



Diseño y Simulación de un sistema de limpieza de suelos para el cultivo de flores mediante inyección de vapor para la empresa Flexport de Colombia SAS.

William Stiwar Reyes Lucio

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Bogotá, Colombia

2021

Diseño y Simulación de un sistema de limpieza de suelos para el cultivo de flores mediante inyección de vapor para la empresa Flexport de Colombia SAS.

William Stiwar Reyes Lucio

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Mecánico

Director (a):

Ingeniero Diego Pardo

Codirector (a):

Ingeniero Hernando Jiménez

Línea de Investigación:

Diseño y simulación de un sistema de limpieza de suelos mediante inyección de vapor.

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá DC, Colombia

2021

Agradecimientos

Agradecer principalmente a mis padres que gracias a su esfuerzo y dedicación me dieron todas las herramientas necesarias para lograr mis objetivos, me enseñaron que con esfuerzo y resiliencia ante la adversidad se pueden lograr grandes cosas, que con respeto y humildad la vida se hace más simple y primordialmente que antes de tener un título debemos ser buenas personas como hacia los demás y consigo mismo.

A mi esposa que gracias a su dedicación y apoyo vio en mi la persona capaz de lograr grandes hazañas tanto personales como profesionales, me enseñó que el talento no es suficiente para alcanzar tus metas y que con disciplina y esfuerzo se puede llegar muy alto.

A mi director y codirector de proyecto de grado ya que gracias a sus indicaciones y paciencia me indicaron el camino correcto para culminar mi tesis de la manera adecuada y darle fin a esta gran experiencia de ser universitario.

Resumen

El proyecto consiste en diseñar y simular un sistema de limpieza de suelos por medio de inyección de vapor de agua, con el fin de eliminar microorganismos e impurezas, con el fin de reemplazar el sistema que actualmente tienen en uso por parte de Flexport, el objetivo principal es conseguir un diseño más ergonómico, eficiente y de mayor durabilidad al actual, por tal razón se diagnosticó el montaje actual para identificar ventajas y desventajas y así buscar nuevos materiales de fabricación y verificar un montaje más práctico y sencillo a la hora de la limpieza del suelo. Ya que este proceso es crucial en la eliminación de microorganismos en el suelo que será usado para sembrar las flores, además de permitir al sector floricultor garantizar un proceso efectivo de eliminación de microorganismos patógenos que afecten su producción. Se diseñaron tres alternativas posibles que permitían suplir las falencias del sistema actual. La primera alternativa consiste en un sistema similar al actual, únicamente cambiando los materiales de fabricación por un polímero conocido como polietere tercetona o (PEEK) capaz de soportar temperaturas de hasta 260°C y con gran resistencia a la corrosión. La segunda alternativa consiste en dos rastrillos laterales que se insertan de forma diagonal en el terreno, los rastrillos van conectados a un colector principal que transporta el vapor que viene desde la caldera. La tercera alternativa consiste en reemplazar los materiales de acero al carbono a acero inoxidable, y un casquillo giratorio que impide la obstrucción al paso de vapor hacia el terreno.

Además, se desarrolló una simulación por medio del software ANSYS, donde se visualizó el comportamiento de la velocidad, presión, temperatura y distribución del vapor en el terreno, para ello se tuvo que hacer la caracterización del suelo como un medio poroso a partir de un experimento que dio a conocer los coeficientes de resistencia viscosa resistencia inercial.

Por medio de un análisis QFD se determinó que la alternativa tres es la más adecuada para reemplazar el sistema actual, aunque por muy poco margen respecto a las otras dos, esto se debe a que las tres cumplen en su gran mayoría con los requisitos del cliente y los requisitos de diseño planteados.

PALABRAS CLAVE: diseñar, ergonómico, eficiente, durabilidad, simular, patógenos, polietere tercetona, velocidad, presión, temperatura, ANSYS, coeficientes, resistencia, inercial, viscosa, poroso, caracterización.

Abstract

The project consists of designing and simulating a floor cleaning system by means of water vapor injection, in order to eliminate microorganisms and impurities, in order to replace the system currently in use by Flexport, the objective The main thing is to achieve a more ergonomic, efficient and more durable design than the current one, for this reason the current assembly was diagnosed to identify advantages and disadvantages in order to look for new manufacturing materials and verify a more practical and simple assembly when it comes to cleaning the floor. Since this process is crucial in the elimination of microorganisms in the soil that will be used to plant the flowers, in addition to allowing the floriculture sector to guarantee an effective process of elimination of pathogenic microorganisms that affect its production. Three possible alternatives were designed to make up for the shortcomings of the current system. The first alternative consists of a system similar to the current one, only changing the manufacturing materials for a polymer known as polyetheretherketone or (PEEK) capable of withstanding temperatures of up to 260 ° C and with great resistance to corrosion. The second alternative consists of two lateral rakes that are inserted diagonally into the ground, the rakes are connected to a main collector that transports the steam that comes from the boiler. The third alternative consists of replacing the materials from carbon steel to stainless steel, and a rotating bushing that prevents the obstruction of the passage of steam towards the ground.

In addition, a simulation was developed by means of the ANSYS software, where the behavior of the speed, pressure, temperature and distribution of the steam in the ground was visualized, for this it was necessary to characterize the soil as a porous medium from a Experiment that revealed the coefficients of viscous resistance inertial resistance.

Through a QFD analysis, it was determined that alternative three is the most suitable to replace the current system, although by a very small margin compared to the other two, this is because the three mostly meet the customer's requirements and the design requirements raised.

KEYWORDS: design, ergonomic, efficient, durability, simulate, pathogens, polyetheretherketone, speed, pressure, temperature, ANSYS, coefficients, resistance, inertial, viscous, porous, characterization.

Contenido

Capítulo 1	1
1. Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	4
1.2 Justificación	5
1.3 Objetivos	6
1.3.1 General	6
1.3.2 Específicos.....	6
Capítulo 2	7
2. Marco Teórico	7
2.1 Vapor.....	7
2.1.1 Estados del vapor	7
2.1.2 Sistemas de vapor	8
2.1.3 Distribución del vapor.....	9
2.1.4 Cálculo de redes de vapor	10
2.1.5 Flujo laminar y turbulento	11
2.2 Equipos Principales.	12
2.2.1 Caldera	12
2.3 Desinfección del suelo con vapor	14
2.3.1 Cantidad de calor requerido	17
2.4 Software ANSYS Student.	19
2.4.1 ANSYS Fluent y CFD	19
2.4.2 Metodología de simulación ANSYS Fluent.....	21
2.5 Simulación medio poroso ANSYS Fluent.....	23
2.5.1 Ecuaciones de cantidad de movimiento para medios porosos.	23
2.5.2 Definición de viscoso e inercial	24
2.5.3 Relación entre velocidad superficial y velocidades físicas.....	24
2.5.4 Derivación de los coeficientes porosos basados en presión experimental y datos de velocidad.....	25
Capítulo 3	26
3. Metodología	26
3.1 Diagnostico montaje actual.....	27
3.1.1 Características principales	27
3.2 Condiciones Iniciales del vapor.....	29
3.3 Experimento Caracterización del terreno	33
3.3.1 Base teórica	33
3.3.2 Diseño del experimento fase 1	33
3.3.3 Diseño del experimento fase 2	35
3.3.4 Selección de sensores y equipos	36
3.3.5 Montaje definitivo	39
3.3.6 Calibración de sensores.....	40
3.3.7 Sensor de flujo	41
3.3.8 Resultados	43

Capítulo 4	46
4. Diseño.....	46
4.1 Objeto.....	46
4.2 Criterios de diseño.....	46
4.3 Alternativa 1.....	47
4.4 Alternativa 2.....	49
4.5 Alternativa 3.....	51
Capítulo 5	53
5. Simulación.....	53
5.1 Modelo 3D	53
5.2 Generación de la malla	55
5.3 Configuración del análisis con FLUENT	61
5.4 Resultados.....	66
5.4.1 Análisis de distribución de temperaturas	67
Capítulo 6	79
6. Análisis de Costos y Selección de diseño	79
6.1 Materiales y procesos requeridos para la alternativa 1	79
6.1.1 Costos de materiales y fabricación alternativa 1.....	80
6.2 Materiales y procesos requeridos para la alternativa 2	81
6.2.1 Costos de materiales y fabricación alternativa 2.....	81
6.3 Materiales y procesos requeridos para la alternativa 3	81
6.3.1 Costos de materiales y fabricación alternativa 3.....	82
6.4 Comparativa de Alternativas.....	82
Capítulo 7	84
7. Análisis QFD	84
7.1 Requerimientos del Cliente (Flexport).....	84
7.2 Análisis de Alternativas de diseño	85
7.2.1 Interrelación entre requerimientos del cliente y los requerimientos técnicos...86	
7.2.2 Interrelación entre requerimientos del cliente y las alternativas de diseño propuestas.....	89
8. Conclusiones	90
9. Bibliografía	92
10. Anexos.....	94
10.1 Anexo A – Tablas de Vapor	94
10.2 Anexo B – Diagrama de Moody	97
10.3 Anexo C – Catálogos de Tuberías	98
10.4 Anexo D – Acero Inoxidable.	99
10.5 Anexo E – Resistencia a la corrosión.....	100
10.6 Anexo F – Datos Experimentales.....	102
10.7 Anexo G - Planos.....	109

