
25	5384,74	41,04	254,89	450,24	450,26

Tabla 19. Pérdida de calor por convección forzada con teflón como aislante

v (m/s)	$Re = \rho v D / \mu$	Nu	$h_{conv} (W/m^2\text{°C}) = Nuk/D$	$R_{conv\ ext} (\text{°C/W})$	$R_t (\text{°C/W})$	$Q[W] = T_s - T_e/R_t$	$Q_t[W] = Q_{conv} + Q_{rad}$
1	430,78	13,22	41,07	1,19	1,68	102,9	104,2
2	861,56	17,57	54,56	0,90	1,39	124,8	126,1
3	1292,34	20,95	65,06	0,75	1,24	139,4	140,7
4	1723,12	23,83	74,02	0,66	1,15	150,4	151,7
5	2153,90	26,40	82,00	0,60	1,09	159,3	160,6
6	2584,67	28,75	89,28	0,55	1,04	166,8	168,1
7	3015,45	30,93	96,04	0,51	1,00	173,3	174,6
8	3446,23	32,97	102,39	0,48	0,97	178,9	180,2
9	3877,01	34,90	108,40	0,45	0,94	184,0	185,3
10	4307,79	36,75	114,12	0,43	0,92	188,5	189,8
11	4738,57	38,51	119,60	0,41	0,90	192,7	194,0
12	5169,35	40,21	124,88	0,39	0,88	196,4	197,7
13	5600,13	41,85	129,97	0,38	0,87	199,9	201,2
14	6030,91	43,44	134,90	0,36	0,85	203,2	204,5
15	6461,69	44,98	139,69	0,35	0,84	206,2	207,5
16	6892,47	46,48	144,35	0,34	0,83	209,0	210,3
17	7323,24	47,94	148,89	0,33	0,82	211,6	212,9
18	7754,02	49,37	153,32	0,32	0,81	214,1	215,4
19	8184,80	50,77	157,66	0,31	0,80	216,5	217,8
20	8615,58	52,13	161,90	0,30	0,79	218,7	220,0
21	9046,36	53,47	166,07	0,29	0,78	220,8	222,1
22	9477,14	54,79	170,15	0,29	0,78	222,8	224,1
23	9907,92	56,08	174,16	0,28	0,77	224,8	226,1
24	10338,70	57,35	178,11	0,27	0,76	226,6	227,9
25	10769,48	58,60	181,99	0,27	0,76	228,4	229,7

Tabla 20. Porcentaje ahorrado en la pérdida de calor

v (m/s)	Calor perdido sin teflón [W]	Calor perdido con teflón [W]	% calor no perdido
1	111,87	104,2	7,98
2	145,11	126,1	13,98
3	170,86	140,7	18,42
4	192,75	151,7	21,95
5	212,17	160,6	24,89
6	229,85	168,1	27,41
7	246,20	174,6	29,61

8	261,50	180,2	31,57
9	275,96	185,3	33,32
10	289,69	189,8	34,92
11	302,83	194,0	36,37
12	315,43	197,7	37,72
13	327,58	201,2	38,96
14	339,32	204,5	40,12
15	350,69	207,5	41,20
16	361,73	210,3	42,22
17	372,48	212,9	43,18
18	382,95	215,4	44,08
19	393,18	217,8	44,94
20	403,18	220,0	45,75
21	412,96	222,1	46,52
22	422,55	224,1	47,26
23	431,95	226,1	47,96
24	441,19	227,9	48,64
25	450,26	229,7	49,28

En la Tabla 18 se observa una pérdida de calor a diferentes velocidades, está perdida de calor casi iguala a la que se necesita para evaporar, condensando así el vapor; al aplicarle teflón la disminución de perdida de calor es visible (Tabla 19), se realiza la sumatoria de resistencias a la que se le incluye la de $R_{int}= 0,0033$ ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$) el cual es calculada con el coeficiente de convección $h_{int}(\text{W}/\text{m}^2\text{C}) =49693,58$ Ec. (18), también la $R_{cobre}=0,0003$ ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$) y la $R_{teflón}=0,485$ ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$) y la $R_{ext.}$ ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$) que varía con la velocidad del túnel de viento. Al realizar una comparación, se observa la diferencia en la cantidad del porcentaje del calor perdido con aislante y sin este en la Tabla 20, aunque sigue siendo alto, se le añade una segunda resistencia para poder sobrecalentar el humo y no se condense.

3.4.4 Determinación de la resistencia eléctrica evaporadora

La resistencia eléctrica es la encargada de transmitir calor hacia el tubo que transporta glicerina, debido a esto la glicerina alcanza su punto de vaporización y se genera el humo. Sin embargo, resulta pertinente calcular el valor exacto de la resistencia al momento de alcanzar la temperatura del punto de ebullición de la glicerina, con el fin de no superar este valor de temperatura de forma excesiva y causar daños colaterales en el generador de humo. Es importante no exceder la temperatura del punto de fusión de la resistencia causando que se funda y evitar quemar elementos aislantes, además de evitar que el recipiente se torne excesivamente caliente aumentando las probabilidades de un accidente. Para este procedimiento nos referenciamos de Georg Simón Ohm (Dorf & Svoboda, 2011):

$$P = v_e \cdot i \quad (38)$$

Donde P es la potencia en (W).

v_e es el voltaje en (v).

i la corriente en (A).

$$i = \frac{A \cdot v_e}{\rho_e \cdot L} \quad (39)$$

La resistencia encargada de evaporar consiste en una alambre recubierto con un aislante cerámico y una carcasa de cobre en forma de U, el cual es soldado al ducto que transporta el fluido de trabajo. Esta resistencia es comercial, según sus especificaciones tiene una potencia nominal de 2000W operando a 220 V.

Donde A es el área transversal de la resistencia en (m^2).

ρ_e la resistividad del material del cable en ($\Omega \cdot m$).

L la longitud del cable en (m).

Otro método de calcular la resistencia eléctrica de acuerdo a Ohm se observa a continuación .

$$R = \rho_e \frac{L}{A} \quad (40)$$

Donde R [Ω] es la resistencia

Relacionando la Ec. (39) con la (40), se obtiene.

$$v_e = R \cdot i \quad (41)$$

Esta resistencia eléctrica al no estar en contacto directo con la tubería se le adicionada pasta térmica y un alambre de cobre que se enrolla en su superficie externa para aumentar la conducción de calor y suponer así que el calor le llega a toda el área externa del ducto.

Para determinar la resistividad de la resistencia eléctrica se utiliza la Ec. (38) (Vértiz Aguirre, 2015), obteniendo una corriente de 9,09 A, luego utilizamos la Ec. (41), la cual tendrá como resistencia 24,2 Ω .

Tabla 21. Resistividad de algunos metales

Resistividad de algunos materiales	
Metal	ρ_e en $\Omega \cdot m$ a $0^\circ C$
Plata	$1,06 \times 10^{-8}$
Cobre	$1,72 \times 10^{-8}$
Aluminio	$3,21 \times 10^{-8}$
Platino	$11,05 \times 10^{-8}$
Mercurio	$94,10 \times 10^{-8}$

Fuente: (Vértiz Aguirre, 2015)

Variación de la resistencia con la temperatura

$$R_t = R_o(1 + \alpha T) \quad (42)$$

Donde α es el coeficiente de temperatura en (1/°C).

T es la temperatura del conductor (*Boletín Científico: UAEH*, n.d.).

En este caso se tiene que la temperatura de ebullición de la glicerina es de 180 °C Tabla 8, pero la resistencia debe de superar ese valor con el fin de garantizar la vaporización de la glicerina y para considerar perdidas que pueda tener, por lo cual la resistencia eléctrica debe de alcanzar un valor constante de 250 °C

Tabla 22. Coeficiente de temperatura α de algunas sustancias

sustancias	α 1/°C
Acero	3×10^{-3}
Plata	$3,7 \times 10^{-3}$
Cobre	$3,8 \times 10^{-3}$
Platino	$3,9 \times 10^{-3}$
Fierro	$5,1 \times 10^{-3}$
Níquel	$8,8 \times 10^{-3}$
Carbón	-5×10^{-3}

Fuente: (Vértiz Aguirre, 2015)

$$R_t = 24,2\Omega(1 + 3,8 \cdot 10^{-3} \left[\frac{1}{^\circ\text{C}} \right] \cdot 250 [^\circ\text{C}])$$

$$R_t = 47,19[\Omega]$$

3.4.5 Determinación de la resistencia eléctrica secundaria

Esta resistencia eléctrica es la encargada de transmitir calor hacia el tubo que transporta el vapor producido en la primera sección de la tubería. Debido a que sufre pérdida de calor por convección natural y forzada se suministra una cantidad extra de calor con el fin de mantener el humo. Sin embargo, resulta pertinente calcular el valor de la resistencia secundaria al momento de alcanzar la temperatura de vaporización de la glicerina.

La resistencia eléctrica encargada de mantener la temperatura del humo y evitar la condensación en el ducto que sufre convección forzada se basa en un alambre de ferroníquel que se enrolla alrededor del ducto antes del que va dirigido al túnel de viento en espiral.

Tabla 23. Características de aleación de Fe-Cr-Al

Características		1Cr13Al4	0Cr25Al5	0Cr23Al6	0Cr23Al5	0Cr21Al4	0Cr21Al6Nb	0Cr27Al7Mo2
Principales componentes químicos %	Cr	12,0-15,0	23,0-26,0	19,0-22,0	22,5-24,5	18,0-21,0	21,0-23,0	26,5-27,8
	Al	4,0-6,0	4,5-6,5	5,0-7,0	4,2-5,0	3,0-4,2	5,0-7,0	6,0-7,0
	RE	cantidad correcta	cantidad correcta	cantidad correcta	cantidad correcta	cantidad correcta	cantidad correcta	cantidad correcta
	Fe	Los otros	Los otros	Los otros	Los otros	Los otros	Los otros	Los otros
Temperatura máxima de trabajo (°C)		950	1250	1250	1250	1100	1350	1400
Resistividad $\mu\Omega\text{m}$ 20°C		1,25	1,42	1,42	1,35	1,23	1,45	1,53
Densidad g/cm ³		7,4	7,1	7,16	7,25	7,35	7,1	7,1
Coefficiente de conductividad térmica KJ/mh°C		52,7	46,1	63,2	60,2	46,9	46,1	45,2
Coefficiente de expansión lineal $\alpha \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$		15,4	16	14,7	15	13,5	16	16
Punto de fusión °C		1450	1500	1500	1500	1500	1510	1520
Resistencia de tensión MPa		580-680	630-780	630-780	630-780	600-700	650-800	680-830
Porcentaje de extensión %		>16	>12	>12	>12	>12	>12	>10
Porcentaje de reducción de sección %		65-75	60-75	65-75	65-75	65-75	65-75	65-75
Doblar repetidas veces		>5	>5	>5	>5	>5	>5	>5
Dureza HB		200-260	200-260	200-260	200-260	200-260	200-260	200-260
Constitución microscópica		ferrita	ferrita	ferrita	ferrita	ferrita	ferrita	ferrita
Magnetismo		Magnética	Magnética	Magnética	Magnética	Magnética	Magnética	Magnética

Fuente: (Tope, 2010)

El alambre de ferroníquel tiene un diámetro de 0,2 mm, este alambre cubrirá el tubo en espirales con el fin de corresponder con el calor que necesita humo.

$$A = 2 \pi (0,1 \cdot 10^{-3}m)^2 = 6,3 \cdot 10^{-8}m^2$$

Para determinar la resistividad se utiliza la Ec. (40) (*Boletín Científico: UAEH*, n.d.).

Para hallar la longitud del alambre tomamos la potencia máxima que se debe cumplir para mantener el humo teniendo en cuenta la perdida de calor con el teflón como aislante de la Tabla 19. Despejando la corriente de la ecuación (38) obtenemos:

$$i_1 = \frac{229,7}{100} = 2,3 \text{ A}$$

Conocidos la corriente y el valor de la resistividad de la Tabla 23, se halla la longitud del ferroníquel de la ecuación (39).

$$\rho_e = 1,25 \cdot 10^{-6} \Omega m$$

$$L_2 = \frac{6,3 \cdot 10^{-8} m^2 \cdot 100 v}{1,25 \cdot 10^{-6} \Omega m \cdot 2,3 \text{ A}} = 2,2 m$$

3.4.6 Determinación de la potencia de la mini-bomba

Para el cálculo de la potencia del flujo, partimos de la Ec. (43) de la energía cinética

$$E_k = \frac{1}{2} m \rho v^2 \quad (43)$$

Donde E_k es la energía cinética en $\text{kg/m}^2 \text{s}^2$,

m es la masa del fluido en (kg).

Para que la energía quede en función del tiempo en la Ec. (44) se reescribe:

$$\dot{P} = \frac{1}{2} \dot{m} \rho v^2 \quad (44)$$

Donde $\dot{P}$ es la potencia del fluido en (W).

Al reemplazar la Ec. (9) en la Ec. (44) se obtiene:

$$\dot{P} = \frac{1}{2} \rho^2 A v^3 \quad (45)$$

La mini-bomba será la encargada de mover la glicerina líquida desde el tanque hasta la resistencia para ser evaporada; según la tabla 4 se tiene que la densidad de la glicerina en estado líquido es 1261 kg/m^3 , el diámetro del tubo es de 5.5 mm , y la velocidad a la que se desea que se mueva la glicerina en el tubo capilar de 3 mm antes de evaporar es de 0.046 m/s^2 . La velocidad necesaria de la bomba es calculada a través de la ecuación de continuidad, Ec. (46).

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (46)$$

Se tiene que el área es Ec. (10):

$$A = 2\pi (2,75 \cdot 10^{-3} m)^2 = 4,75 \cdot 10^{-5} m^2$$

$$V_2 = \frac{0.046 \frac{m}{s} \cdot 7,1 \cdot 10^{-6} m^2}{4,75 \cdot 10^{-5} m^2} = 0.0069 m/s$$

La potencia de la mini-bomba es Ec. (44):

$$P_{MB} = \frac{1}{2} \cdot \left(1261 \frac{Kg}{m^3} \right)^2 \cdot 4,75 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot \left(0.0069 \frac{m}{s} \right)^3 = 1,24 \cdot 10^{-5} W$$

Los cálculos que se realizaron son de utilidad para la compra de partes y construcción del equipo con el fin de no tener gastos innecesarios según su funciones, también ayudan para solucionar obstáculos que se presentaron en la instalación del equipo, como la convección forzada. La correlación que se utiliza para la evaporización se escogió por su facilidad de entendimiento y a la alta gama de fluidos que es utilizada, además tiene una serie de variables que son halladas de manera concreta.