Índice de Figuras

Figura 1 - Grafica estados del vapor temperatura vs entalpia (MERRITT, 2016)	8
Figura 2 - Curva típica presión vs volumen para el vapor (MERRITT, 2016).....	9
Figura 3 - Circuito de vapor típico (SARCO, 1998)	9
Figura 4 - Rugosidad exagerada en pared de tubo (MOTT, 2006).....	11
Figura 5 - Caldera Pirotubular (Fuente Hurst Boiler and Welding Co.)	13
Figura 6 - Caldera Acuotubular Fuente (https://calderaindustriales.wordpress.com)	13
Figura 7 - Tubería perforada enterrada (BARTOK, 1994).	14
Figura 8 - Temperatura de muerte para varios patógenos del suelo (LANGHANS, 1990) 15	15
Figura 9 - Parrilla Hoddesdon (WALLS, 1992)	15
Figura 10 - Parrilla con derivación en tubería (RUNIA, 2000).....	16
Figura 11 - Volumen de control (ESSS).....	20
Figura 12 - Nodos y volúmenes de control MEF izquierda – MVF derecha.....	21
Figura 13 - Algoritmo solver segregado	22
Figura 14 - Algoritmo solver acoplado.....	22
Figura 15 - Simulación en medio poroso (ESSS).....	23
Figura 16 - Flujograma metodología desarrollo de proyecto.	26
Figura 17 - Caldera Flexport (Autor)	27
Figura 18 - Montaje de rastrillos de tuberías perforadas enterradas actualmente en Flexport (Autor).....	28
Figura 19 - Entrada principal de vapor desde la caldera por medio de mangueras de Ø2 in (Autor).	28
Figura 20 - Calculadora de vapor (Fuente, TLV).....	32
Figura 21 - Montaje experimento fase 1.....	34
Figura 22 - Montaje experimento fase 1 (Autor)	35
Figura 23 - Montaje experimento fase 1 (Autor).....	35
Figura 24 - Esquema conceptual del experimento (Autor)	36
Figura 25 - Sensor de presión MPS20N0040D-S (https://e-radionica.com/).....	36
Figura 26 - Sensor de flujo YF-S201 (http://www.fssdyifa.com.cn/).....	37
Figura 27 - Tarjeta de adquisición Arduino nanoV3.0 (https://www.rs-components.com/arduino)	38
Figura 28 - Bomba sumergible HY-4501 (Autor)	38
Figura 29 - Diagrama Montaje definitivo (Autor).....	39
Figura 30 - Foto Montaje operativo (Autor)	39
Figura 31 - Esquema del circuito	39
Figura 32 - Calibración del sensor de presión.....	41
Figura 33 - Calibración del sensor de flujo	42
Figura 34 - Relación de velocidad y presión con espesor de tierra de 5 cm.....	43
Figura 35 - Relación de velocidad y presión con espesor de tierra de 2 cm.....	44
Figura 36 - Isométrico diseño alternativa 1	47
Figura 37 - Listado de materiales alternativa 1.....	47
Figura 38 - Detalle mecanizado tubería PEEK.....	48
Figura 39 - Vista planta rastrillo en tubería PEEK.	48

Figura 40 - Vista frontal rastrillo tubería PEEK.....	48
Figura 41 - Vista en sección inyectores alternativa 2	49
Figura 42 - Isométrico alternativa 2.....	50
Figura 43 - Vista planta alternativa 2.....	50
Figura 44 - Vista en sección inyectores alternativa 3	51
Figura 45 - Isométrico alternativa 3.....	52
Figura 46 - Detalle posiciones apertura y cierre de casquillo.	52
Figura 47 - Modelo de tuberías simplificado.....	53
Figura 48 - Modelo del terreno simplificado	54
Figura 49 - Sección planta interacción fluido y medio poroso.....	54
Figura 50 - Cuadro de configuración enmallado ANSYS.....	55
Figura 51 - Histograma de frecuencias calidad del elemento.	56
Figura 52 - Distribución de frecuencia acumulada y calidad de los elementos.....	57
Figura 53 - Enmallado dominio de fluido.	59
Figura 54 - Salidas de vapor (dominio de fluido).....	59
Figura 55 - Sección planta enmallado ANSYS.....	60
Figura 56 - Resultados del enmallado ANSYS.....	60
Figura 57 - Configuración del solver de FLUENT	61
Figura 58 - Configuración del modelo de análisis.....	61
Figura 59 - Configuración modelo multifase.....	62
Figura 60 - Configuración del modelo energético.....	62
Figura 61 - Configuración del modelo viscoso.....	62
Figura 62 - Corrección en condiciones de operación	63
Figura 63 - Salida de vapor a la atmosfera condición de frontera.....	63
Figura 64 - Condición de frontera en la entrada.....	64
Figura 65 - Corrección de temperatura en la entrada.....	64
Figura 66 - Condición de frontera en la salida.....	65
Figura 67 - Corrección de temperatura en la frontera de salida	65
Figura 68 - parámetros de resistencia viscosa y resistencia inercial	66
Figura 69 - Planos de seccionamiento para análisis	66
Figura 70 - Distribución de temperaturas - Plano 1-1	67
Figura 71 - Distribución de temperaturas en terreno - Plano 2-2.....	68
Figura 72 - Boquilla plano 2-2.....	69
Figura 73 - Isométrico boquilla plano 2-2	69
Figura 74 - Distribución de temperaturas en la superficie de la tubería	70
Figura 75 - Líneas de flujo en la descarga de vapor	70
Figura 76 - Distribución de temperatura desde el colector hacia las boquillas.....	71
Figura 77 - Distribución de temperaturas a nivel de terreno	72
Figura 78 - Distribución del flujo.....	73
Figura 79 - Distribución de velocidades - Plano 1-1	74
Figura 80 - Distribución de velocidades - Plano 2-2	75
Figura 81 - Distribución de velocidades en la boquilla de salida	76
Figura 82 - Distribución de velocidades en el planos 1-1 y 2-2	77
Figura 83 - Gradiente de velocidad en las boquillas.....	77

Figura 84 - Distribución de velocidades en el plano 3-3.....	78
Figura 85 - Catalogo de tuberías PEEK (Ensinger).....	80
Figura 86 - Valores absolutos req. de diseño vs los req. del cliente.....	88

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 - Velocidad en las tuberías (MOTT, 2006).....	10
Ecuación 2 - Viscosidad cinemática (MOTT, 2006).....	10
Ecuación 3 - Numero de Reynolds (MOTT, 2006).	11
Ecuación 4 - Pérdida de energía por fricción (MOTT, 2006).	11
Ecuación 5 - Factor de fricción (MOTT, 2006).....	12
Ecuación 6 - Cantidad de calor requerido	17
Ecuación 7 - Calor específico del suelo	17
Ecuación 8 - Calor específico volumétrico	18
Ecuación 9 - Cantidad de calor cedido.....	18
Ecuación 10 - Calor de vaporización.....	18
Ecuación 11 - Masa de vapor requerido.....	18
Ecuación 12 - Ecuación de la fluido dinámica	19
Ecuación 13 - Ecuación de volúmenes finitos	21
Ecuación 14 - Ecuación de movimiento para medio poroso.	23
Ecuación 15 - Relación velocidad superficial y física	24
Ecuación 16 - Flujo másico generado por la caldera.....	29
Ecuación 17 - Interpolación lineal	30
Ecuación 18 - Flujo volumétrico generado por la caldera.....	31
Ecuación 19 - Densidad del vapor	31
Ecuación 20 - Peso específico del vapor	32
Ecuación 21 - Ecuación de momento.....	33
Ecuación 22 - Ecuación de cabeza hidrostática (MOTT, 2006).....	40
Ecuación 23 - Ecuación propagación de incertidumbre.....	40
Ecuación 24 - Ecuación de incertidumbre aleatoria (BECKWITH, MARANGONI, & LIENHARD, 1993)	40
Ecuación 25 - Incertidumbre total.....	41
Ecuación 26 - Ecuación de flujo.....	41
Ecuación 27 - Ecuación propagación de incertidumbre.....	42
Ecuación 28 - Desviación estándar.....	57

Índice de Tablas

Tabla 1 - Temperaturas necesarias para erradicar plagas del suelo (BARTOK, 1994). ...	14
Tabla 2 - Inactivación térmica de enfermedades y plagas más importantes Baker y Roistacher (1957a); 2, Bollen (1969), citados por Jarvis, 1998.)	16
Tabla 3 - Caballos de fuerza respecto al flujo másico de vapor (LANGHANS, 1990).....	17
Tabla 4 - Datos ejemplo de velocidad y caída de presión.	25
Tabla 5 - Datos de entrada suministrados por Flexport.....	27
Tabla 6 - Apéndice A – Tabla A5 – Libro termodinámica (CENGEL, 2012).....	30
Tabla 7 - Coeficientes resistencia viscosa y resistencia inercial.....	45
Tabla 8 - Análisis estadístico de calidad del elemento.	56
Tabla 9 - Desviación estándar	57
Tabla 10 - Función de distribución acumulada de la distribución normal gaussiana (BUDYNAS & NISBETT, 2008).....	58
Tabla 11 - Costos de materiales y fabricación alternativa 1.	80
Tabla 12 - Costos de materiales y fabricación alternativa 2.	81
Tabla 13 - Costos de materiales y fabricación alternativa 3.	82
Tabla 14 - TIR y VPN para la alternativa 1.....	82
Tabla 15 - TIR y VPN para la alternativa 2.....	83
Tabla 16 - TIR y VPN para la alternativa 3.....	83
Tabla 17 - Requerimientos de cliente y su prioridad.....	85
Tabla 18 - Relación entre los requerimientos del cliente y diseño.....	86
Tabla 19 - Matriz de relación entre los requerimientos del cliente y los criterios de diseño.	87
Tabla 20 - Matriz de relación entre los requerimientos del cliente y la puntuación de las alternativas.	89

Capítulo 1

1. Introducción

La floricultura es una rama de la horticultura, hortus ('huerta', 'planta') y cultura ('cultivo'), está orientada al cultivo de flores y plantas ornamentales, esta práctica ancestral no tiene un inicio definido, sin embargo, se han encontrado vestigios del uso de plantas como adornos en la antigua cultura egipcia y de ahí en adelante en muchas civilizaciones de todo el mundo. La flora colombiana, una de las más ricas del mundo, fue dada a conocer desde la colonia por Pedro Cieza de León. Así Europa se dio cuenta de su variedad y colorido. Los virreyes de la nueva granada y Pedro Mendinueta Murguiz trajeron semillas de flores exóticas de algunos países del mediterráneo. Hasta 1783 se inició la primera expedición botánica que complementó la inmensa colección y descripción de sus innumerables especies. Su riqueza se vio traducida en las colecciones de José Celestino Mutis, Alexander Von Humboldt y Francisco José de Caldas, publicados en Madrid a mediados del siglo, dicha expedición identificó cerca de 1500 variedades de Pasifloráceas (CORELLA HURTADO, 1993).

A finales del siglo XIX Karl Lehman sorprendió a los floristas de Europa cuando exhibió en Londres y Berlín plantas de anturios, especie autóctona de Colombia, hecho que se constituye como la primera exportación de flores de nuestro país.

Según PROCOLOMBIA (EXPORTACIONES TURISMO INVERSION MARCA PAIS) el país lleva 40 años exportando en este sector y es el primer proveedor de flores de Estados Unidos y el primer productor de claveles del mundo.

El sector floricultor en Colombia genera más de 120.000 empleos directos y aporta alrededor del 7% del PIB agropecuario nacional, es uno de los sectores con mayor crecimiento y estabilidad a través de los años debido a la calidad del suelo y el clima tropical de sus regiones, estas ofrecen un escenario perfecto para el cultivo de flores, actualmente Colombia es el segundo exportador de flores del mundo.

El suelo en Colombia presenta las condiciones ideales para el cultivo de flores y aunque su posición geográfica y climática son óptimas para su cultivo, estos factores también influyen en el crecimiento de microorganismos patógenos para las plantas. A través de los años se han buscado muchas alternativas para la desinfección de suelos y sustratos debido a su papel fundamental en el éxito del cultivo de flores y al garantizar una desinfección adecuada se disminuye de manera considerable el riesgo en la pérdida de cultivos.

Existen varios métodos para la desinfección del suelo estos son:

- Métodos mecánicos, basados en la escarda y trituración a través de dispositivos de corte.
- Métodos térmicos, como aplicación de llama, radiación solar, radiación electromagnética o vapor.
- Métodos químicos empleando productos químicos fumigantes.

Durante la historia de la agricultura y los cultivos, se han utilizado diversos métodos para el control de patógenos, el más utilizado ha sido el Bromuro de Metilo (CH_3Br) y aunque es un método efectivo y económico, ha ocasionado muchos problemas para la salud y para el mismo suelo, tanto así que la agencia ambiental estadounidense (EPA) clasificó el bromuro de metilo como altamente tóxico en la categoría I, donde se encuentran las sustancias más peligrosas, por tal razón la búsqueda de alternativas que reemplacen estos procesos químicos fue fundamental y aunque ya se conocían métodos de control térmico como los descubiertos por Pasteur desde 1859 el uso de vapor para la eliminación de plagas se ha venido desarrollando e investigando sus avances durante los últimos 60 años.

Flexport de Colombia la empresa para la que se diseñará el sistema de desinfección es líder en la exportación de flores a nivel nacional ya que lleva sus productos a diferentes países. Fundada en 1976 por empresarios colombianos que vieron en el territorio

colombiano sus ventajas climáticas y riquezas del suelo para crear una compañía duradera y de altos estándares de calidad. Flexport es una compañía con un patrimonio total de 20 mil millones de pesos y una utilidad neta anual de más de mil millones, es por tal razón que han desarrollado métodos de desinfección efectivos y amigables con el medio ambiente.

El sistema implementado por Flexport consiste en la limpieza del suelo mediante la inyección de vapor de agua con el objetivo de eliminar microorganismos e impurezas que existen en el suelo, esta técnica nace debido a la necesidad de cambiar las técnicas de desinfección tradicionales que se había usado a través de los años por medio de productos químicos que son efectivos y de bajo costo, pero han sido regulados y hasta prohibidos debido a su toxicidad y contaminación al medio ambiente.

El principal objetivo de Flexport es eliminar un patógeno que ataca a sus claveles, esta enfermedad conocida como *Fusarium oxysporum*, esta se manifiesta en varios tipos de plantas. Cortando los tallos en sentido transversal, se observan unas coloraciones internas del tejido vascular similares a áreas corchosas de color pardo. Para distinguir la enfermedad de otras con síntomas parecidos, hay que tener en cuenta que hasta los últimos momentos no se aprecia ningún tipo de lesión en la parte exterior del tallo.

El método más utilizado en la actualidad por las empresas del sector floricultor y horticultor es la desinfección por medio de inyección de vapor, este sistema funciona por medio de calderas de vapor de alta potencia, que a través de un ventilador inyecta vapor a más de 100°C por medio de tuberías, este método cuenta con algunas desventajas importantes como:

- Tiempos prolongados de desinfección.
- Calderas de alta potencia y consumo elevado de energía.
- Mayor infraestructura para el montaje del sistema de tuberías que conducen el vapor hacia el suelo.
- Aunque existe una disminución significativa en los patógenos estos pueden regresar en poco tiempo.

1.1 Planteamiento del problema

A través de los años Flexport ha desarrollado un sistema de limpieza de suelos por medio de inyección de vapor de forma efectiva logrando los resultados esperados, el sistema actual consta de una caldera con una capacidad de entre 100 a 150 Hp a 280°F y una presión de salida de 60 psi, posteriormente el vapor es conducido por medio de mangueras hasta llegar al ramal principal de tuberías que se posicionan a lo largo de la cama de tierra de 60 cm de ancho x 30 m de largo.

Para este montaje los trabajadores deben cavar zanjas de 30 cm de ancho x 50 cm de profundidad y una longitud de 30 metros, posteriormente se instalan los rastrillos y se llena la zanja con la tierra que se desea desinfectar, este proceso además de llevar bastante tiempo genera un desgaste significativo en los trabajadores de Flexport.

Además del trabajo previo para la inyección de vapor, posterior a este cuando se retiran los rastrillos del terreno se le realiza un llenado biológico con trichoderma, este es un fungicida ecológico que ayuda a controlar los hongos del suelo en particular el *Fusarium oxysporum* que es el principal hongo que ataca las plantas en el cultivo de flores.

El sistema actual requiere un tiempo mayor de preparación del suelo previo a la limpieza y un trabajo físico mayor por parte de los trabajadores en el alistamiento y preparación del terreno. Pero este procedimiento es fundamental para garantizar que la pasteurización del terreno con vapor sea efectiva.

Los trabajadores de Flexport se han dado cuenta que su sistema posee ciertas falencias en cuanto a la duración de los materiales y la ergonomía en el montaje previo a la limpieza.

El sistema actual utilizado por Flexport cumple con los requerimientos de limpieza del suelo, pero posee tres deficiencias fundamentales.

1. El rastrillo actual es fabricado con tubería en acero al carbón y este tiene un desgaste rápido debido a la corrosión generada por la tierra húmeda y el vapor, ya que el sistema debe estar enterrado por un tiempo considerable y además es de uso continuo. Según los técnicos de Flexport el sistema tiene una vida útil de 1 año aproximadamente.

2. Los módulos de los rastrillos son de 3m y tienen un peso de 35 kg aproximadamente que es bastante alto para estar siendo transportados por una persona cada vez que se vaya a realizar el proceso de limpieza de una cama de suelo generando así un esfuerzo mayor en los trabajadores del cultivo ya que para desinfectar una cama de 30 m se necesitan 10 módulos de rastrillos.

3. Las tuberías perforadas enterradas tienden a obstruirse o colmatarse de tierra, deteniendo así el paso de vapor desde la tubería hacia el terreno.

1.2 Justificación

El sistema de desinfección actual por medio de la inyección de vapor, garantiza el cumplimiento de la resolución 138 de enero de 1996 del ministerio de salud donde se prohíbe el bromuro de metilo.

Ya que el suelo juega un papel tan importante en los cultivos, debido a que este requiere un cuidado especial y una limpieza rigurosa antes del proceso de siembra.

El diseño presentado tiene como objetivo solucionar las deficiencias del actualmente utilizado por Flexport, este debe garantizar la efectividad en la desinfección del montaje actual ya que no se modificará los puntos específicos de inyección de vapor, ni los diámetros de tubería, manteniendo así la presión y caudal del diseño anterior, nuestros cálculos y simulación determinarán las presiones y caudales analíticos que se manejan en la red de tuberías del sistema de inyección de vapor.

Para dar solución al problema en cuanto a la duración de los materiales con los que se fabrican los rastrillos actuales, ya que estos son en acero al carbono y no cuentan con ningún recubrimiento de pintura o zincado permitiendo una corrosión rápida de las tuberías, por tal razón se proponen tres alternativas para aumentar la durabilidad del diseño.

1. Fabricar los rastrillos en un polímero que soporte dichas condiciones, se identificó un material conocido como polieteretercetona, las piezas fabricadas con este polímero termoplástico pueden trabajar a temperaturas elevadas de hasta 260 °C (480 °F) y su punto de fusión está en torno a los 341 °C (646 °F). Este plástico suele utilizarse en entornos en los que hay presencia de agua o vapor caliente, ya que mantiene sus propiedades físicas, como la resistencia a la flexión y a la tracción, a un alto nivel a pesar del ambiente severo. La polieteretercetona suele considerarse uno de los termoplásticos de ingeniería que tiende a tener un precio elevado, sin embargo, los usuarios experimentados reconocen el valor añadido que aportan los materiales de este plástico, ya que ofrecen la posibilidad de fabricar piezas más ligeras, más resistentes y capaces de sobrevivir durante más tiempo en condiciones difíciles.