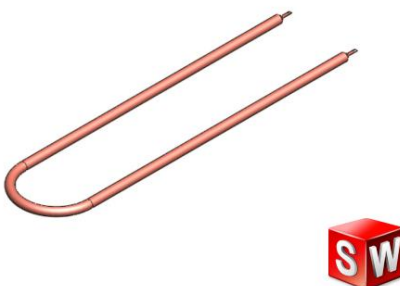
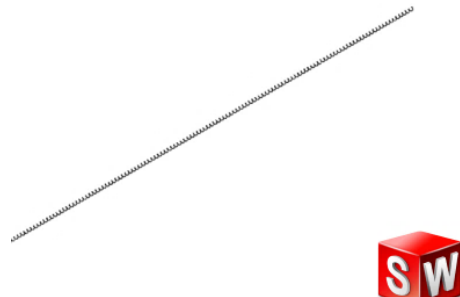
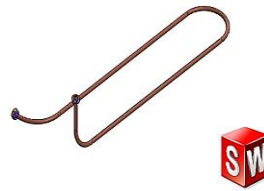
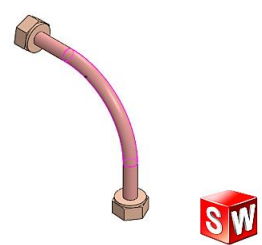
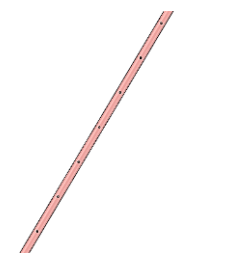
4. RESULTADOS

El siguiente capítulo presenta como resultados, el diseño del prototipo realizado en SolidWorks, la descripción de la construcción del generador de humo, y la instalación en el túnel de viento del laboratorio de mecánica de fluidos del programa de ingeniería mecánica de la universidad de pamplona

4.1 PROTOTIPO EN CAD

El diseño del generador de humo en CAD es realizado en el software SolidWorks. Un resumen de los principales componentes es presentado en la Tabla 24.

Tabla 24. Piezas del generador diseñadas en SolidWorks

Dispositivo: Resistencias eléctricas			
 Figura 60. Resistencia evaporadora		 Figura 61. Resistencia secundaria	
Dispositivo: Ductos o tubo capilar			
 Figura 62. Ducto evaporador	 Figura 63. Ducto de segunda resistencia	 Figura 64. Desvió de líquido	 Figura 65. Ducto dirigido al túnel de viento

Dispositivo: Recipiente de flujo

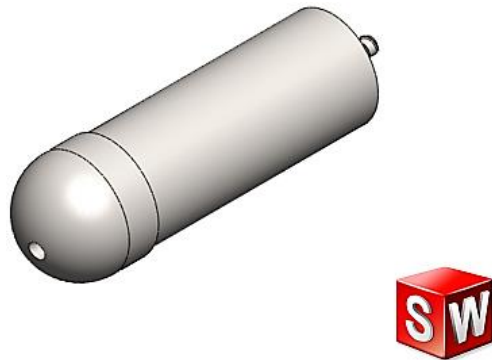


Figura 66. Recipiente del líquido

Dispositivo: Estructura

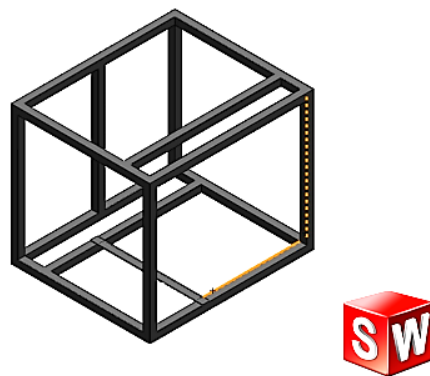


Figura 67. Estructura del equipo

Dispositivo: Llave reguladora de flujo y desvío de condensado

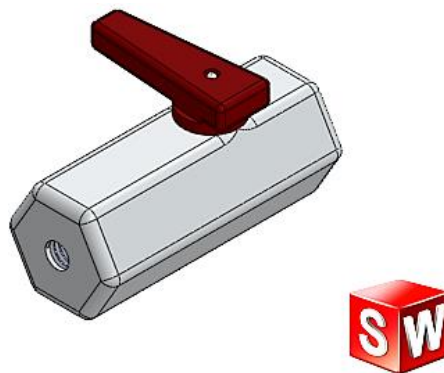


Figura 68. Llave de paso de flujo

Dispositivo: Transportar flujo



Figura 69. Mini-bomba no sumergible

Dispositivo: Pantalla de mando



Figura 70. Pantalla de mando con sus respectivos reguladores y pantallas

Dispositivo: Uniones

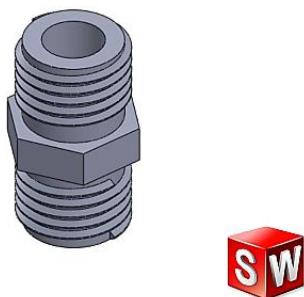


Figura 71. Racor doble macho

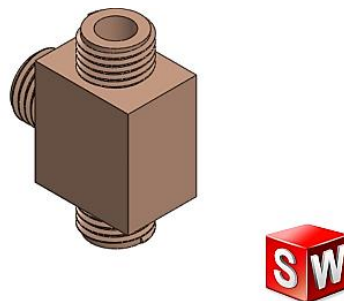


Figura 72. T

Una vez diseñadas las piezas se realiza un ensamble obteniendo una vista preliminar de la versión final del equipo (ver Figura 73) y a su vez se generan los planos del ensamblaje que se observa en el anexo I.

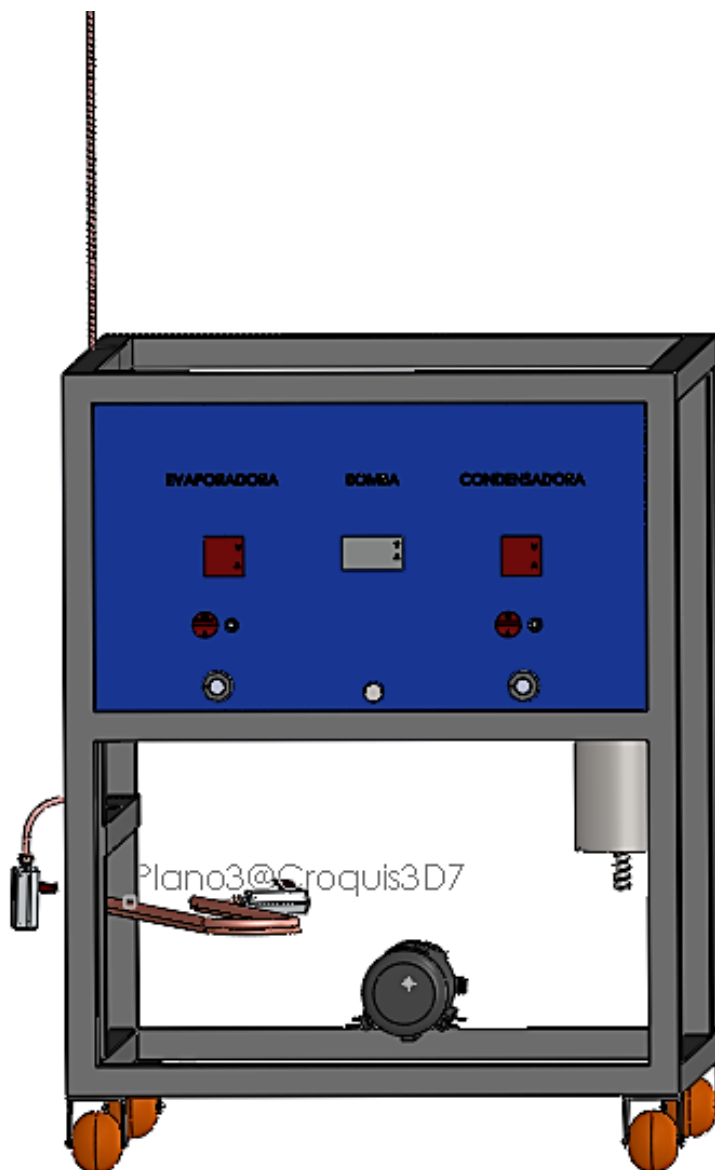


Figura 73. Equipo ensamblado en SolidWorks

4.2 CONSTRUCCIÓN DEL GENERADOR DE HUMO

En esta sección es presentada una descripción del proceso de fabricación de los principales componentes empleados en la construcción del prototipo de generador de humo propuesto. En la Figura 74 se presenta el detalle de elaboración de la resistencia principal responsable por el calentamiento y evaporación del fluido de trabajo.



Figura 74. resistencia primaria

La resistencia es acoplada al tubo de transporte de fluido empleando soldadura de oxiacetilénica. Luego se procede a rellenar con pasta térmica los espacios vacíos (sin soldadura) para aumentar la conducción de calor, alrededor del conjunto tubo-resistencia eléctrica se enrolla alambre de cobre con el mismo propósito como se observa en la Figura 74. Seguidamente, se cubre todo el montaje con cinta térmica que soporta 1100 °C con el fin de aislarlo del ambiente. Finalmente es colocada una cubierta de teflón sobre la cinta térmica fabricada de fibra de vidrio para evitar el contacto con el operador como se muestra en la Figura 75.



Figura 75. resistencia térmica terminada

Luego se procede a la conexión del PWM con la bomba elegida para impulsar el fluido de trabajo, esto con el fin de regular la cantidad de flujo a evaporar según sea requerido por el túnel de viento como se observa en la Figura 76.



Figura 76. Detalle interno de regulador PWM.

Para compensar las pérdidas de calor con el ambiente en las líneas de vapor es adicionada una segunda resistencia basada en un alambre de ferroníquel. Primero se aísla el ducto encargado de

llevar el humo con cinta térmica que se muestra en la Figura 77 a), para luego enrollar el ferroníquel y crear una resistencia encargada de evitar la condensación del humo hasta su inyección en el túnel de viento, mostrada en la Figura 77 b). La resistencia es cubierta con cinta térmica con el fin de aislarla térmicamente y seguido de una cubierta de teflón como descrito para la resistencia evaporadora (ver Figura 77 c).

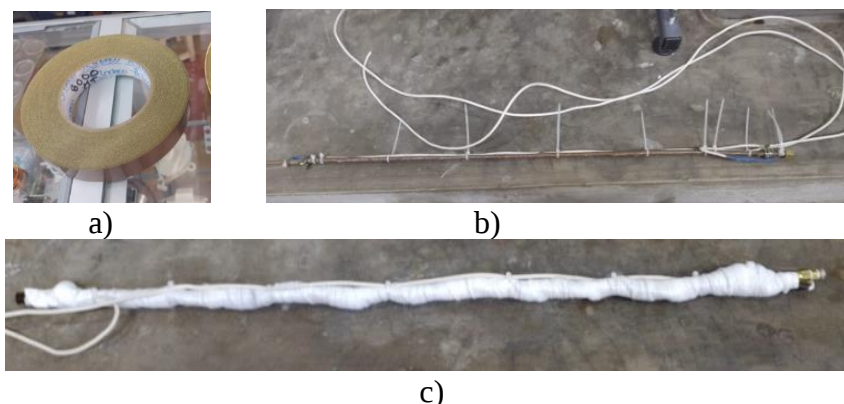


Figura 77. a) cinta térmica aislante, 300°C, b) resistencia eléctrica con ferroníquel, c) resistencia térmica secundaria terminada.

Se realiza conexiones del recipiente de almacenamiento del líquido hasta la bomba; antes de realizar esta conexión se pone un nivel por gravedad con una manguera transparente. La bomba es a su vez conectada a una válvula manual que actúa como un segundo controlador del flujo que va para la resistencia primaria. Entre la resistencia evaporadora y secundaria se encuentra un desvío con una llave para drenar el líquido que al inicio de operación no alcanza a evaporarse por completo y recoger el que se condensa después de apagar el equipo. Una segunda resistencia es instalada en la tubería que transportar el vapor hasta el túnel de viento. La tubería final que contiene los agujeros de inyección es aislada por medio de un recubrimiento de cinta de teflón para evitar las pérdidas de calor por la convección forzada que sufre por las velocidades del túnel de viento como se observa en la Figura 78.

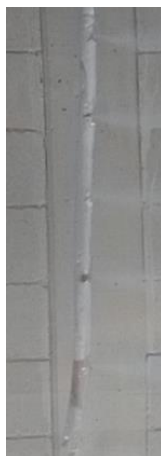


Figura 78. Ducto envuelto en teflón encargado de llevar el humo al túnel de viento

Se procede a realizar las conexiones eléctricas para el control térmico de las dos resistencias y de la bomba a cada conexión, se implementa un fusible para evitar daños a las partes del equipo por una sobrecarga o cualquier incidente, esto con todo el equipo de seguridad y los materiales requeridos para el aislamiento eléctrico. Las dos resistencias y la bomba están conectadas a una pantalla led que muestra sus corrientes AC y DC con el fin de poder controlar la velocidad de la bomba y temperatura. De la información que proveen las lecturas de corriente y voltaje es calculada la potencia suministrada al fluido de trabajo, en la Figura 80 se muestra la pantalla principal para el control y las conexiones eléctricas.

Sin olvidar lo menos importante pero vital se construye una estructura en acero AISI 1020 con perfil cuadrado hueco de 1 pulgada en donde se sujetan las piezas como se observa en la Figura 79.

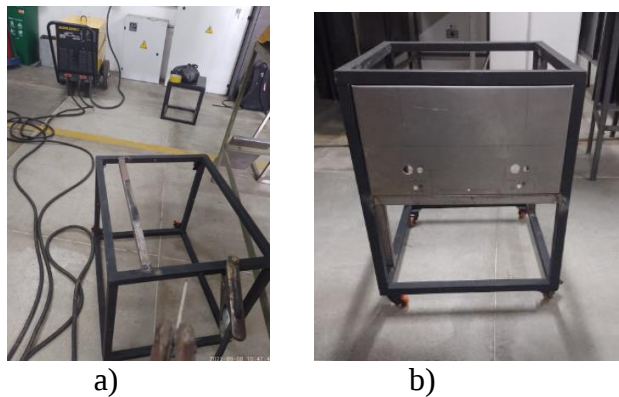


Figura 79. a) y b) Construcción de la estructura para montar los equipos.

Una vez fabricada la estructura se procede al montaje y distribuir los equipos junto con la sección de control. (ver Figura 80).

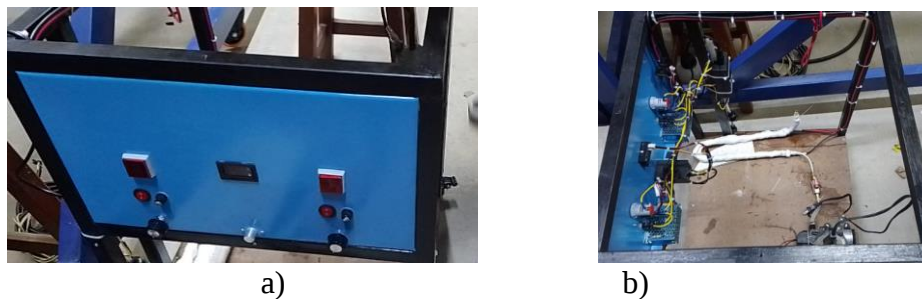


Figura 80. a) lado de control de temperatura de las resistencias y la bomba b) conexión eléctrica y de las piezas del prototipo

4.3 INSTALACIÓN EN EL TÚNEL DE VIENTO

Una vez construido el equipo se procede a la instalación en el túnel de viento. Como primera fase se realiza un agujero por la parte inferior de la sección del canal del túnel para poder ingresar el ducto encargado de dirigir las líneas de flujo en el túnel. En la Figura 81 se puede observar en detalle esta instalación.



Figura 81. Instalación del equipo en el túnel de viento

El túnel de viento se cubre con plástico negro con el fin de mejorar la visualización de las líneas de flujo al crear un contraste de colores entre el vapor y las paredes (ver Figura 82).



Figura 82. Túnel de viento cubierto con plástico negro para mejor la observación de las líneas de flujo

Además, bombillos led de color rojo se instalan para facilitar la iluminación del canal del túnel y la visualización de las líneas de flujo como presentado en la Figura 83.



Figura 83. Instalación de bombillos led dentro del túnel de viento

La instalación de iluminación es basada en 4 bombillos led de color rojo conectados en serie. Estos bombillos tienen un consumo de 3V y la energía es suministrada por una pila de 9V, Los cables que llevan la energía a los bombillos son soportados por un tubo de cobre que es introducido en el interior del canal del túnel de viento.

4.4 OPERACIONALIZACIÓN DEL EQUIPO

Una vez instalado el equipo se realizan pruebas del funcionamiento del equipo a diferentes velocidades del túnel de viento con los dos tipos de rastrillo que se construyó y un ducto con una salida (ver Figura 85). En la Figura 84 se presenta un gráfico con las velocidades del túnel medidas con un tubo Pitot en función de la frecuencia del variador de velocidad del motor del ventilador. La gráfica se realiza de acuerdo con los datos de calibración del túnel que se presentan en la Tabla 25. Datos del túnel de viento.

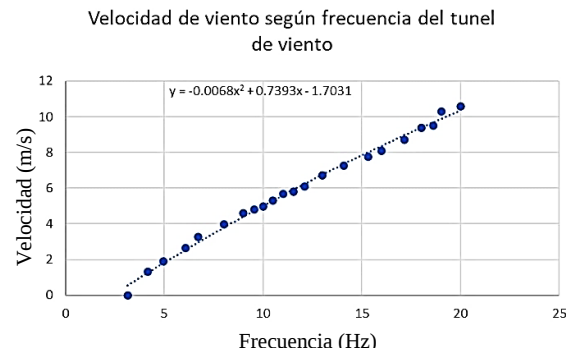


Figura 84. Velocidad (m/s) vs frecuencia del túnel de viento.

Fuente: auxiliar de laboratorio de fluidos

Tabla 25. Datos del túnel de viento.

Frecuencia (Hz)	Velocidad (m/s)	Frecuencia (Hz)	Velocidad (m/s)
3,1	NAN	11,53	5,82
4,2	1,33	12,12	6,11
5,0	1,88	12,99	6,74
6,1	2,66	14,09	7,28
6,7	3,26	15,33	7,77
8,0	4,00	15,99	8,10
9,0	4,62	17,15	8,73
9,1	4,80	18,03	9,40
10,8	4,98	18,61	9,52
10,5	5,32	19,05	10,30
11,0	6,00	20,00	10,60

Fuente: auxiliar de laboratorio de fluidos

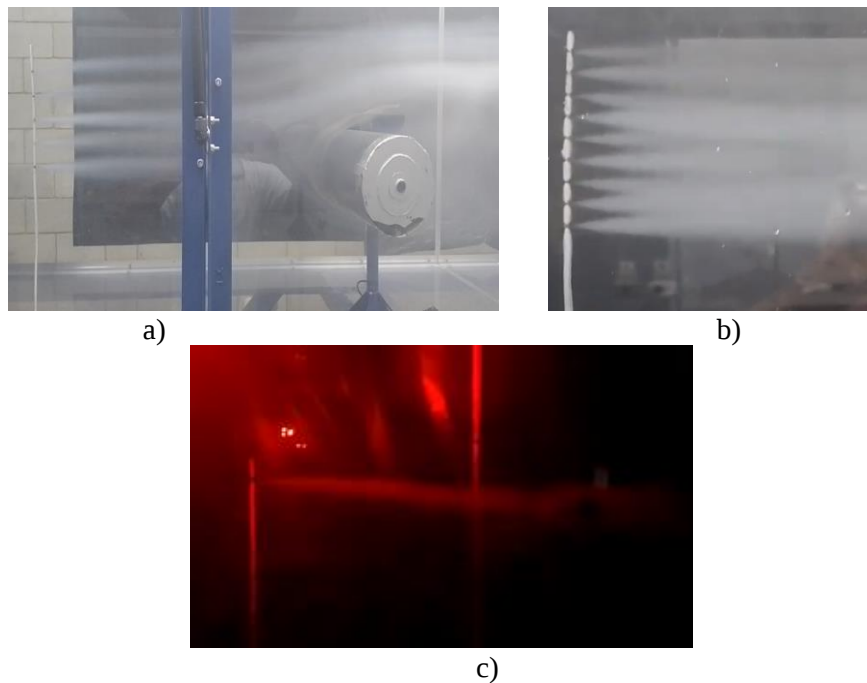


Figura 85. a), b) y c) Pruebas de velocidades con 5, 9 y un agujero.

4.4.1 Manejo del equipo

Instrucciones para el buen manejo del equipo

1. Revisar el recipiente del líquido que se encuentre arriba de la mitad, dado el caso llenar.
2. Revisar que no se presente ninguna anomalía en las piezas del equipo
3. Revisar la llave de fuga de líquido que se encuentre abierta para que el líquido no llegue al túnel y se presenten daños.
Nota: Tener un recipiente que recoja el líquido, por seguridad debe soportar los 300 °C se recomienda un Erlenmeyer o baso precipitado de 100 ml de laboratorio.
4. Revisar la llave que conecta la mini-bomba a la resistencia eléctrica que no se encuentre cerrada, siempre mantenerla abierta.
Nota: Dejar la llave como se encuentra, dado el caso de que esté cerrada esta puede ser manipulada con el fin de llevar un flujo adecuado según los parámetros del túnel y la evaluación del operador. Se recomienda siempre llevarla a la mitad.
5. Conectar el equipo a corriente alterna (AC 110).
6. Se recomienda primero encender el generador de humo y luego el túnel de viento, debido a la convección forzada que sufre el humo.
7. Encender la resistencia eléctrica secundaria, llevarla a 60 v durante un minuto mantener el voltaje entre 55 y 70 v de acuerdo con la velocidad del túnel.
Nota: El amperaje va a estar variando entre 1,2 A y 1,5 A. Dado el caso que cambie el amperaje ± 3 A, revisar la resistencia eléctrica que no tenga contacto directo con el ducto.

8. Encender la resistencia eléctrica evaporadora después del minuto de haber encendido la secundaria, llevarla al máximo voltaje durante un minuto
9. Una vez pasado el minuto de encendido la resistencia evaporadora encender la mini-bomba hasta los 3,3 v y se procede a graduarla según la velocidad del túnel.
Nota: No pasar de 5v que subsana a la velocidad máxima del túnel de viento.
10. Estar pendiente de la llave de fuga, al momento de salir vapor dejar así durante 4 segundos y luego se procede a cerrarla con un guante que se encuentra en el equipo.
11. Una vez que el humo llegue al túnel de viento se puede encender y trabajarlo según sea conveniente.

4.5 COMPARACIÓN CON SIMULACIÓN NUMÉRICA

Una simulación numérica es realizada empleando el software comercial ANSYS Fluent con el fin de poder observar el comportamiento de las líneas de corriente y comparar con los resultados de visualización en el túnel.

En la simulación se selecciona un modelo de turbulencia de acuerdo al número de Reynolds de flujo que pasa por los orificio, además, son usados 3 tipos de mallas nombradas burda, media y fina con el fin de observar la eficiencia del comportamiento de la estela tanto en figuras cilíndricas circulares como barra rectangular. También se tienen en cuenta otros parámetros que se indican más adelante.

Se modelan dos condiciones de flujo correspondientes a dos velocidades con sus respectivos números de Reynolds, la velocidad de 10,6 m/s ($Re=25,4$) y 5 m/s ($Re=12$). La simulación es realizada empleando el software de análisis de flujo de fluido de ANSYS *Fluent* el cual se observa en la Figura 86.

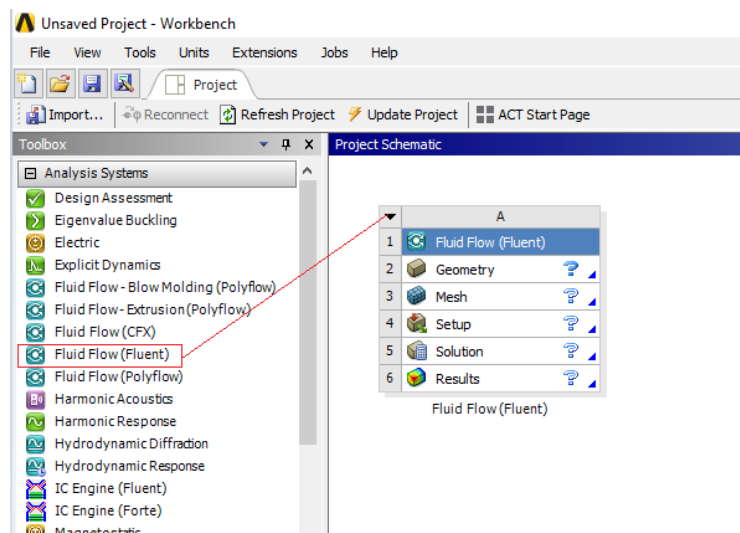


Figura 86. Selección del Software de simulación de fluidos

La descripción del modelo físico, el dominio computacional y las condiciones de contorno empleadas en la simulación para cilindros circulares y barra cuadrada son presentados en la Figura 87. El centro de ambas figuras geométricas está ubicado a $11,5D$ de la entrada del flujo, a $20D$ del otro extremo y a $25D/2$ del ancho (Ben & Dou, 2015).

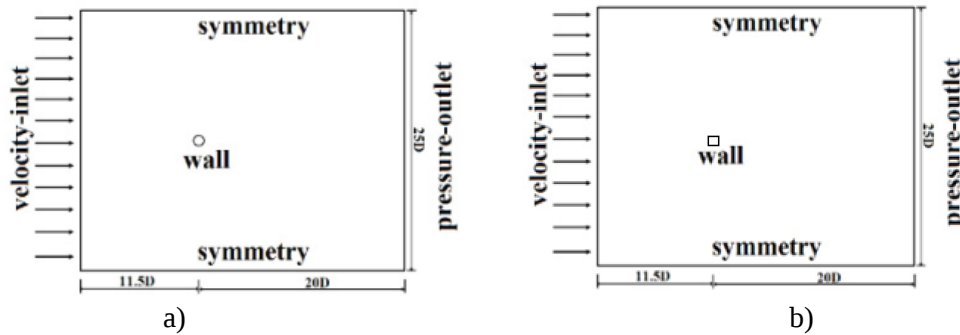


Figura 87. Dominio computacional a) cilindro circular y b) barra cuadrada

Fuente: (Ben & Dou, 2015)

Después de definir las informaciones del problema, el proceso de simulación comienza con la definición de la geometría, se realiza una simulación 2D. La velocidad se define en la dirección x con valores prescritos mencionados anteriormente y dentro del dominio computacional es dibujado el objeto cilíndrico.

Construida la geometría se procede a generar la malla para una simulación en dinámica de fluidos computacional (CFD). La malla burda se trabaja por defecto del programa, Posteriormente es refinada variando el tamaño de los elementos. El software Ansys Fluent tiene indicadores asimétricos para evaluar la calidad de la malla. En el caso del parámetro *Skweness* establece valores entre 0 y 1, siendo 0 el mejor mallado y *Orthogonal quality* con valores entre 0 y 1 en el que 1 es de mallado excelente (Barrera et al., 2018), en la Tabla 26 se indican los valores de estos parámetros para los tres tipos de mallas trabajados.

Tabla 26. Parámetros de análisis de la calidad de malla para cilindro circular

Malla	Tamaño de elemento general	Nodos	Número de elementos	Y^+ (m)	Capas	<i>Skweness average</i>	<i>Orthogonal Quality average</i>
Burda	0,21 m	1396	450	0,1	25	0,25294	0,94609
Media	0,05 m	2170	692	0,01	25	0,21246	0,93401
Fina	0,02 m	9261	3015	0,0001	25	0,04262	0,99591

Se toman los mismos parámetros para el mallado de la barra cuadrada ver Tabla 27.

Tabla 27. Parámetros de análisis de la calidad de malla para barra cuadrada

Malla	Tamaño de elemento general	Nodos	Número de elementos	Y^+ (m)	Capas	<i>Skweness average</i>	<i>Orthogonal Quality average</i>
Burda	0,21 m	403	127	0,1	25	0,41445	0,76585
Media	0,05 m	1386	444	0,01	25	0,28814	0,85099
Fina	0,02 m	7905	2567	0,0001	25	0,07917	0,95823

Se realiza un refinamiento localizado en la malla empleando la herramienta *inflation* en la figura geométrica utilizando el criterio *Y plus* “ Y^+ ” con su número de capas y distancia entre ellas, a pesar de que existen modelos matemáticos para poder hallar el *Y plus* se empleó una clasificación del espaciamiento de malla dentro de la subcapa viscosa en función de Y^+ realizado por la Nasa el cual se presenta en la Tabla 28.