2. Fabricar los rastrillos en tubería ASTM A53 (Acero al carbono) y posteriormente realizarles un galvanizado en caliente bajo la norma ASTM A153, este recubrimiento a base de zinc se ha utilizado para aumentar la resistencia a la corrosión durante casi 180 años, el galvanizado en caliente consiste en generar una capa superficial que se adhiere a los átomos de hierro añadiendo níquel, cromo entre otros elementos que mejoran exponencialmente la resistencia a la corrosión. Aunque este proceso nos ayuda a mejorar la vida útil del sistema nos genera un riesgo grande que debe ser controlado por los técnicos de flexport y es el hecho de que al iniciar la corrosión el desprendimiento de partículas de níquel, cromo y en particular de plomo afectarían de manera crítica la composición química del terreno y ya no sería un terreno ideal para la siembra por tal razón los rastrillos deberán reemplazarse en un menor tiempo al presupuestado sin embargo, la vida útil de este

sistema sería mayor al actual. De igual manera se fabricará una camisa protectora en polieterecetona.

3. Fabricar los rastrillos en tubería ASTM A312 TIPO 312 (Acero inoxidable) el acero inoxidable garantiza una vida útil de por lo menos 10 años bajo ambientes de corrosión extremos como en este caso, la única desventaja sería su alto costo de fabricación.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Diseñar y simular mediante el software ANSYS un sistema de limpieza y desinfección para el cultivo de flores por medio de inyección de vapor al suelo para la empresa Flexport de Colombia S.A.S.

1.3.2 Específicos

- Realizar un diagnóstico técnico del funcionamiento del sistema actual utilizado por FLEXPOR para la limpieza y desinfección de suelos utilizado para el cultivo de flores, realizando un análisis matemático del comportamiento hidráulico y termodinámico del mismo.
- Diseñar un sistema alternativo de inyección de vapor con el fin de agilizar y facilitar el proceso de limpieza y desinfección del suelo para la empresa FLEXPOR mediante el software Autodesk Inventor.
- Simular el funcionamiento del sistema de inyección de vapor utilizando el software ANSYS.
- Realizar análisis financiero del diseño propuesto.
- Redacción de documentación final del proyecto y documento de tesis.

Capítulo 2

2. Marco Teórico

2.1 Vapor

El vapor proporciona un medio para transportar cantidades controlables de energía generalmente desde una caldera. Por muchas razones el vapor es uno de los productos básicos más utilizados para transportar energía térmica. Su uso es popular en toda la industria debido a la amplia gama de tareas, que van desde la producción de energía mecánica hasta la calefacción de espacios y otras aplicaciones en procesos industriales.

El vapor es considerado un fluido energético debido a la capacidad de retener una gran cantidad de energía por peso de entre 1000 a 1200 Btu /lb, esto lo hace ideal para su uso como medio de transporte de energía. Ya que la mayoría de la energía térmica contenida en el vapor se encuentra en forma de calor latente por consiguiente grandes cantidades de energía se puede transferir de manera eficiente a temperatura constante, lo que es útil en muchas aplicaciones (MERRITT, 2016).

2.1.1 Estados del vapor

A medida que el vapor se forma en un recipiente cerrado, se desarrolla presión lo que le permite fluir en cualquier lugar a una presión más baja, es decir, a través de tuberías y equipos distantes. Así mismo si se deja que el vapor se enfríe, liberará la energía que se añadió para evaporarlo. Estos eventos de ebullición, transferencia y condensación proporcionan un mecanismo simple para transferir energía de un lugar a otro, de ahí la base de un sistema de vapor, el vapor es incoloro, el color blanco se ve a menudo cuando las descargas de vapor a la atmósfera provienen del vapor de agua.

El vapor se crea a partir del agua y esta es abundante y barata. No es peligroso para la salud y el medio ambiente. En su forma gaseosa es un portador de energía segura y eficiente. El vapor puede contener de cinco a seis veces más energía que una masa equivalente de agua. Se puede generar a altas presiones para dar altas temperaturas de vapor. Cuanto mayor sea la presión mayor será la temperatura, por lo que su potencial de trabajo es mayor.

El vapor no solo es un excelente portador de calor, También es estéril y por lo tanto su uso en procesos en la industria alimentaria, farmacéutica e industrias de la salud.

El vapor también es intrínsecamente seguro: no puede provocar chispas y no presenta riesgo de incendio, ideal para usar como medio de transferencia de calor en áreas peligrosas o atmósferas explosivas.

2.1.2 Sistemas de vapor

Generalmente, los sistemas de vapor se pueden clasificar en una de las tres categorías:

1. Sistemas de calentamiento de vapor
2. Sistemas de generación de energía a vapor
3. Procesar sistemas de vapor

Los sistemas de calentamiento de vapor son generalmente sistemas de circuito cerrado de baja presión que se encuentran en edificios gubernamentales y escolares.

Los sistemas de generación de energía a vapor pueden variar en tamaño. Algunos son grandes de alta presión sistemas de vapor que utilizan vapor para impulsar un generador de turbina. Plantas de energía nuclear, centrales eléctricas de carbón y biomasa.

El vapor de proceso son sistemas que pueden variar en tamaño desde pequeños (<100 lb/h) hasta muy grandes (> 100,000 lb / h). Los requisitos de cantidad y calidad de vapor influyen en el diseño (MERRITT, 2016).

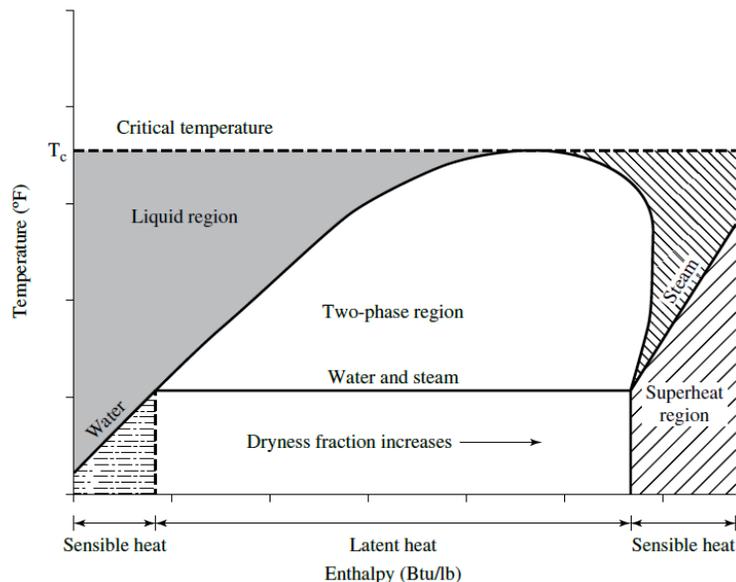


Figura 1 - Grafica estados del vapor temperatura vs entalpia (MERRITT, 2016)

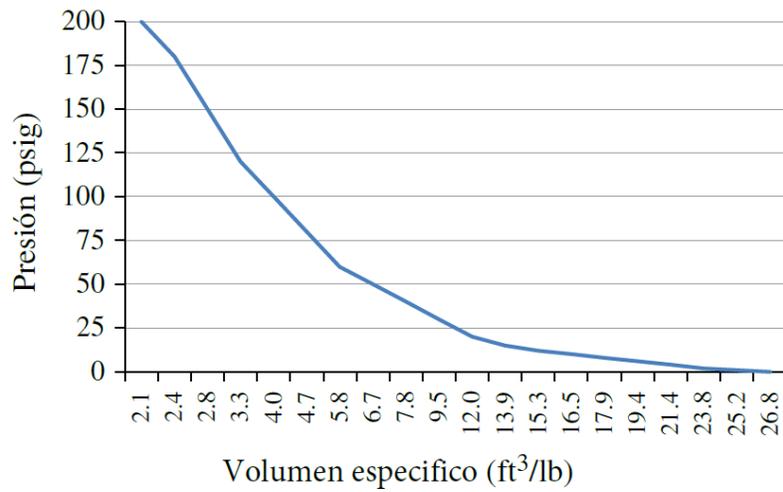


Figura 2 - Curva típica presión vs volumen para el vapor (MERRITT, 2016)

2.1.3 Distribución del vapor

El vapor es generado en una caldera y este es conducido por medio de tuberías hasta un punto que requiere un consumo de vapor definido.