Tabla 28. Clasificación de Y^+ según la Nasa (datos tomados de AIAA 2008)

Rango de y^+	Clasificación
$y^+ > 2$	Extra-gruesa
$1 > y^+ > 2/3$	Gruesa
$2/3 > y^+ > 4/9$	Media
$4/9 > y^+ > 8/27$	Fina
$8/27 > y^+$	Extra-fina

Fuente: (Barrera et al., 2018)

Se escoge un valor según extrafina para la burda y se reduce el valor para las otras mallas, los datos se muestran en la Tabla 26, con una tasa de crecimiento del 1.2.

Se selecciona entre malla estructurada “*cuadriláteros*” o no estructurada “*triángulos*”, a esto se realiza un estudio previo para la selección, como conclusión al momento de trabajar en 2D es recomendable trabajar con mallas estructurada (García-Cuevas González et al., 2015) . En la Figura 88 se observa la apariencia final de los tres tipos de malla.

En los parámetros de la malla se observa que para ambas geometrías se mantienen diferentes cantidades de nodos, pero similar calidad de malla.

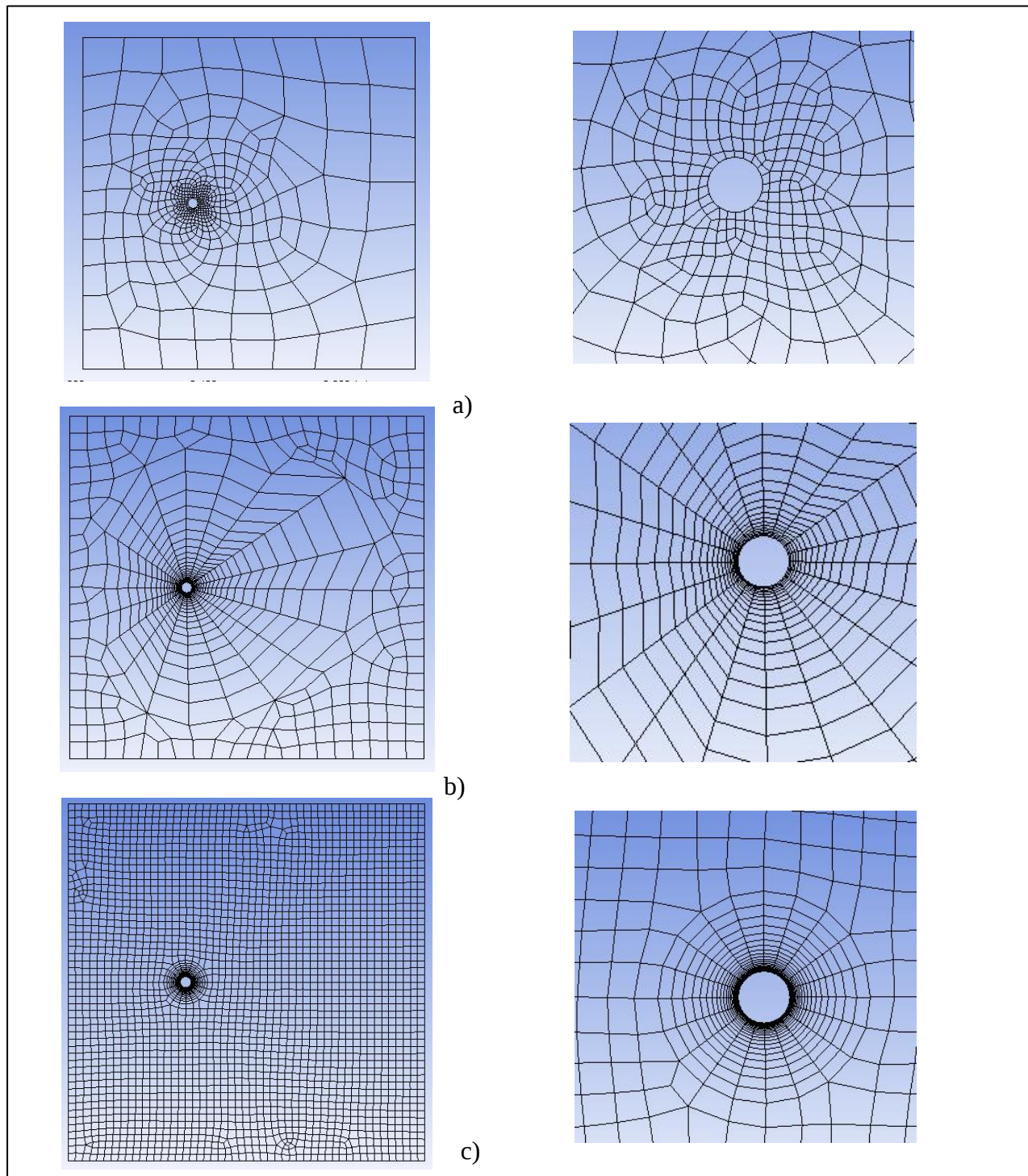


Figura 88. Malla de la geometría a) malla burda, b) malla media y c) malla fina para cilindro circular, lo mismo para la barra cuadrada

En malla gruesa se observa que cerca al objeto está más fino por el *inflation*. El mallado medio cerca al cilindro se presentan elementos más refinados, en la malla fina existe un refinamiento localizado en la región más cercana al cilindro, Tabla 26.

Al ser los números de Reynolds bajos, se tiene en cuenta una de las características del flujo de fluido alrededor de un cilindro que es el comportamiento del coeficiente de arrastre C_D (Gratal & Aguilar Bail, 2016), debido a que dentro de la capa límite se presentan los esfuerzos viscosos intensos determinando una fuerte gradiente de velocidades, ya que la resistencia se debe a la separación del flujo en forma de estelas, siendo vital trabajar con un método que estudie la viscosidad cerca de las paredes del cilindro y con flujo laminar (Fernanda & Galárraga, 2019). Se elige el modelo de turbulencia *K-epsilon (2eqn) realizable* recomendado para flujos donde las líneas de corriente sufren cambios de curvatura (Ipar, 2018). También es importante tener en cuenta el equilibrio de energía al momento de trabajar en *setup*.

Se define el lanzador *Fluent* el cual se trabaja con precisión simple por defecto (ver Figura 89), pues la doble precisión a pesar de que produce una predicción de arrastre más precisa es utilizada en casos más realistas y con geometrías más complejas.

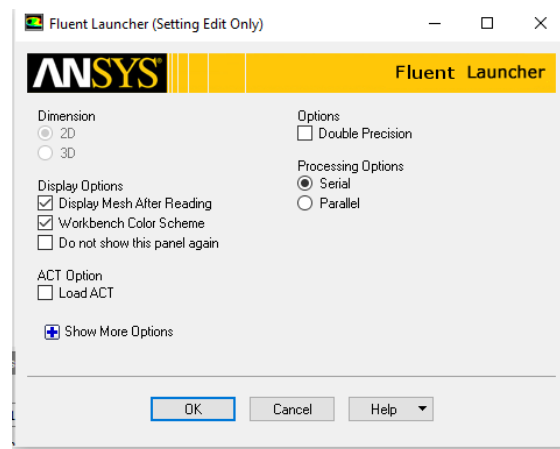


Figura 89. Lanzador de Fluent

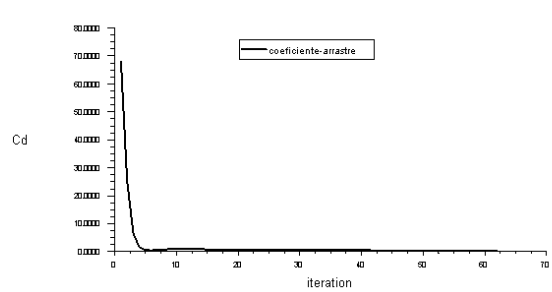
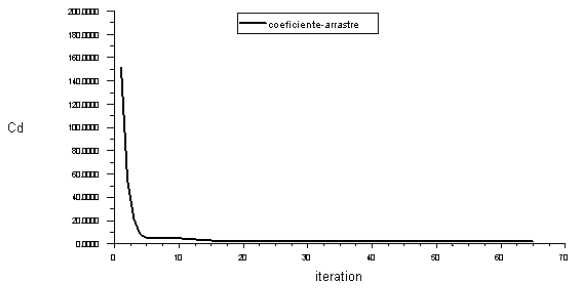
Luego en la etapa de preprocesamiento son definidas las condiciones de contorno en el software. Se define el aire como fluido de trabajo. Como condición de contorno en $x = 0$ es definida las velocidades ya mencionadas y en la salida una condición de presión prescrita igual a 0.

A continuación, se presenta el comportamiento del coeficiente de arrastre y los residuales en el que dio una solución convergente en la iteración 65 para $Re=25,4$ y 62 iteraciones para $Re=12$ en malla burda. En el gráfico de C_D se aprecia que después de la iteración 20 se comporta de manera lineal (ver Figura 90) también se observa el comportamiento de los *scaled residuals* (ver Figura 91). En el comportamiento de la malla media da solución de la convergencia en la iteración 88 para $Re=25,4$ y 124 para $Re=12$ aunque el comportamiento en el C_D y los *scaled residuals* hasta la iteración 65 es similar a la malla burda para ambos casos de Reynolds (ver Figura 90 y Figura 91). En el mallado fino se observa mayor variación en el comportamiento tanto en C_D como en *scaled residuals* (ver Figura 90 y Figura 91).

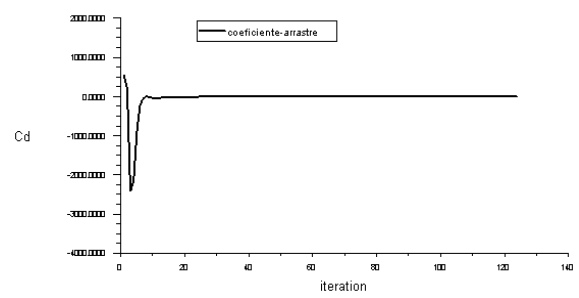
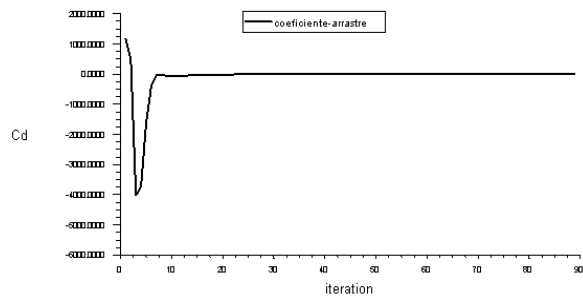
Re: 25,4

Re: 12

Malla burda



Malla fina



Malla media

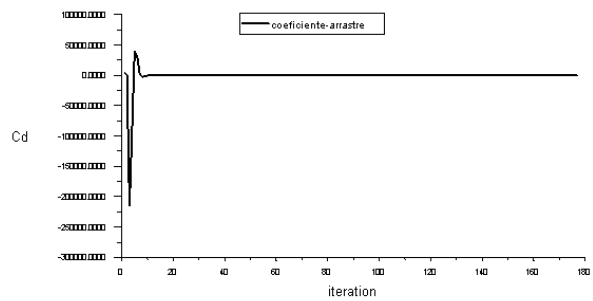
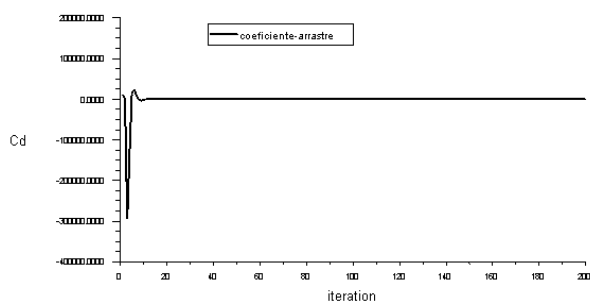
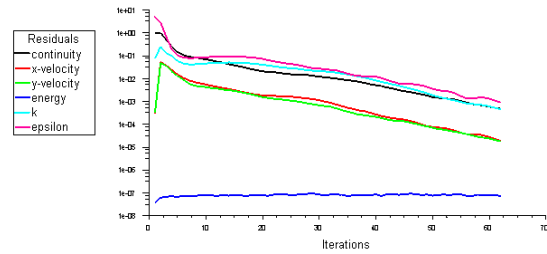
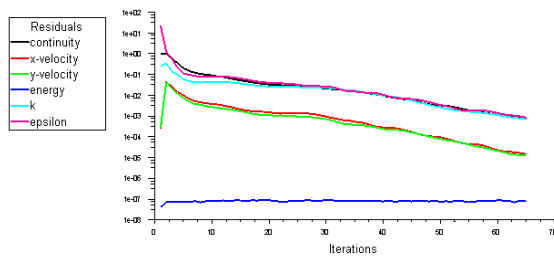


Figura 90. Coeficiente de arrastre para los diferentes tipos de malla

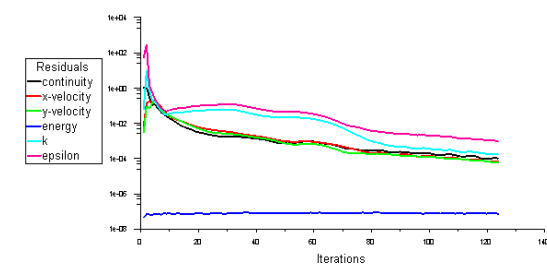
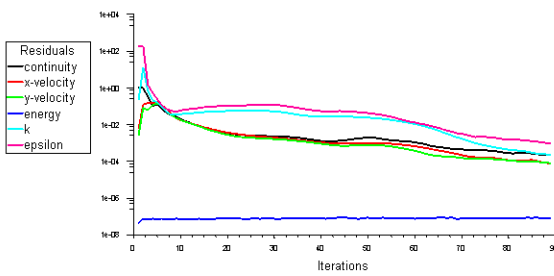
Re: 25,4

Re: 12

Malla burda



Malla media



Malla fina

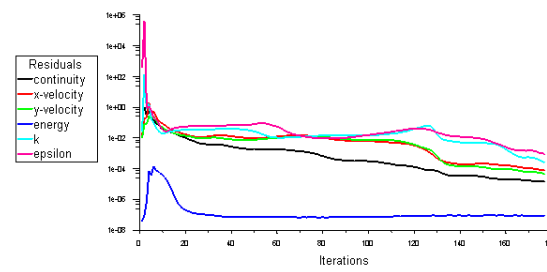
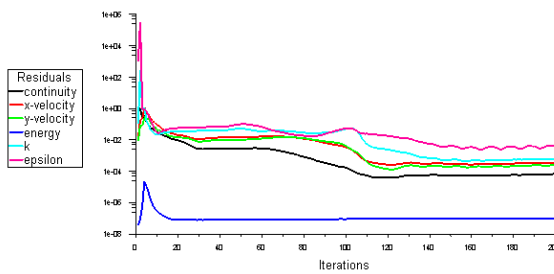
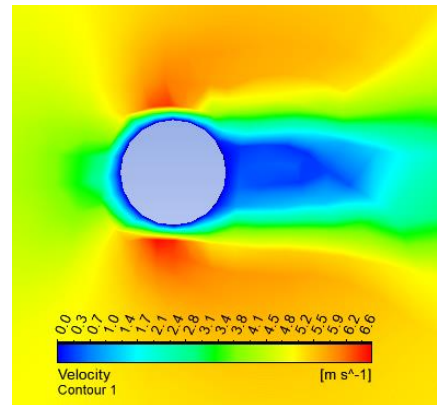
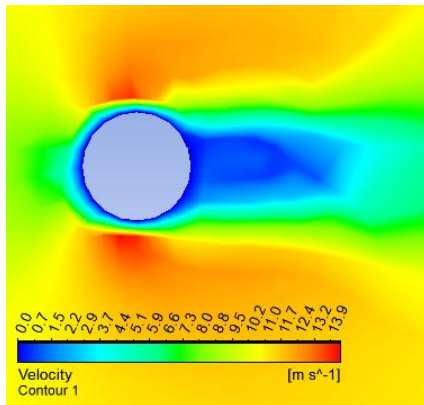


Figura 91 . *Scaled residuals* para los tres en mallados en los dos casos de Reynolds de cilindro circular

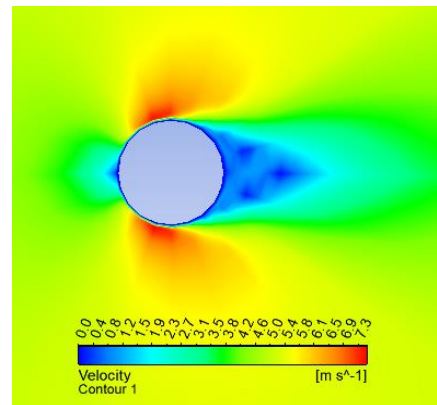
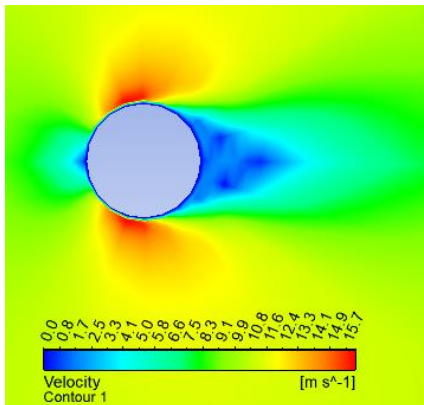
Re: 25,4

Re: 12

Malla burda



Malla media



Malla fina

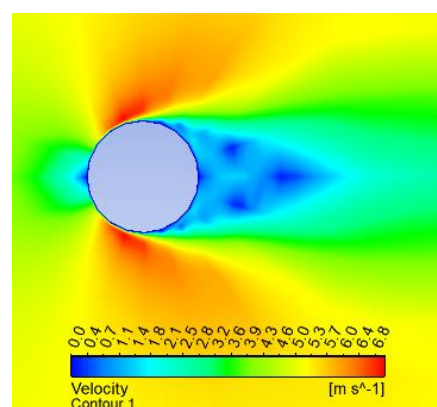
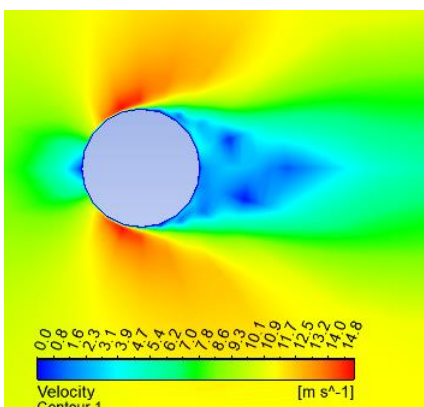
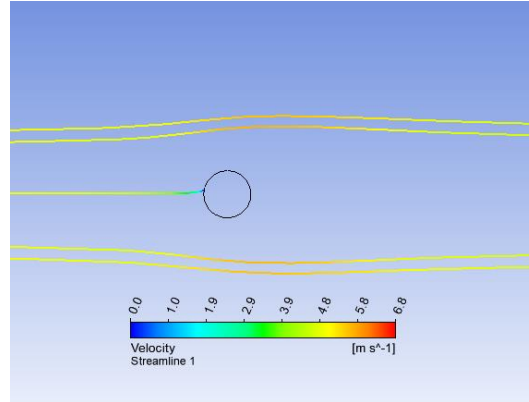
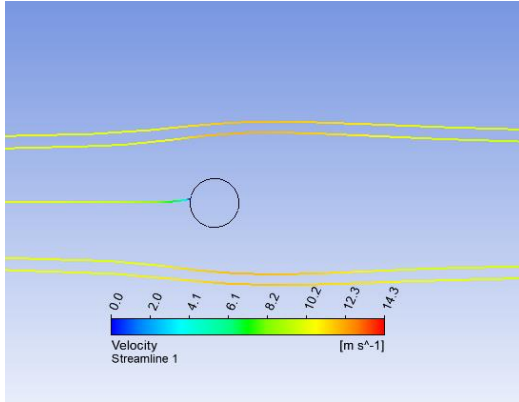


Figura 92. Contorno de velocidad para ambos casos de Reynolds para cilindro circular

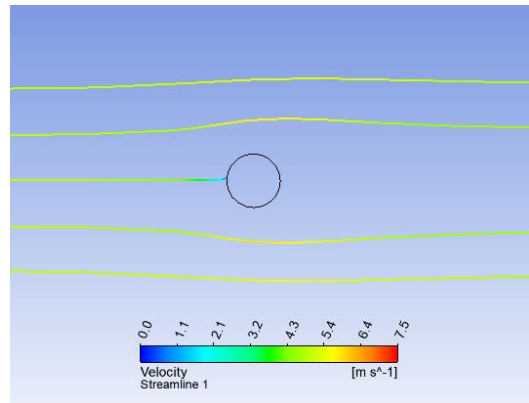
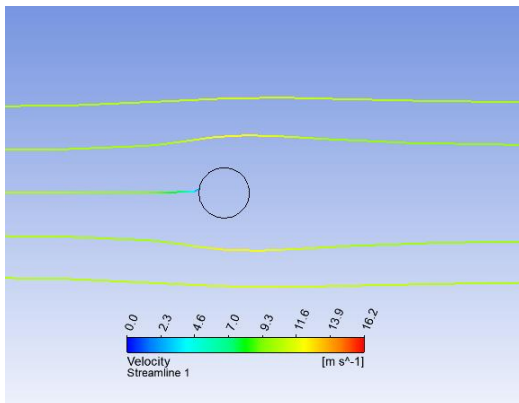
Re: 25,4

Re: 12

Malla burda



Malla media



Malla fina

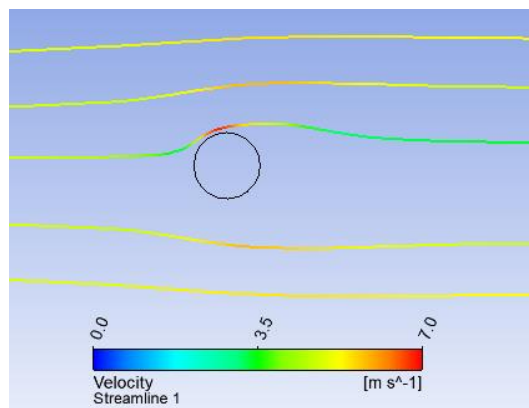
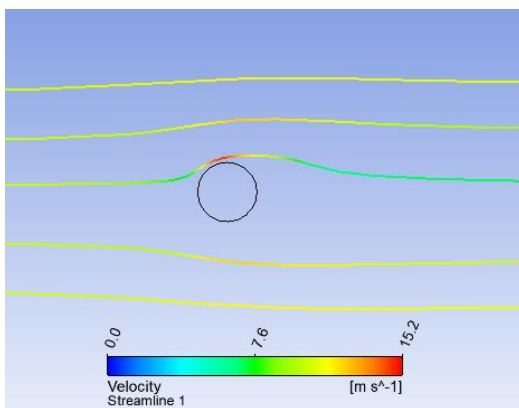


Figura 93. Líneas de velocidad para cilindro circular

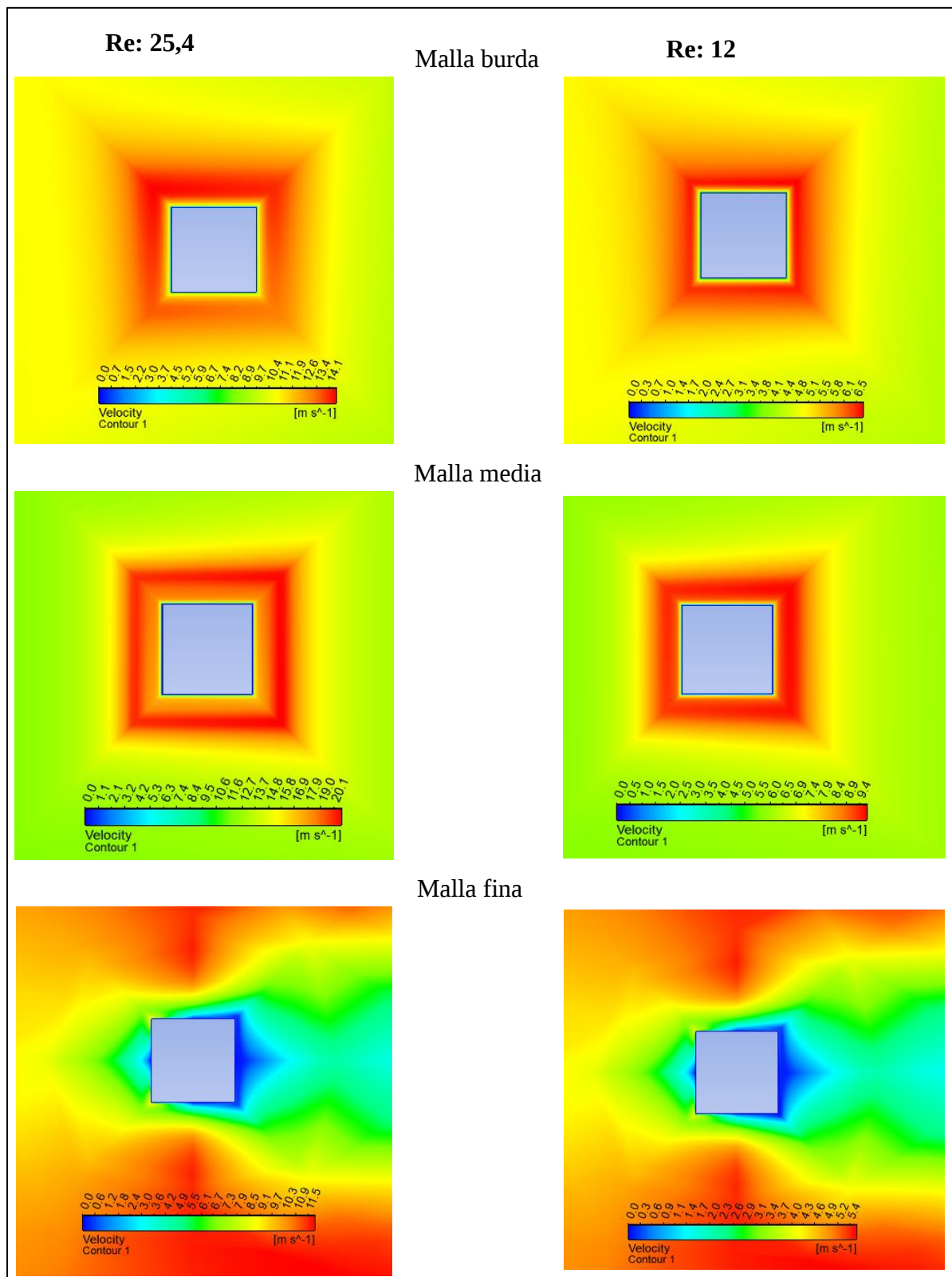
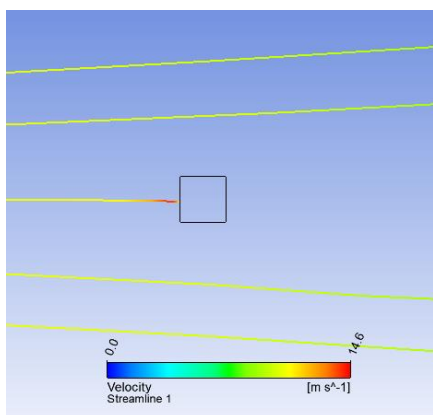


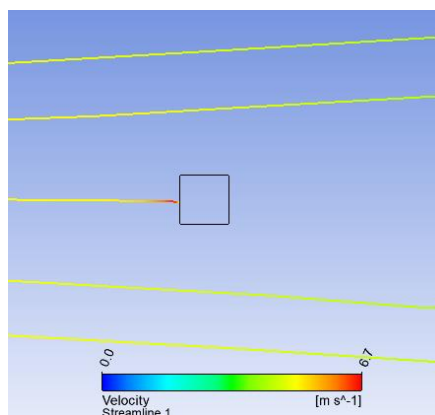
Figura 94. Contorno de velocidad para ambos casos de Reynolds para la barra cuadrada