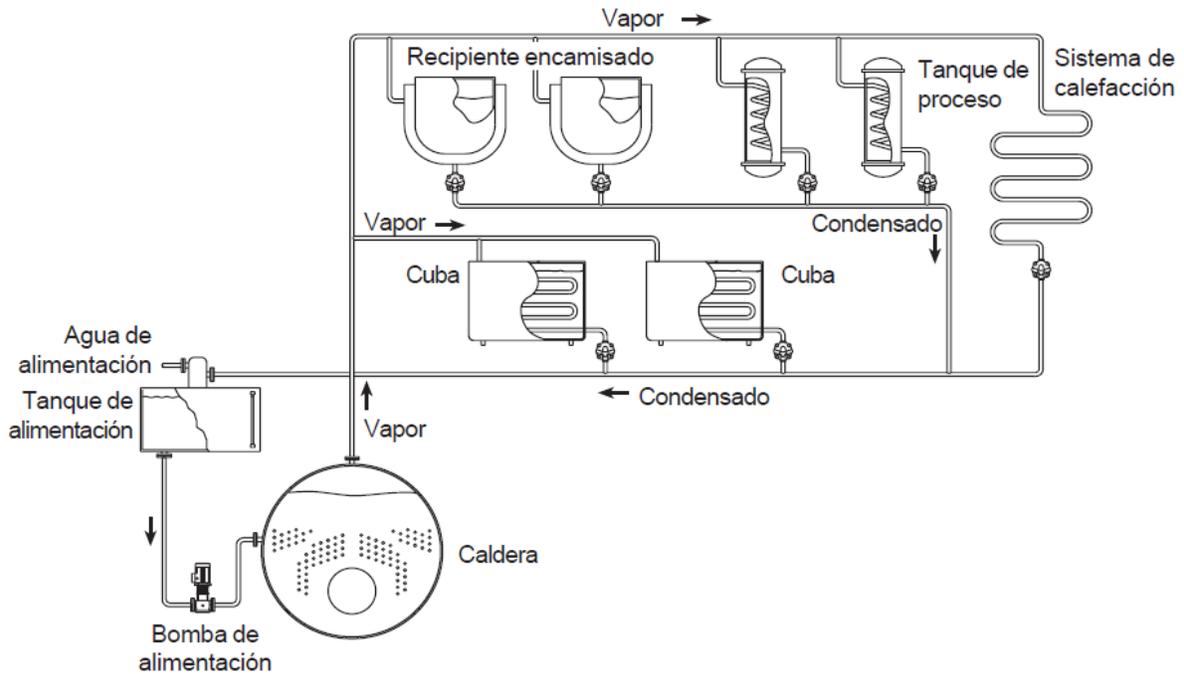


Figura 3 - Circuito de vapor típico (SARCO, 1998)

2.1.4 Cálculo de redes de vapor

Normalmente una red de vapor se calcula mediante requerimientos de diseño iniciales, como el caudal de trabajo que requiere cada equipo de la red que se va a alimentar con vapor, también se deben conocer todos los accesorios, longitud de la tubería, temperatura del vapor.

Según (SARCO, 1998) las velocidades recomendadas de diseño por experiencia se deben mantener entre 25 a 40 m/s, ya que al superar este rango pueden presentarse ruidos y erosión en la tubería particularmente si el vapor es húmedo.

El diseñador de una red de vapor se debe plantear dos análisis fundamentales; el primero es calcular la pérdida de carga para un determinado caudal de trabajo y segundo el diámetro de tubería mínimo que le permita mantener una presión que se vea afectada por la pérdida de energía debido a la fricción.

La relación entre velocidad y caudal viene dada por la siguiente expresión:

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

Ecuación 1 - Velocidad en las tuberías (MOTT, 2006).

La densidad es la masa de fluido contenida en una unidad de volumen; en líquidos, depende de la temperatura; en gases y vapores los cambios de densidad son más importantes que en los líquidos y dependen de la temperatura y la presión.

El peso específico es el peso de fluido contenido en la unidad de volumen; se obtiene multiplicando la densidad por la aceleración de la gravedad.

La viscosidad de un fluido (líquido, vapor, gas) representa el valor de los rozamientos internos que se oponen a su movimiento. Su conocimiento es esencial para determinar el comportamiento de este fluido cuando está en movimiento, así como la pérdida de carga en las tuberías.

Hay que considerar dos tipos de viscosidad:

La viscosidad dinámica se expresa en poises (P), CGS o en centipoises (cP). Se designa la letra η .

La viscosidad cinemática se expresa en Stokes (St), unidad del sistema CGS o más habitualmente en centistokes (cSt). Se designa con la letra griega ν .

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

Ecuación 2 - Viscosidad cinemática (MOTT, 2006).

Donde ρ es la densidad del fluido.

Es una característica propia de cada tubería; hay dos formas de expresar la rugosidad:

- Absoluta (ϵ): Es la altura media de las asperezas interiores de la tubería.
- Relativa (ϵ/D): Es la relación entre la rugosidad absoluta y el diámetro de la tubería.

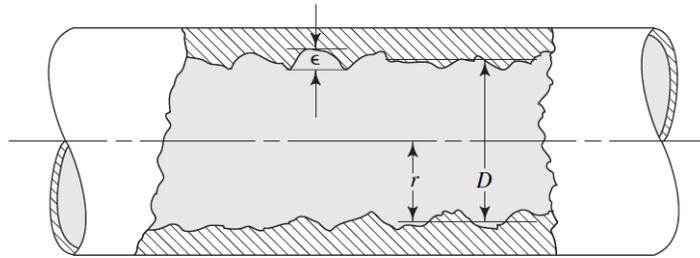


Figura 4 - Rugosidad exagerada en pared de tubo (MOTT, 2006).

2.1.5 Flujo laminar y turbulento

El comportamiento de un fluido, en particular en lo que se refiere a las pérdidas de energía, depende de que el flujo sea laminar o turbulento.

$$N_R = \frac{vD\rho}{n} = \frac{vD}{\vartheta} = 10^3 \frac{vD}{\vartheta} = \frac{4 * 10^6}{3.6} * \frac{Q}{\pi D \vartheta}$$

Ecuación 3 - Numero de Reynolds (MOTT, 2006).

Donde v es la velocidad, D es el diámetro interior de la tubería, ρ es la densidad del fluido, n es la viscosidad dinámica y ϑ es la viscosidad cinemática.

Para aplicaciones prácticas del flujo en tuberías, encontramos que, si el número de Reynolds para el flujo es menor que 2000, éste será laminar. Si el número de Reynolds es mayor que 4000, el flujo será turbulento. En el rango de números de Reynolds entre 2000 y 4000 es imposible predecir qué flujo existe; por tanto, le denominaremos región crítica. Las aplicaciones prácticas involucran flujos que se encuentran bien dentro del rango laminar o bien dentro del turbulento (MOTT, 2006).

Ecuación de Darcy para calcular la pérdida de energía.

$$h_L = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 4 - Pérdida de energía por fricción (MOTT, 2006).

hL = Pérdida de energía debido a la fricción.

L = Longitud de la corriente del flujo (m o pies)

D = Diámetro de la tubería (m o pies)

v = Velocidad promedio (m/s)

f = Factor de fricción (adimensional)

El factor de fricción para flujo laminar se puede calcular de la siguiente manera.

$$f = \frac{64\eta}{vD\rho} = \frac{64}{N_R}$$

Ecuación 5 - Factor de fricción (MOTT, 2006).

Cuando se tiene un flujo turbulento el factor de fricción se debe hallar por medio de la rugosidad relativa D/ϵ y el diagrama de Moody (Ver Anexo B)

2.2 Equipos Principales.

2.2.1 Caldera

Las calderas son máquinas que generan vapor al calentar agua por medio de un quemador y hacerlo circular por medio de tuberías realizando un proceso de transferencia de calor. El tamaño de la caldera depende de la producción de vapor.

La configuración de la caldera viene determinada por:

- El sistema de combustión
- El combustible
- Las características de la ceniza
- La presión de operación
- La capacidad total de generación de vapor (potencia máxima)

Las calderas se clasifican en 2 tipos:

- **Pirotubulares:** Son generadores de vapor pequeños, también conocidos como calderas de tubos de fuego. En este tipo de calderas los gases calientes circulan por dentro de los tubos y el agua circula por el exterior de estos, en ellas se genera agua caliente o vapor saturado.

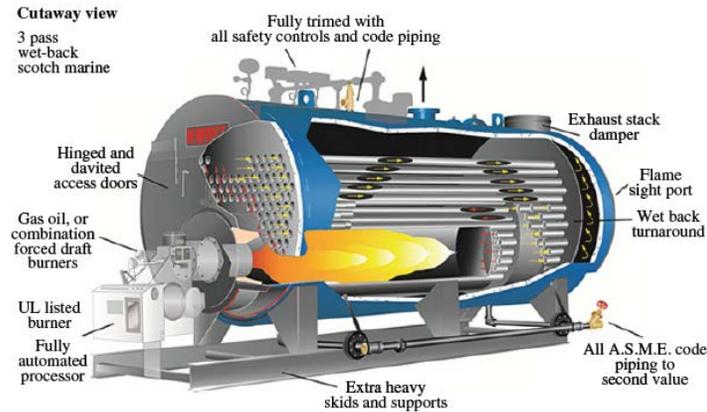


Figura 5 - Caldera Pirotubular (Fuente Hurst Boiler and Welding Co.)

- Acuotubulares: Son generadores de vapor de pequeño volumen de agua. En este tipo de calderas el agua circula por dentro de los tubos, mientras que los gases circulan por el exterior de estos, de manera contraria a cómo trabajan las calderas pirotubulares.



Figura 6 - Caldera Acuotubular Fuente (<https://calderaindustriales.wordpress.com>)

La potencia de una caldera viene definida en BHP (Boiler Horsepower) o caballo de fuerza de caldera es la capacidad que tiene una caldera para entregar vapor. Es equivalente a 34,5 libras de agua evaporada por hora a 212°F o 100°C, esta definición será de gran utilidad para determinar el flujo másico generado por la caldera utilizada por Flexport.

2.3 Desinfección del suelo con vapor

Según (BARTOK, 1994) El vapor ofrece una buena opción para la desinfección de terrenos usados en invernaderos. Este plantea que un sistema de tuberías perforadas y enterradas a 12 in de profundidad esto con el fin de inyectar vapor desde la parte inferior de la cama y se eleva hacia la superficie proporcionando un control uniforme de desinfección en todo el terreno.

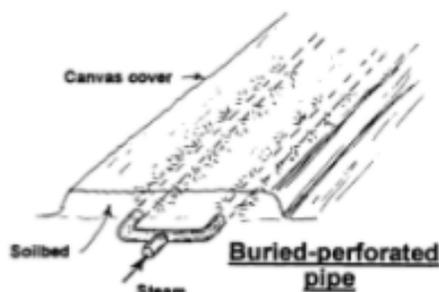


Figura 7 - Tubería perforada enterrada (BARTOK, 1994).