Re: 25,4

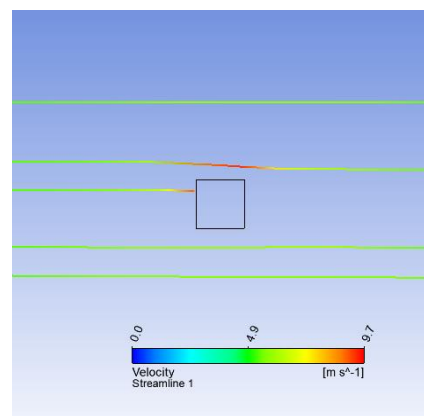
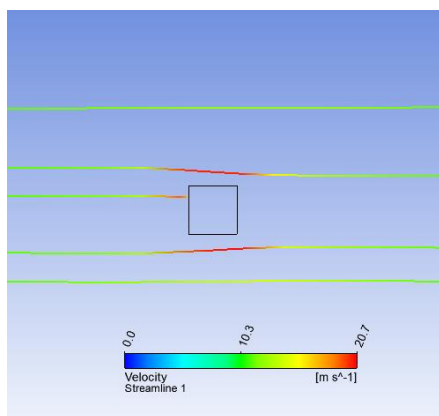
Malla burda



Re: 12



Malla media



Malla fina

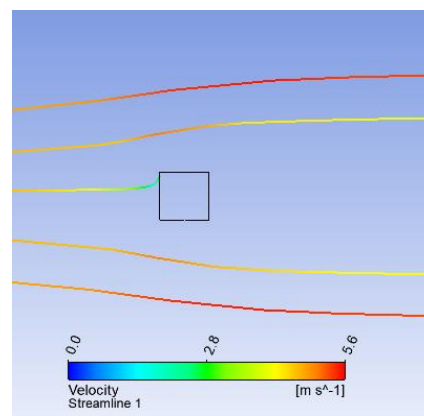
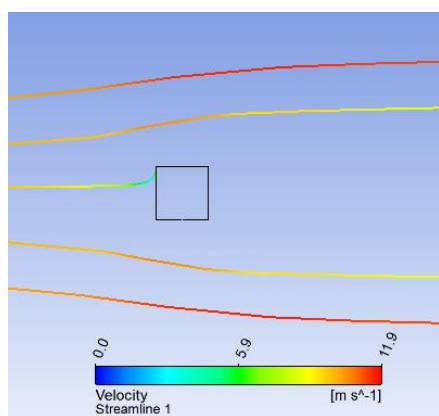


Figura 95. Líneas de velocidad para ambos casos de Reynolds para la barra cuadrada

En la etapa de post-procesamiento son graficados el campo de velocidades y las líneas de corriente. Las líneas de corriente se proyectan partiendo de las mismas coordenadas que están localizados los orificios de salida del humo en el rastrillo observadas en la Figura 93 y Figura 95 tanto para el cilindro circular y barra cuadrada.

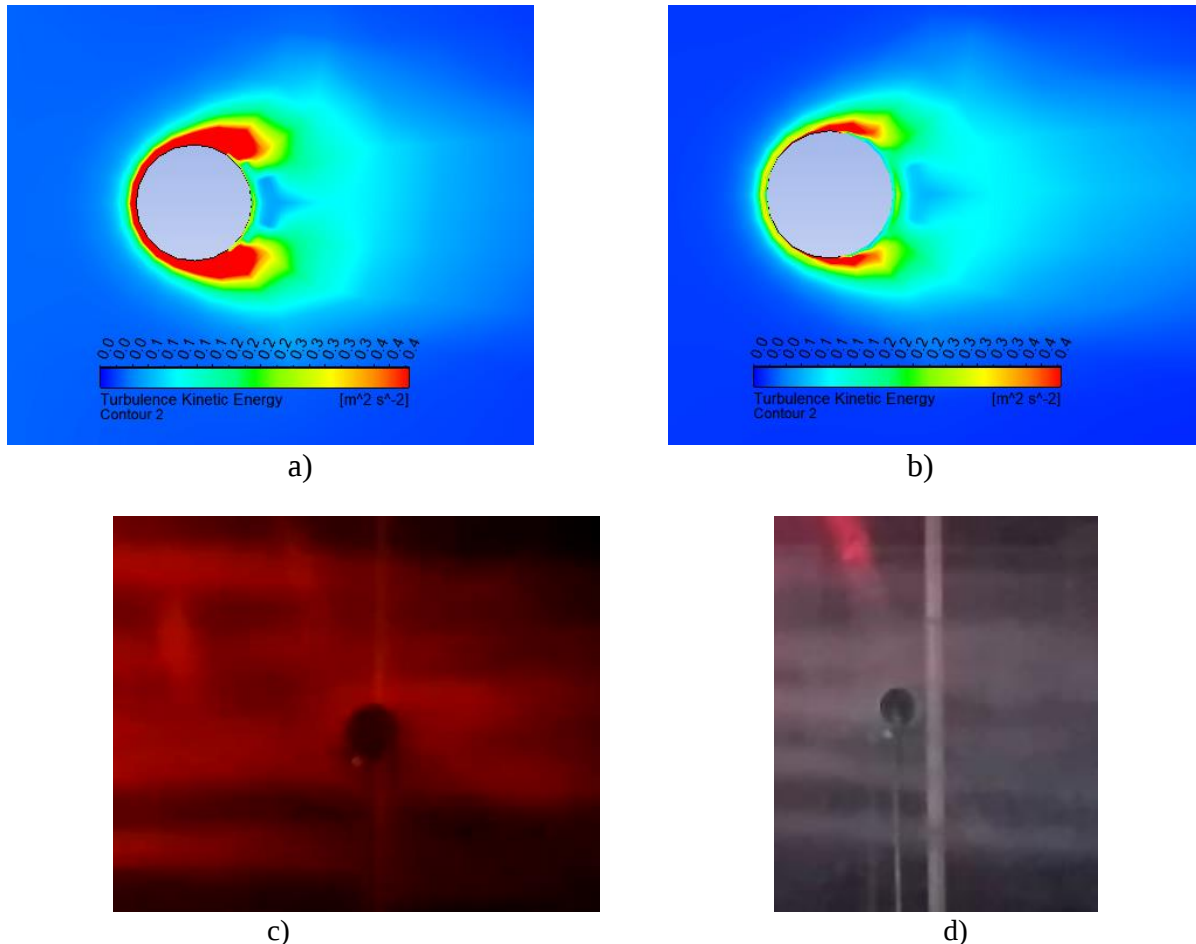
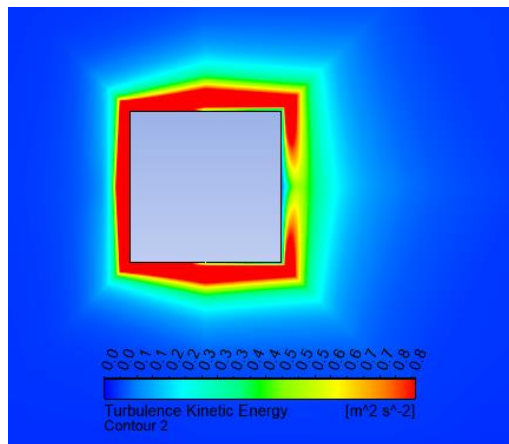


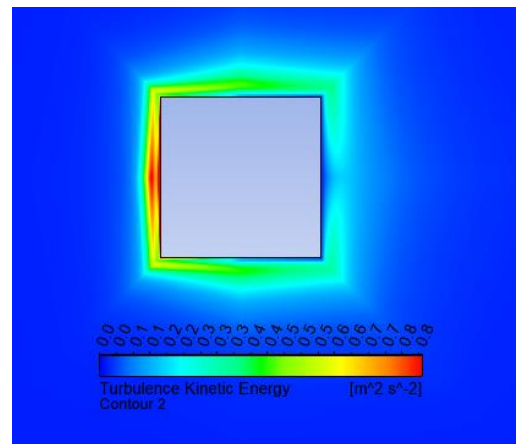
Figura 96. Energía cinética de turbulencia a) Re: 25,4 b) Re: 12, Líneas de velocidad de cilindro circular en el túnel de viento c) Re:25,4 y d) Re:12

En la Figura 96 se presenta una comparación de las imágenes obtenidas de la simulación numérica e imágenes obtenidas de las líneas de corriente en la cámara de pruebas para cilindro circular. Este resultado muestra evidencia que el humo permite visualizar los vórtices que se generan y los parámetros de control permiten que el humo generado acompañe la corriente de aire dentro del túnel.

Se obtuvo también una comparación con la barra cuadrada entre la energía cinética de turbulencia de la simulación y del túnel de viento para observar la similitud entre ellas Figura 97,



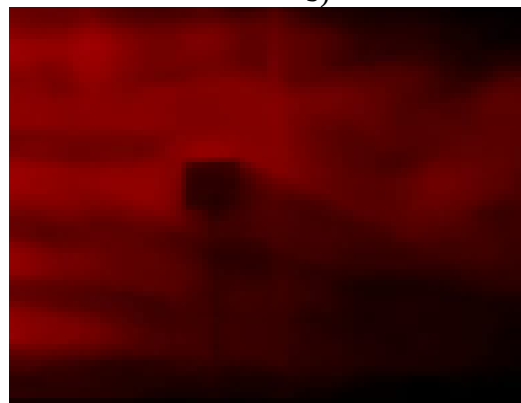
a)



b)



c)



d)

Figura 97. Energía cinética de turbulencia a) Re: 25,4 b) Re: 12, Líneas de velocidad la barra cuadrada en el túnel de viento c) Re:25,4 y d) Re:12

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis de resultados se realiza desde la conceptualización del equipo hasta la etapa de operación. También serán incluidos los resultados referentes a las adaptaciones que se tuvieron en cuenta al túnel de viento. Finalmente serán descritos los resultados académicos obtenidos a través del desarrollo del presente trabajo de grado.

5.1 CONCEPTUALIZACIÓN

Se estudiaron diferentes casos de evaporar el flujo y poder responder a los parámetros del túnel de viento los cuales se tomaron dos principales que son: ebullición por convección y por piscina, optando por el mecanismo de ebullición por convección. Esta forma de producir el vapor permitió un mejor control del flujo producido. En la producción de vapor por ebullición en piscina se encontraron inconvenientes debido a que las burbujas provocadas en la glicerina generaban un aumento de volumen del líquido y de la presión en el recipiente, provocando derrame del líquido y no se produjera el suficiente vapor.

Una vez seleccionado el método de generación de vapor, se seleccionan los componentes. Uno de los componentes primordiales es aquel que cumple la función impulsar el humo hasta el túnel de viento. Se optó por utilizar la bomba para llevar el líquido a la resistencia eléctrica para evaporar. Se observó que la presión con la que es enviado el vapor es suficiente para ser dirigido al túnel de viento descartando la búsqueda de un extractor.

Para evaluar la transferencia de calor se realiza una consulta bibliográfica, se seleccionó inicialmente la correlación de Chen para modelar el coeficiente de transferencia de calor, sin embargo, debido a las constantes que son obtenidas para agua, se utiliza la correlación de Bennett-Chen obtenida para varios fluidos de trabajo.

5.2 CONSTRUCCIÓN DEL GENERADOR DE HUMO

En la selección de los componentes del generador de humo además de cumplir las funciones se tuvo en cuenta que fueran comerciales, esto con el fin que reducir los costos de mantenimiento y facilitar el reemplazo de las piezas. Los componentes son adquiridos en el mercado nacional de diversos proveedores.

5.3 INSTALACIÓN DEL EQUIPO EN EL TÚNEL DE VIENTO Y OPERACIONALIZAR

Luego de realizar el montaje de las piezas, se procede a operacionalizar el equipo. Durante este proceso de prueba se encontraron las siguientes dificultades: poca visualización de flujo, turbulencia en el túnel de viento, condensación del fluido de trabajo en el ducto del túnel de viento y en las tuberías de alimentación del rastrillo.

Se opera el equipo con dos tipos de rastrillo (5 y 9 agujeros) y un ducto de un agujero con el propósito de observar el comportamiento de las líneas de acuerdo a los cálculos realizados. En el

rastrillo de 5 agujeros se observó mayor flujo cuando el túnel trabaja a bajas velocidades y a altas velocidades proyecta un flujo más acondicionado, el de 9 agujeros ocurre una mejor visibilidad a bajas velocidades y a altas no se contempla la salida de humo en todos los orificios esto corresponde a que los parámetros del generador de humo son desarrollados para un flujo de 5 agujeros y el de un solo agujero se presenta una línea gruesa visible en todas las velocidades, en el subtítulo 5.3.3 se presentan el comportamiento de esas líneas a velocidades bajas y altas.

5.3.1 Visualización de flujo

En este punto se encontró que a pesar de proporcionar el humo adecuado para las diferentes velocidades del túnel de viento se apreciaba poco las líneas como se observa en la Figura 98, la cual se decide realizar unas adaptaciones al túnel de viento.



Figura 98. Visualización de las líneas de humo

Se realiza un cubrimiento en la cámara de humo de color negro, en este caso se utiliza plástico como se ve en la Figura 99 mejorando la visibilidad.



Figura 99. Visualización de líneas de humo con una parte cubierta de la cámara de humo.

Al notar como las líneas presentan mejoría al solo cubrir una parte de negro se opta por cubrir la parte de arriba, atrás y abajo, se añade una iluminación de color rojo con bombillos led dentro del

túnel de viento debido a que la iluminación del laboratorio y la del ambiente opacan las líneas de humo (Figura 100).



Figura 100. Visualización de líneas de humo

Se aprecia el comportamiento de las líneas de humo y el comportamiento al encontrarse un objeto al instalarse estas adaptaciones, se recomienda apagar la iluminación del laboratorio y encender la del túnel de viento.

Como último se recomienda que el laboratorio tenga una salida del humo generado para las pruebas pues, después de un tiempo este se encerraba en todo el laboratorio impidiendo una visualización clara de lo que se realiza dentro del túnel de viento como se observa en la Figura 101.



Figura 101. Laboratorio después de realizar una prueba con el equipo

5.3.2 Condensación

Aquí se presentó un obstáculo más de diseño del equipo, pues al momento de encender el túnel de viento ocasionó una convección forzada debido a las cuestiones climáticas de Pamplona y las velocidades del túnel de viento condensándose una parte del vapor generado por la glicerina, se toma la decisión de añadir una segunda resistencia para ayudar a sobrecalentar el vapor y añadirle teflón en el ducto encargado de llevar las líneas a la cámara de pruebas para bajar la pérdida de calor.

5.3.3 *Turbulencia en el túnel de viento*

Se logra observar que el túnel a su máxima velocidad presenta un movimiento no deseado en las líneas de flujo, a esto se le denomina turbulencia, se recomienda una rectificación en el túnel de viento para que no afecte en las pruebas.

A velocidades con frecuencia menores de 12 Hz según marca el túnel de viento se presenta de manera laminar, esto ocurrió con los tres ductos que se probaron de 1, 5 y 9 agujeros (ver Figura 102).

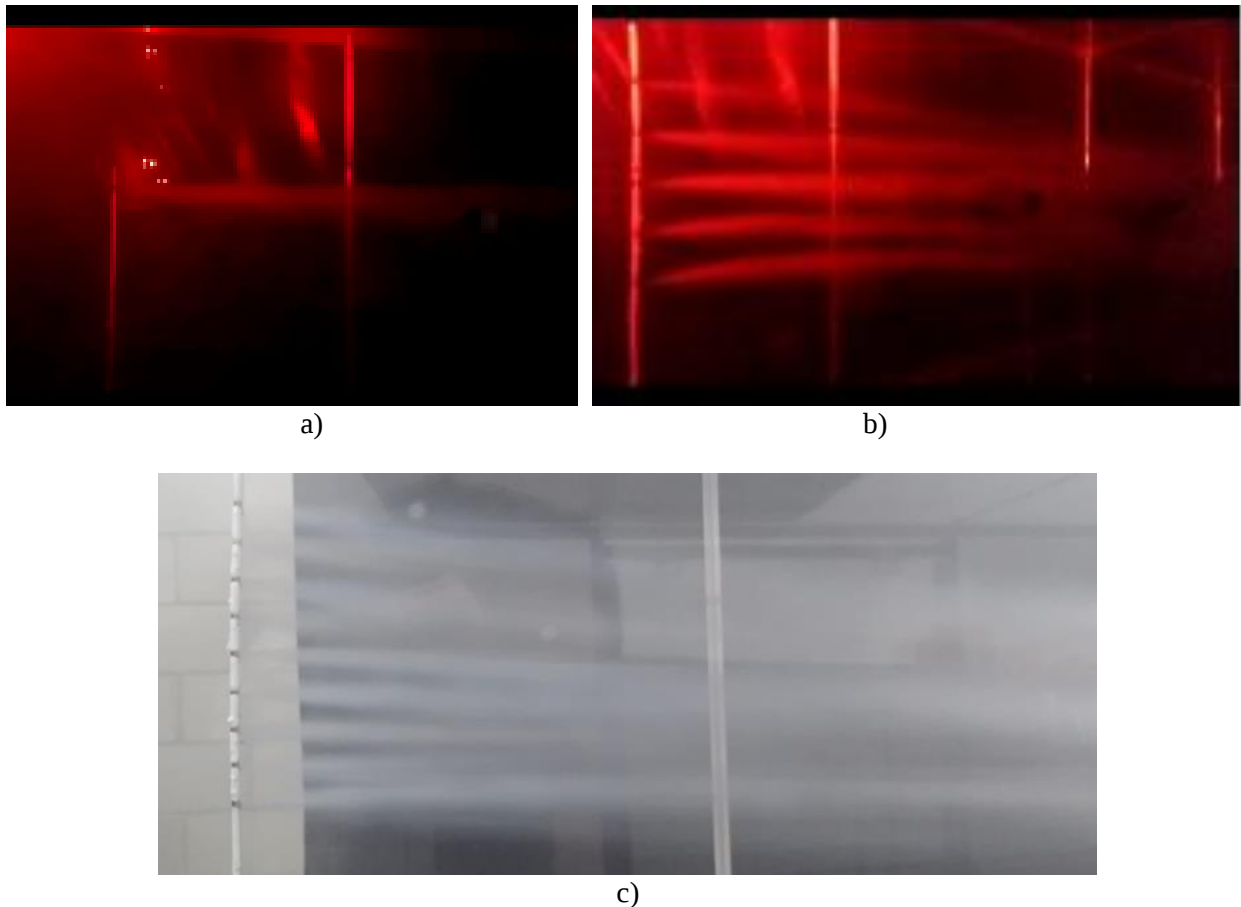


Figura 102. a), b) y c) Comportamiento de líneas de humo a velocidades menores de 12Hz con los tres ductos

Al momento de aumentar más de 12 Hz, se presenta perturbación haciendo que las líneas se dirijan de arriba abajo o que se junten (ver Figura 103).

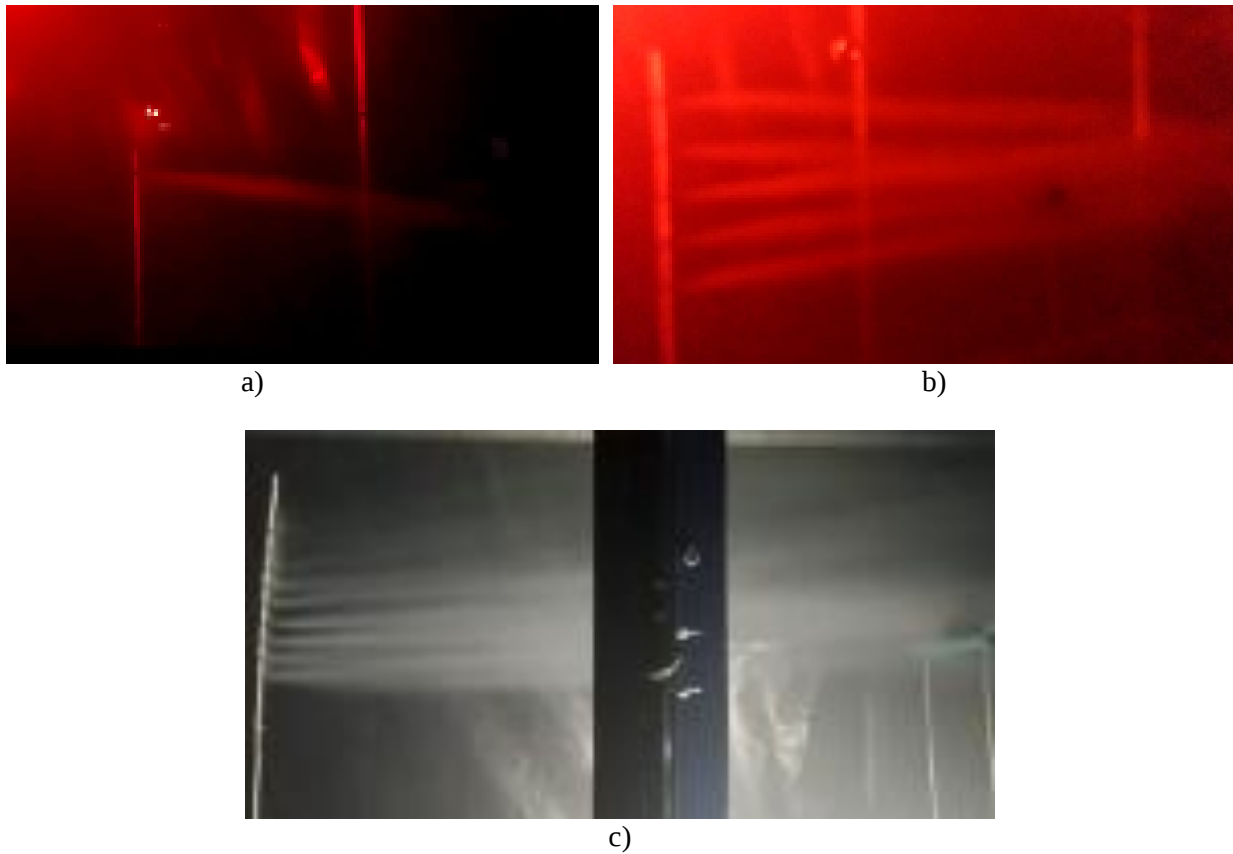


Figura 103. a), b) y c) Visualización de líneas a más de 12Hz

5.4 ACADÉMICOS

Los avances y resultados del presente proyecto fueron presentados en el encuentro de semilleros de investigación de la “REDCOLSI”, como participante del semillero de energías renovables y/o alternativas, en el VIII encuentro regional, nodo Norte de Santander donde se consiguió obtener el puntaje de 98, suficiente para clasificar a la siguiente etapa en el encuentro nacional (ver evidencia de la participación en la Figura 104).



a)



b)

Figura 104. Resultados académicos. a) Certificado de participación en REDCOLSI a nivel regional, b) Certificado de participación en REDCOLSI a nivel nacional.

Y se presentó un artículo científico del diseño del equipo en el **III Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica (COIIM 2022)**, titulado Diseño y construcción de un generador de humo para visualización de flujo en un túnel de viento, el cual es aceptado ver Figura 105.



a)



b)

Figura 105. a) Carta de aceptación al COIIM 2022 y b) reconocimiento de la participación en el COIIM
Fuente: COIIM 2022

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El desarrollo del presente trabajo permitió identificar las siguientes conclusiones:

Del seguimiento de una metodología de desarrollo de producto basado en el análisis de funciones permitió obtener un equipo que cumple actualmente con los requisitos de operación y la visualización de flujos en el túnel de viento. Durante las pruebas y cálculos de diseño se identificó la importancia de la temperatura ambiente en la operación del dispositivo, una vez que las condiciones climáticas de la ciudad de Pamplona producen pérdida de calor importantes que pueden causar la condensación del fluido de trabajo en el momento de la inyección a la corriente de aire del túnel. Además del efecto de la convección forzada inserida por el flujo del aire del túnel a velocidades altas (aprox. 11 m/s).

En el proceso de selección de las piezas y componentes es importante que sean comercialmente conocidas, esto facilita su reemplazo en caso de una avería.

La glicerina mostro ser un fluido de trabajo adecuado para la aplicación de generación de humo como recomendado en trabajos de la literatura, por su alto punto de inflamabilidad, menor riesgo de toxicidad y menor riesgo de contaminación del túnel de viento.

Como trabajos futuros se recomienda la implementación de sistemas de control empleando un controlador que permita una operación automática del dispositivo.

Implementar un cilindro entre la resistencia eléctrica secundaria y el ducto que va dirigido al humo que actúe como acumulador para amortiguar las variaciones en el flujo, este cilindro también debe ser llevado a altas temperaturas debido a que el inicio de la generación del humo se presentan fluctuaciones.

Para el proyecto de un generador de humo para velocidades superiores a 25 m/s, se recomienda una revisión en todos los componentes del equipo, así como un mayor control de flujo, debido a que el equipo solo fue diseñado para velocidades menores a 25 m/s.

Se recomienda implementar un método de extracción de humo en el laboratorio donde se realizan las pruebas pues el humo generado regresa al túnel y obstaculiza la visibilidad de las líneas,

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (3) *Resistencia Alambre Ferroniquel O Nicrom De 0.15mm 10 Mtros.* (n.d.). Retrieved September 18, 2022, from https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-802419221-resistencia-alambre-ferroniquel-o-nicrom-de-015mm-10-mtros-_JM#position=1&search_layout=stack&type=item&tracking_id=d1571e3a-8267-4a26-bbce-ee58ad10ffd1
- Alaa A, K., Mohamad, K. A., & Farhan A, K. (2021). *Aerodynamic Study of Low-Speed Wind Tunnel Contraction Section: Design and Manufacturing*. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1094/1/012077/pdf>
- Almacén Electroluz en Pamplona.* (n.d.). Retrieved September 18, 2022, from <https://www.paginasamarillas.com.co/empresas/almacen-electroluz/pamplona-30348648>
- Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. J. (2013). *ciencia-e-ingenieria-de-materiales-sexta-askeland*.
- Bäckström, M., Carlsson, P., Danvind, J., Koptuyg, A., Sundström, D., & Tinnsten, M. (2016). A New Wind Tunnel Facility Dedicated to Sports Technology Research and Development. *Procedia Engineering*, 147, 62–67. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.190>
- Barrera, E. F., Aguirre, F. A., Vargas, S., & Martínez, E. D. (2018). Influencia del Y Plus en el Valor del Esfuerzo Cortante de Pared a través Simulaciones empleando Dinámica Computacional de Fluidos. *Información Tecnológica*, 29(4), 291–302. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642018000400291>
- Barrero, F. (2003). VISUALIZACIÓN DE FLUJO POR MEDIO DE HUMO EN EL TÚNEL DE VIENTO TVIM 460-3. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.
- Ben, A. Q., & Dou, H. S. (2015). Simulation and Stability Study of the Flow Around a Cylinder in Infinite Domain. In *Procedia Engineering* (Vol. 126). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.180>
- Blocken, B., Stathopoulos, T., & van Beeck, J. P. A. J. (2016). Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment. *Building and Environment*, 100, 50–81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.004>
- Cengel, & Boles, M. (2009). Termodinámica, sexta edición, 2009. McGraw Hill, capítulo 6, 287, 282, 281, 283, 292, 296, 297, 299. https://www.academia.edu/34082660/Termodinamica_Yunus_A_Cengel_Michael_A_Boles_Sexta_Edicion
- Cengel, Y. a. (2007). TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA 3° EDICIÓN. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V, 1–930. <https://doi.org/10.1007/BF00129346>
- Cimbala, J. M., & Cengel, Y. a. (2001). Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones. McGrawHill, Primera Ed, 10–11.
- Delgado, M., Hassan, Y. A., & Anand, N. K. (2019). *Experimental flow visualization study using particle image velocimetry in a helical coil steam generator with changing lateral pitch geometry*. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.152>
- Dorf, R. C., & Svoboda, J. A. (2011). *Circuitos Electricos*.
- Fernanda, J., & Galárraga, C. (2019). *MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA UNIÓN DE DOS CONDUCCIONES A PRESIÓN DE DIFERENTE GEOMETRÍA, APLICANDO EL*

PROGRAMA ANSYS CFX.