Las temperaturas necesarias para erradicar los patógenos que atacan el suelo se encuentran entre los 70°C y 80°C aproximadamente durante un tiempo de 30 minutos, (BARTOK, 1994), (LANGHANS, 1990).

Temp. °C	Microorganismos
46	Pythium and Phytophthora
50	Nematodos
57	Gusanos, babosas, ciempiés
60	Mayoría de las bacterias patógenas
70	Insectos del suelo
80	Mayoría de semillas de malas hierbas
100	Pocas semillas resistentes de malas hierbas y virus de las plantas

Tabla 1 - Temperaturas necesarias para erradicar plagas del suelo (BARTOK, 1994).

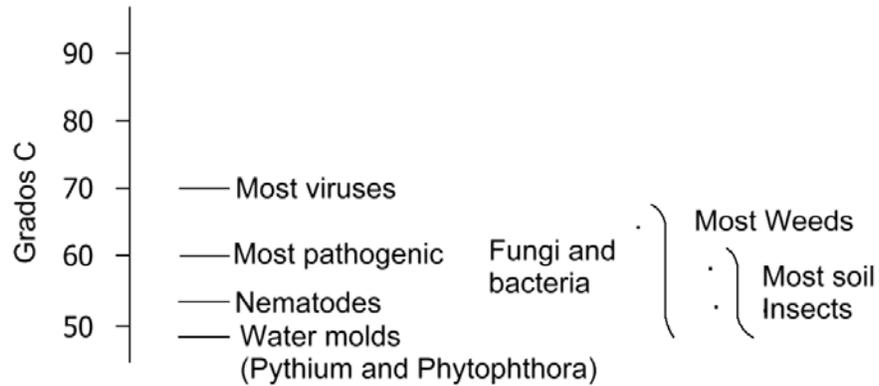


Figura 8 - Temperatura de muerte para varios patógenos del suelo (LANGHANS, 1990)

De acuerdo a (WALLS, 1992) el punto de ebullición del agua es 100°C, a dicha temperatura operan muchos de los procesos de esterilización. De hecho, muchas bacterias y microorganismos se destruyen a temperaturas bajas entre 50 a 60°C, pero hay enfermedades que requieren más de 90°C en el terreno.

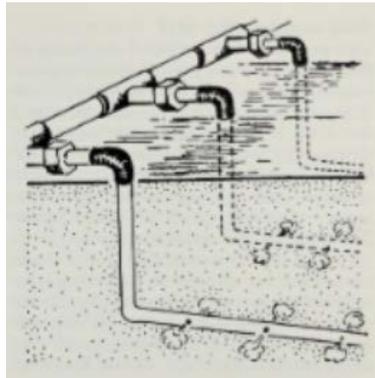


Figura 9 - Parrilla Hoddesdon (WALLS, 1992)

La desinfección del suelo en todo tipo de cultivos ya sea de flores, vegetales etc. tiene como objetivo la eliminación de microorganismos patógenos para dichos cultivos, esta desinfección durante muchos años se llevó a cabo por medio de productos químicos en especial el Bromuro de Metilo (CH_3Br) al ser éste prohibido por sus niveles altos de contaminación y toxicidad; el vapor se convirtió en el mejor método para lograr una desinfección sana y efectiva de los terrenos como se observa en la figura 9 donde se puede observar tuberías enterradas con perforaciones que permiten el flujo del vapor desde la parte inferior del suelo hacia la superficie.

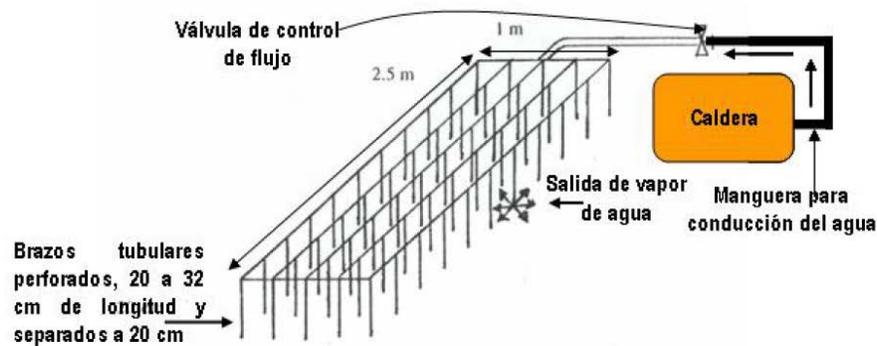


Figura 10 - Parrilla con derivación en tubería (RUNIA, 2000)

Enfermedad	Temperatura (°C)	Tiempo de exposición (min)	Referencias (a)
La mayor parte de las bacterias	60 – 70	10	1
Bacterias termotolerantes	90	30	2
Botrytis cinérea	55	15	1
<i>Cylindrocaron destructans</i>	50	30	2
<i>Didymella lycopersici</i>	50	30	2
<i>Fusarium oxysporum</i>			
<i>f. sp. dianthi</i>	60	30	2
<i>f. sp. Gladioli</i>	57	30	1
<i>Phialophora cinerescens</i>	50	30	2
<i>Phytophthora cryptogea</i>	50	30	2
<i>Pythium sp</i>	53	30	2
<i>P.ultimum</i>	46	20 – 40	1
	50	30	2
<i>Rhizoctonia sp</i>	52	30	1
	53	30	2
<i>R. solani</i>	53	30	2
<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	50	5	1
<i>Sclerotium rolfsii</i>	50	30	2
<i>Thielaviopsis basicota</i>	48	30	2
<i>Verticillium albo-atrum</i>	53	30	2
<i>V. dahliae</i>	58	30	2
La mayor parte de los hongos patógenos	60	30	1
La mayor parte de los actinomicetos	90	30	1
Nematodos foliares	49	15	1
<i>Anguillulina dipsaci</i>	56	11	1
<i>Heterodera marioni</i>	48	15	1
<i>Meloidogyne incógnita</i>	48	10	1
<i>Pratylenchus penetrans</i>	49	10	1
La mayor parte de los virus	100	15	1
Insectos y ácaros	60-70	30	1
Gusanos, babosas y ciempiés	60	30	1
La mayor parte de las malas hierbas	70 – 80	15	1

Tabla 2 - Inactivación térmica de enfermedades y plagas más importantes Baker y Roistacher (1957a); 2, Bollen (1969), citados por Jarvis, 1998.)

Según (LANGHANS, 1990). La capacidad calorífica del agua es 1, es decir, un Btu elevará una libra de agua en 1F, y la capacidad calorífica de las partículas del suelo es de aproximadamente 0,2 o 20% del agua. Por lo tanto, cuanto más húmedo esté el suelo, más energía será necesaria para llegar a los 80 ° C requeridos. Este hecho parece indicar que el suelo debe estar seco antes de que inyecte el vapor, pero el suelo seco hace que muchos patógenos entren en formas más resistentes y sean más difíciles de erradicar.

Caballos de fuerza (hp)	Btu/hr	Libra de vapor/hr
½	16.737	17.3
1	33.475	34.5
5	167.375	86.3
10	334.750	345
50	1.673.750	862.5
100	3.347.500	3450

Tabla 3 - Caballos de fuerza respecto al flujo másico de vapor (LANGHANS, 1990)

2.3.1 Cantidad de calor requerido

El calor “W” es la energía que se transmite entre dos cuerpos que se encuentran a diferentes temperaturas donde existe una transferencia de calor.

$$W_r = C_p \Delta T$$

Ecuación 6 - Cantidad de calor requerido

W_r es la cantidad de calor requerido para alcanzar la temperatura del suelo, donde C_p es el calor específico del medio y ΔT es la diferencia entre la temperatura inicial y final.

El calor específico por unidad de masa o de volumen de un suelo o de un sustrato resulta de sumar los calores específicos de los materiales que lo componen (AGUILERA, 2015).

$$C_m = \sum_{i=1}^n x_i \cdot C_i$$

Ecuación 7 - Calor específico del suelo

Dónde: C_m - calor específico del suelo o sustrato por unidad de masa, $\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; x_i - cantidad relativa de cada material constituyente, adimensional; C_i calor específico de cada material constituyente $\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (AGUILERA, 2015).

El calor requerido por unidad de volumen se calcula el calor específico volumétrico del suelo (ecuación 8), posteriormente se aplica en la ecuación 9.

$$C_v = \sum_{i=1}^n x_i \cdot C_i \cdot \rho_{bi}$$

Ecuación 8 - Calor específico volumétrico

$$W_{sv} = C_v \cdot \Delta T$$

Ecuación 9 - Cantidad de calor cedido

Dónde: C_v calor específico volumétrico del sustrato $\text{kJ m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; x_i cantidad relativa de cada material constituyente, adimensional; C_{vi_calor} específico volumétrico de cada material constituyente $\text{kJm}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; ρ_{bi} densidad aparente de cada suelo o sustrato, kgm^{-3}

El calor cedido por metro cúbico de vapor vendrá definido por el paso del vapor a 100°C a líquido a temperatura de desinfección, 70°C aproximadamente, es decir, que corresponde al calor latente liberado (W_{lat}) y a 30° de calor sensible aproximadamente (AGUILERA, 2015).

$$W_{vap} = W_{lat} + C_{agua} \cdot \Delta T$$

Ecuación 10 - Calor de vaporización

La cantidad de vapor que se necesita para incrementar la temperatura inicial a la temperatura final con una cantidad volumétrica o másica de un suelo o de un sustrato.

$$M_{vapor} = \frac{W_r}{W_{va}}$$

Ecuación 11 - Masa de vapor requerido

Donde: M_{vapor} - son los kg de vapor de agua requerido por kg de suelo; W_r - cantidad de calor requerido kJkg^{-1} , de suelo o de sustrato; W_{va} - calor de vaporización del agua, kJkg^{-1} de vapor de agua (AGUILERA, 2015).