- Fitzgerald, S., Kelso, R., Grimshaw, P., & Warr, A. (2020). Observations of the flow experienced by a track cyclist using velodrome, wind tunnel, and potential flow investigations with an instrumented bicycle. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 206(September), 104374. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104374>
- Francisco López, & Mendizábal, E. (2015). *Introducción a La Ciencia De Los Polímeros*. November, 288.
- Fuente De Poder Regulador Voltaje Dimmer 4000w 220v Ac Scr. (n.d.). Retrieved September 18, 2022, from https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-536817626-fuente-de-poder-regulador-voltaje-dimmer-4000w-220v-ac-scr-_JM#position=1&search_layout=stack&type=item&tracking_id=ace801f0-d23d-4919-8d36-9f47c8f8ba22
- García-Cuevas González, L. M., Gil Megías, A., Navarro García, R., & Quintero Igeño, P. M. (2015). Tipos De Mallas Y Calidad Del Mallado. *Universitat Politècnica de València*, 10.
- Gratal, L. G., & Aguilar Bail, A. (2016). Desarrollo de casos técnicos de fluidotécnica mediante simulación numérica. *Universidad de Zaragoza*, 1–79.
- Hernández Pérez, V., Sánchez, F., & México, S. (2002). *INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN*.
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). Fundamentos de transferencia de calor. In *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*.
- Ipar, E. G. (2018). *Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials Anàlisi aerodinàmic de les principals configuracions de part trasera de un vehicle convencional Autor : Director : Escola Tècnica Superior d ' Enginyeria Industrial de Barcelona Resumen*.
- Jungermann, E., & Lynch, B. (2018). Glycerine in Bar Soaps. In *Glycerine*. <https://doi.org/10.1201/9780203753071-15>
- L. F. Cardona. (2017). *I. Introducción*.
- Lázaro Galdiano, J. (2020). *ferro-níquel*.
- Libardo, C., Sierra, H., Jahir, J., Molano, G., David, J., & Coca, T. (2014). *ESTUDIO SOBRE TÉCNICAS DE VISUALIZACIÓN Y MEDICIÓN DE FLUJO PARA SU USO DENTRO DEL TÚNEL DE VIENTO ACTUAL DE LA UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA*.
- Ma, C., Pei, C., Liao, H. li, Liu, M., & Li, M. (2020). Field measurement and wind tunnel study of aerodynamic characteristics of twin-box girder. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 202, 104209. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104209>
- Manguera De Tubo De Vacío De Silicona De Alta Temperatura . (n.d.). Retrieved September 18, 2022, from https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-857118099-manguera-de-tubo-de-vacio-de-silicona-de-alta-temperatura-tr-_JM#position=3&search_layout=stack&type=item&tracking_id=b95b5aca-6d31-4520-abc4-9dc8f49a6188
- Mercado libre. (n.d.). *Cinta Térmica Dorado Para Moto Carro Exostos Mofle* . Retrieved September 18, 2022, from https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-588537924-cinta-termica-dorado-para-moto-carro-exostos-mofle-_JM
- MercadoLibre. (2020a). *Cinta Aislante Negrapaca X 10* . https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-924885630-cinta-aislante-negrapaca-x-10-_JM#position=5&search_layout=stack&type=pad&tracking_id=a61ff9b3-29a4-4666-90d8-

- e7e93bdfd081%23position=5&search_layout=stack&type=pad&tracking_id=a61ff9b3-29a4-4666-90d8-e7e93bdfd081&is_advertising=true&ad_domain=VQCATCORE_LST&ad_position=5&ad_click_id=MmE5NjMzNjQtMmY5ZS00ZDc1LTg0MDYtMmRmNWRjYjk0MzY3
- MercadoLibre. (2020b). *Crema Pasta Disipadora Refrigerante 25 Gr Jeringa Térmica* .
https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-560811899-crema-pasta-disipadora-refrigerante-25-gr-jeringa-termica-_JM?searchVariation=58937729715#searchVariation=58937729715&position=2&search_layout=stack&type=item&tracking_id=59755951-2975-4e09-a637-f2f6b7cf86eb
- MercadoLibre. (2021a). *10 Metros Funda Termoencogible Tubo Termoretráctil Cable Kit* .
https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-572034313-10-metros-funda-termoencogible-tubo-termoretractil-cable-kit-_JM#position=2&search_layout=stack&type=item&tracking_id=2a29c2ee-dc8e-48ac-bbdd-c160be3ccc58
- MercadoLibre. (2021b). *Cargador Adaptador Universal Para Portatil 96w + 8 Puntas* .
https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-881115204-cargador-adaptador-universal-para-portatil-96w-8-puntas-_JM?matt_tool=15557168&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14634237758&matt_ad_group_id=144330729521&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creative=619500360395&matt_keyword=&matt_ad_position=&matt_ad_type=pla&matt_merchant_id=221407978&matt_product_id=MCO881115204&matt_product_partition_id=1701184196797&matt_target_id=pla-1701184196797&gclid=CjwKCAjwg5uZBhATEiwAhhRLHnY2cMLUUoAsfcnB8mwVP4L5hSuwjHLTB4j3qQgMtnmhy3Oiq9wJoxoCa5QQAvD_BwE
- MercadoLibre. (2022a). *Cinta Teflón De 1/2'' Multiusos, Largo 7 Metros*.
https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-893220934-cinta-teflon-de-12-multiusos-largo-7-metros-_JM#position=3&search_layout=stack&type=item&tracking_id=4c84e3e1-1aea-4ccc-a2f7-e2850b42fcde
- MercadoLibre. (2022b). *Hilo Alambre Esmaltado De Cobre Para Puentes Baku Despegar* .
https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-549021152-hilo-alambre-esmaltado-de-cobre-para-puentes-baku-despegar-_JM#position=2&search_layout=stack&type=item&tracking_id=cb0714eb-6783-49b6-8f08-0557bd0fbbbf
- Merzkirch, W. (1987). *REPORT DOCUMENTATION PAGE 1. Recipient's Reference 2. Originator's Reference*.
- Mini Voltímetro Y Amperímetro Digital 100v 10a. (n.d.). Retrieved September 18, 2022, from https://merkatronix.com/index.php?id_product=1943&controller=product&id_lang=4&search_query=Amperimetro+&results=4
- Modulocontrolador De Velocidad Pwm 0 A 28v 3a. (n.d.). Retrieved September 18, 2022, from https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-464853741-modulocontrolador-de-velocidad-pwm-0-a-28v-3a-1203b-_JM
- Mostafa Ghiaasiaan, S. (2007). Two-phase flow, boiling and condensation: In conventional and miniature systems. In *Two-Phase Flow, Boiling and Condensation: In Conventional and Miniature Systems* (Vol. 9780521882). <https://doi.org/10.1017/CBO9780521882>
- Muzafferuddin Mahmood. (2011). Flow visualization in low speed wind tunnels. *Physics*

- Education*, 5(5), 262–265. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/5/5/002>
- Núñez, F. A. C., & Córdoba, G. J. (2014). ADECUACIÓN EN EL BANCO DIDÁCTICO PARA EL ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL FLUJO DEL AIRE CON INYECCIÓN DE HUMO ALREDEDOR DE VEHÍCULOS A ESCALA.
- Okajima A. (1982). Strouhal number of rectangular cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, 123, 379–398.
- Parker, A. G., & Brusset, J. C. (1976). New Smoke Generator for Flow Visualization in Low Speed Wind Tunnels. *Science*, 11(270), 353–354. <https://doi.org/10.1126/science.11.270.353>
- Potter, M. C., Wiggert, D. C., & Ramadan Cuarta Edición, B. H. (2015). *MECÁNICA DE FLUÍDOS*.
- Purwanto, H., Andary, S. R., & Hartono. (2019). RANCANG BANGUN WIND TUNNEL MENGGUNAKAN SMOKE GENERATOR PADA AERODINAMIKA KENDARAAN. *Seminar Nasional Hasil Pengabdian Masyarakat Dan Penelitian Pranata Laboratorium Pendidikan Politeknik Negeri Jember Tahun*, 10, 303–307. <https://doi.org/10.5028/jatm.v10.716>
- Ristić, S. (2007). Flow Visualisation Techniques in Wind Tunnels Part I-Non optical Methods. *Scientific Technical Review*, LVII(1), 39–51. <http://www.vti.mod.gov.rs/ntp/rad2007/1-07/rist/rist.pdf>
- Rodrigo Andrés Soto Valle. (2016). CONVERSIÓN DE ENERGÍA EÓLICA MEDIANTE VIBRACIONES INDUCIDAS. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 152(3), 28. file:///Users/andreataquez/Downloads/guia-plan-de-mejora-institucional.pdf%0Ahttp://salud.tabasco.gob.mx/content/revista%0Ahttp://www.revistaalad.com/pdfs/Guias_ALAD_11_Nov_2013.pdf%0Ahttp://dx.doi.org/10.15446/revfacmed.v66n3.60060.%0Ahttp://www.cenetec.
- SDS. (2020). *Ferroniquel*.
- Shamsuddin, M. S. M., & Kamaruddin, N. M. (2020). Design and Development of a Small-Scale Wind Tunnel for Flow Visualization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 920(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/920/1/012001>
- Terry Beck, B., Anderson, B., & Hosni, M. (2008). A simple educational wind tunnel setup for visualization of duct flow streamlines and nozzle/diffuser boundary layer separation. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.18260/1-2--4191>
- Textos científicos. (2022). *Transiciones térmicas de los polímeros*. <https://www.textoscientificos.com/polimeros/transiciones-termicas-polimeros>
- Tope. (2010). *TOPE INT'L*. <https://www.topeintl.com/company-esp.html>
- Trinder, M., & Jabbal, M. (2013). Development of a smoke visualisation system for wind tunnel laboratory experiments. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, 41(1). <https://doi.org/10.7227/IJMEE.41.1.5>
- Tubo Capilar De Cobre Flexible Suave 2,8 Mm G1/4 Refrigerat*. (n.d.). Retrieved September 18, 2022, from https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-881684681-tubo-capilar-de-cobre-flexible-suave-28-mm-g14-refrigerat-_JM#position=1&search_layout=stack&type=item&tracking_id=e3ac9f94-2085-437b-a658-e669d56c7808
- Vértiz Aguirre, E. (2015). *Boletín Científico :: UAEH*. <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa2/n4/p2.html>

Voltmetro Amperimetro Digital Ac 50-500v 100a. (n.d.). Retrieved September 18, 2022, from https://merkatronix.com/index.php?id_product=2097&controller=product&id_lang=4&search_query=100A&results=4

Xia, Y., Liu, T., Li, W., Dong, X., Chen, Z., & Guo, Z. (2021). *Numerical comparisons of the aerodynamic performances of wind-tunnel train models with different inter-carriage gap spacings under crosswind.* <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104680>

Zhao, C., Wang, H., Zeng, L., Alam, M. M., & Zhao, X. (2021). Effects of oncoming flow turbulence on the near wake and forces of a 3D square cylinder. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 214, 104674. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104674>

8. ANEXOS

8.1 PLANO DEL EQUIPO CON SU RESPECTIVAS PARTES

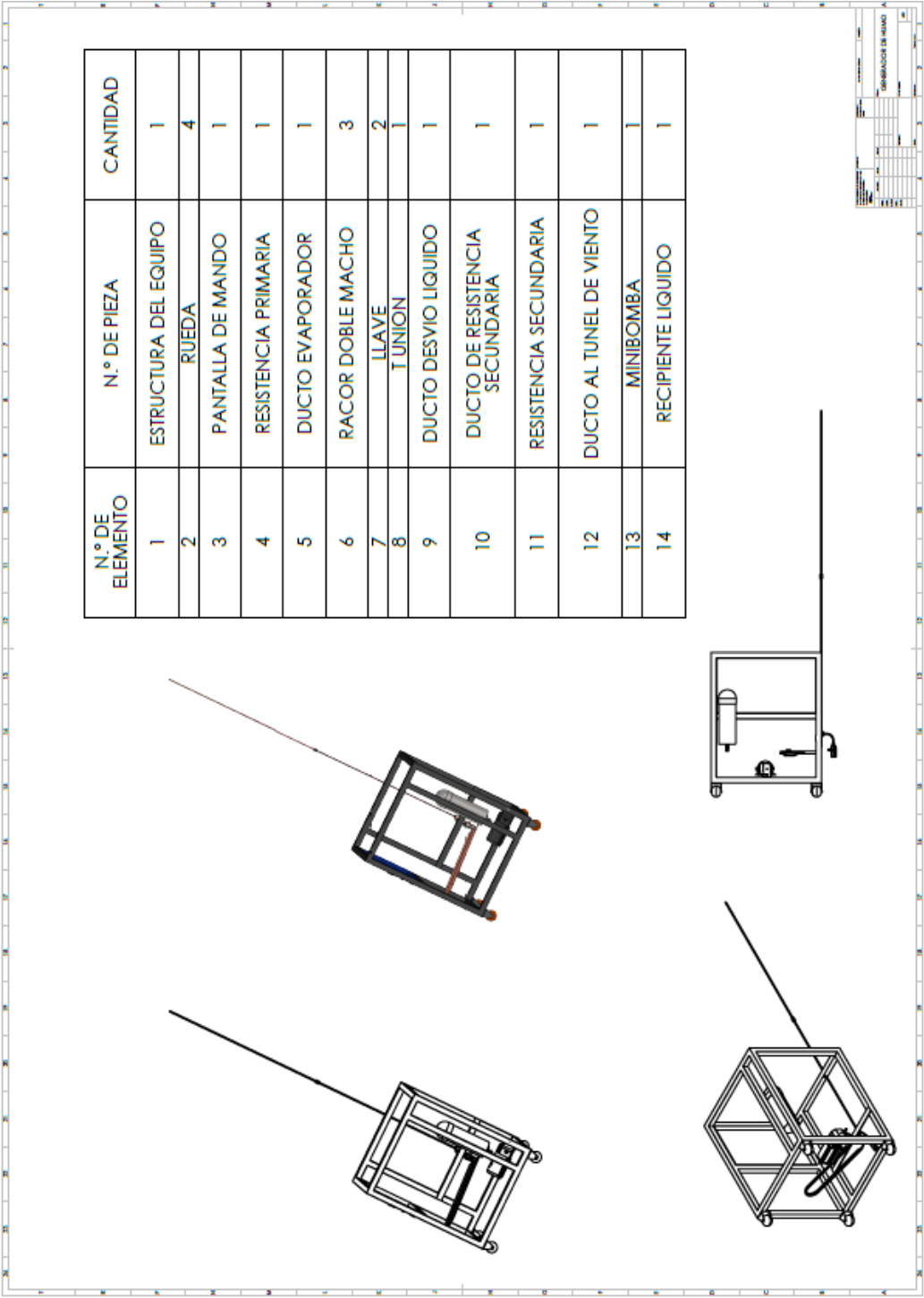


Figura 106. Plano con su respectiva tabla indicando la cantidad de las piezas que lo forman.