2.4 Software ANSYS Student.

El software de simulación más completo para ingeniería ANSYS en su módulo CFD (Computational Fluid Dynamics). ANSYS está dividido en tres herramientas principales llamados módulos: pre-procesador (creación de geometría y mallado), procesador y post-procesador. Tanto el pre-procesador como el post-procesador están provistos de una interfaz gráfica. Este procesador de elemento finito para la solución de problemas mecánicos incluye: análisis de estructuras dinámicas y estáticas (ambas para problemas lineales y no lineales), análisis de transferencia de calor y fluido dinámica, y también problemas de acústicas y de electromagnetismo.

2.4.1 ANSYS Fluent y CFD

La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (del inglés Computational Fluid Dynamics) es el área de conocimiento que trata sobre la simulación numérica de flujos fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados tales como reacciones químicas, combustión, Aero acústica etc. El CFD tuvo origen a partir de la combinación de dos disciplinas: mecánica de los fluidos y cálculo numérico. Las ecuaciones que rigen el flujo fluido tienen origen en la mecánica de los fluidos y pueden ser resueltas por medio de diferentes métodos numéricos. (Blog Equipo ESSS,2016)

La principal ecuación resuelta vía Fluido dinámica Computacional es la ecuación de transporte de la variable de interés, representada por el símbolo Φ . Dicha ecuación se representa de la siguiente manera.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \Phi dV + \oint_A \rho \Phi V \cdot dA = \oint_A \Gamma_\Phi \nabla \Phi \cdot dA + \int_V S_\Phi dV$$

Ecuación 12 - Ecuación de la fluido dinámica

ρ : Densidad del medio

Φ : Variable transportada a través del medio

Γ : Constante de difusión del medio

S_Φ : término fuente/ sumidero de variable Φ

V : Velocidad que se desplaza Φ en el medio.

Todas las ecuaciones de conservación resueltas en Dinámica de Fluidos Computacional poseen la forma anterior, con cuatro términos: el término de tiempo, el término advectivo, el término difusivo y el término fuente. Para representar diferentes ecuaciones de

conservación se alteran sólo tres componentes de la ecuación: la variable Φ , el coeficiente de difusión Γ , y la fuente S .

Aunque la ecuación anterior utilizada en la mayoría para las simulaciones CFD, esta no posee una solución analítica, por tal motivo es necesario realizar un método de discretización. Actualmente se usan dos tipos de métodos: el método de elementos finitos y el método de los volúmenes finitos.

Para la dinámica de fluidos se utiliza el método de volúmenes finitos.

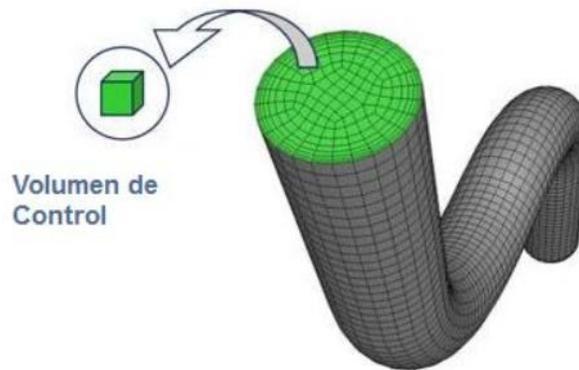


Figura 11 - Volumen de control (ESSS).

El método de los volúmenes finitos permite discretizar y resolver numéricamente ecuaciones diferenciales. Es un método alternativo a los de diferencias finitas y elementos finitos. Se considera una malla de discretización del espacio fluido. En torno a cada punto de esta malla se construye un volumen finito que no se traslapa con los de los puntos vecinos. De esta forma el volumen total de fluido resulta ser igual a la suma de los volúmenes de control considerados. La ecuación diferencial a resolver se integra sobre cada volumen de control.

En el MVF el dominio es subdividido en un número finito de volúmenes de control y las ecuaciones de control son aplicadas a cada uno de ellos. En cada volumen se toma como referencia el centroide para realizar los cálculos de las variables como son presión, temperatura, velocidad, etc., y por medio de la interpolación se puede calcularlas en las fronteras de cada volumen. (DURAN, 2017).

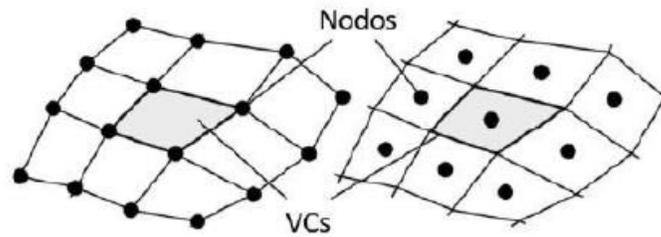


Figura 12 - Nodos y volúmenes de control MEF izquierda – MVF derecha.

MEF: Método elementos finitos – **MVF:** Método de volúmenes finitos

En el primer miembro, el primer término corresponde a la variación temporal de la magnitud Φ dentro del volumen V , el segundo hace referencia a los flujos convectivos de Φ a través de la frontera (A) debido al movimiento de velocidad V . En el segundo miembro, el primer término expresa el término difusivo de Φ en la frontera A , el cual no depende el movimiento V , únicamente del gradiente de Φ , y, por último, el término fuente de Φ en el interior del volumen V .

Las integrales de volumen se resuelven para el volumen de la celda concreta y las integrales de superficie se expresan como la suma de los integrandos en cada sub-frontera que compone la frontera de la celda A (DURAN, 2017).

$$V_{cell} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \sum_f^{N_{faces}} \rho_f \vec{v}_f \Phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\Phi \nabla \Phi_f \cdot \vec{A}_f + S_\Phi \cdot V_{cell}$$

Ecuación 13 - Ecuación de volúmenes finitos

La ecuación anterior presenta la conservación de un volumen finito, por lo que el sistema de ecuaciones total incluye tantas ecuaciones como volúmenes finitos existentes en el modelo.

2.4.2 Metodología de simulación ANSYS Fluent

El ANSYS fluent para resolver matemáticamente las ecuaciones de método de volúmenes finitos realiza los siguientes pasos:

- Dividir el dominio en volúmenes discretos (mallado).
- Integrar las ecuaciones de conservación en cada volumen discreto para obtener el sistema de ecuaciones discreto. Discretización.
- Linealizar las ecuaciones discretizadas.
- Resolución del sistema de ecuaciones algebraicas.

El ANSYS Fluent utiliza algoritmos que permiten la resolución numérica estos son el Solver segregado y el solver acoplado.

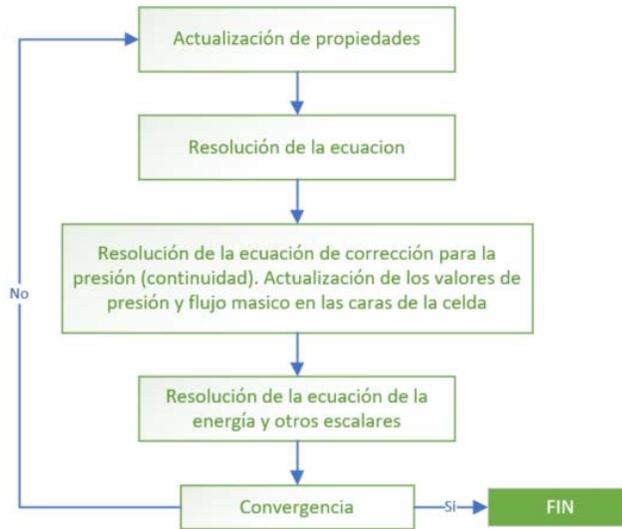


Figura 13 - Algoritmo solver segregado

La resolución de las ecuaciones en este algoritmo es secuencial, esquemáticamente se ilustra el proceso en la figura 13. Inicialmente se actualizan las propiedades del campo fluido, siendo para la primera iteración estos valores correspondientes a las condiciones iniciales del problema. En las iteraciones posteriores, los valores actualizados serán los resultados de la iteración anterior.

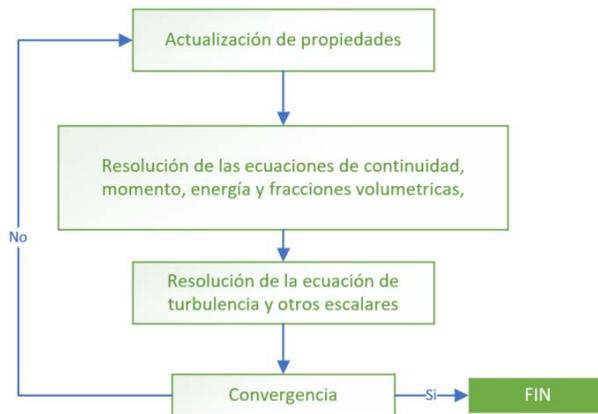


Figura 14 - Algoritmo solver acoplado

El solver acoplado resuelve las ecuaciones de conservación de forma simultánea y posteriormente las ecuaciones de turbulencia y resto de ecuaciones escalares.

2.5 Simulación medio poroso ANSYS Fluent

El enfoque de la simulación se basará en el comportamiento del vapor al ser inyectado en el terreno por tal razón se realizará un modelado computacional en medios porosos con ANSYS CFD.

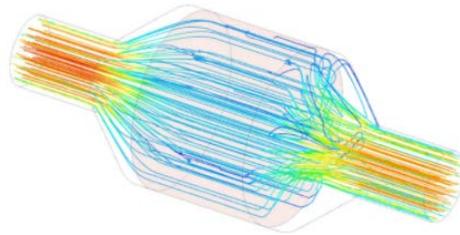


Figura 15 - Simulación en medio poroso (ESSS).

Para lograr visualizar de manera aproximada el comportamiento del vapor en la tierra por medio de una simulación el software requiere datos específicos del terreno a analizar, para ello se realizarán varios experimentos con muestras de tierra proporcionadas por flexport para así obtener una gráfica de presión vs caudal que nos permita mediante una regresión cuadrática determinar los valores que definen un medio poroso en el software las cuales son la pérdida viscosa y la pérdida inercial.

2.5.1 Ecuaciones de cantidad de movimiento para medios porosos.

Los medios porosos se modelan mediante la adición de una fuente de impulso término a las ecuaciones estándar de impulso que rigen. La fuente término se compone de dos partes: un término de pérdida viscosa (Darcy, un primer término en el lado derecho de la siguiente ecuación), y un término inercial de pérdida (el segundo término en el lado derecho de la misma ecuación). Este sumidero de impulso contribuye a un gradiente de presión en el medio poroso, creando una caída de presión a través de él. Para el caso de medios porosos homogéneos simples, se tiene la siguiente ecuación.

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} V_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |V| V_i\right)$$

Ecuación 14 - Ecuación de movimiento para medio poroso.

En la ecuación anterior, Si es el término fuente para el i-ésimo (x, y, o z) ecuación de momento, V es la velocidad (superficial), Vi es la i-ésima (x, y, o z) componente de la velocidad (superficial), α es la permeabilidad y C2 es el factor de resistencia de inercia del medio poroso ((NIELD & BEJAN, 2006).

2.5.2 Definición de viscoso e inercial

Coeficientes de resistencia de un medio poroso

Los coeficientes de resistencia viscosa e inercial de un medio poroso deben definirse a lo largo de la dirección de cada uno de sus ejes principales.

Basado en un sistema de coordenadas cartesiano, el usuario necesita definir un vector de dirección para problemas 2D y dos vectores de direcciones perpendiculares para problemas 3D. En 2D dominios de flujo de fluido, la segunda dirección, que no es explícitamente definida, es normal al plano definido por el vector de dirección especificado y el vector de dirección z. En Dominios de flujo de fluido 3D, la tercera dirección es normal al plano definido por los dos vectores de dirección especificados.

Coeficientes de resistencia de un medio poroso

Después de definir los ejes principales del medio poroso, el usuario necesita especificar la resistencia viscosa coeficiente $1/\alpha$ y coeficiente de resistencia inercial $C2$ en cada dirección.

Cuando utilice el modelo de medio poroso, debe mantener en cuenta que las celdas porosas en el solucionador de CFD son 100% abierto, y que los valores que especifique para $1/\alpha$ y $C2$ debe basarse en esta suposición y el uso de la velocidad superficial a través de la región porosa.

2.5.3 Relación entre velocidad superficial y velocidades físicas

La mayoría de los solucionadores de CFD calculan por defecto la velocidad superficial basándose en el caudal volumétrico global. La relación entre las velocidades superficiales y físicas (o verdaderas) es la siguiente, donde γ es la porosidad o fracción de volumen del fluido dentro de la región porosa.

$$V_{superficial} = \gamma V_{física}$$

Ecuación 15 - Relación velocidad superficial y física

Los valores de velocidad superficial dentro de la región porosa siguen siendo los mismos que los que están fuera de la región porosa. Esto limita la precisión del modelo poroso donde debería haber un aumento en la velocidad en toda la región porosa. Para simulaciones más precisas de Flujos de medios porosos, se puede resolver la velocidad real o física en todo el campo de flujo, en lugar de la velocidad superficial.

2.5.4 Derivación de los coeficientes porosos basados en presión experimental y datos de velocidad.

Aplicar una caída de presión a través de un medio poroso de espesor, Δn , el coeficiente del medio poroso se puede determinar de la siguiente manera.

Supongamos que se tienen los siguientes datos experimentales para las variaciones de caída de presión Vs velocidad superficial.

Velocidad (m/s)	Caída de presión (Pa)
20	78
50	478
80	1432
110	2964

Tabla 4 - Datos ejemplo de velocidad y caída de presión.

Trazando la variación de Δp vs velocidad superficial v , se puede crear la línea de tendencia a través del método experimental puntos que conducen a la siguiente ecuación

$$\Delta p = 0,2728v^2 - 4,7189v$$

Tenga en cuenta que una versión simplificada de la ecuación de la cantidad de movimiento, relacionar la caída de presión con el término fuente, puede ser expresado como:

$$\Delta p = -S_i \Delta n$$

Una comparación de la ecuación de la línea de tendencia experimental con la ecuación que expresa la variación de S_i con el coeficiente de medios porosos producen lo siguiente

$$0,2728 = C_2 \frac{1}{2} \rho \Delta n$$

$$4,7189 = \frac{\mu}{\alpha} \Delta n$$

Suponiendo una densidad de fluido de $\rho = 1,225 \text{ kg / m}^3$, un espesor del medio de $\Delta n = 1 \text{ m}$, y viscosidad de $\mu = 1,7894 * 10^{-5} \text{ kg/ms}$, obtenemos los siguientes coeficientes de medios porosos.

$$C_2 = 0,44539$$

$$\frac{1}{\alpha} = 263714,1$$

Capítulo 3

3. Metodología

Por medio de la figura 16, se mostrará el proceso necesario que se llevó a cabo para el diagnóstico, diseño, simulación y análisis financiero del sistema de desinfección de suelos que se presentará como alternativa para reemplazar el sistema actualmente usado por la empresa Flexport.

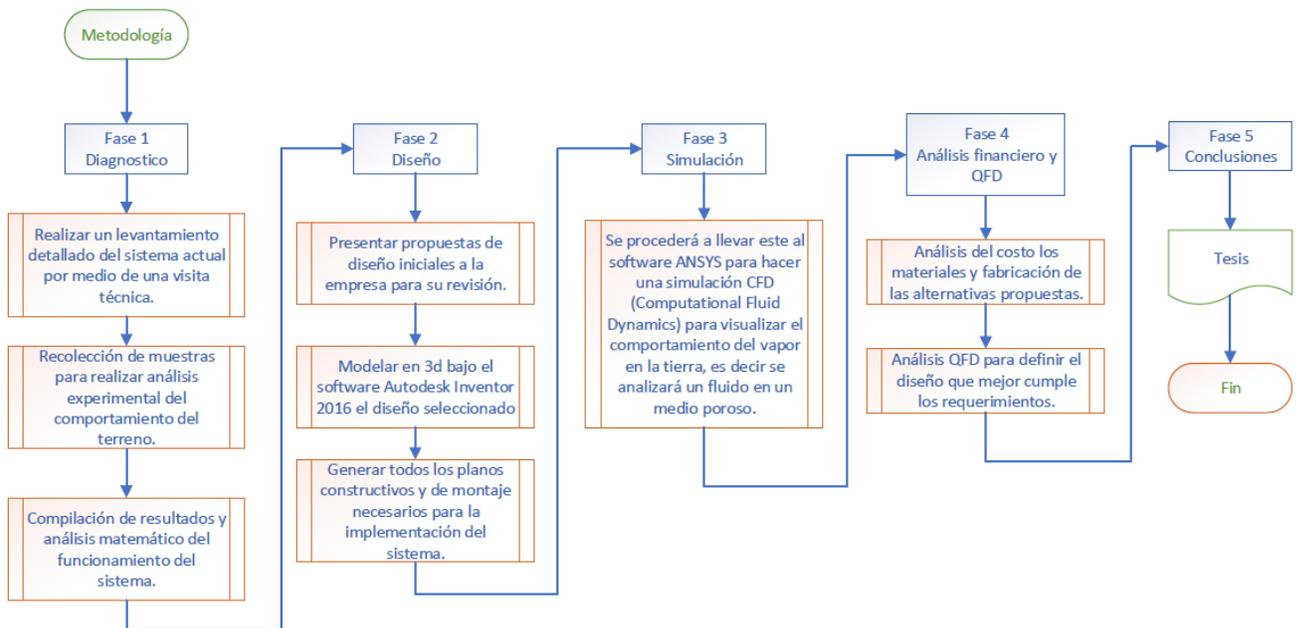


Figura 16 - Flujograma metodología desarrollo de proyecto.

3.1 Diagnostico montaje actual

ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
1	CAPACIDAD DE LA CALDERA	80 BHP
2	PRESIÓN DE ENTRADA AL SISTEMA	65 PSI
3	TEMPERATURA SALIDA DE LA CALDERA	138°C
4	TEMPERATURA PUNTO DE CONEXIÓN RASTRILLOS	92°C
5	TEMPERATURA PROMEDIO EN EL TERRENO	90°C

Tabla 5 - Datos de entrada suministrados por Flexport.

3.1.1 Características principales

A través de los años Flexport ha desarrollado un sistema de limpieza de suelos por medio de inyección de vapor de forma efectiva logrando los resultados esperados, el sistema actual consta de una caldera con una capacidad de entre 80 bhp a 138°C y una presión de salida de 60 psi, este es transportado por medio de mangueras desde la caldera hasta llegar al ramal principal de tuberías que se posicionan a lo largo de la cama de tierra de 60 cm de ancho x 30 m de largo.



Figura 17 - Caldera Flexport (Autor)



Figura 18 - Montaje de rastrillos de tuberías perforadas enterradas actualmente en Flexport (Autor).

La figura 18 muestra el montaje actual del rastrillo por donde se inyecta vapor al terreno, para este montaje los trabajadores deben cavar zanjas de 30 cm de ancho x 50 cm de profundidad y una longitud de 30 metros, posteriormente se instalan los rastrillos y se llena la zanja con la tierra que se desea desinfectar, este proceso además de llevar bastante tiempo genera un desgaste significativo en los trabajadores de Flexport.



Figura 19 - Entrada principal de vapor desde la caldera por medio de mangueras de Ø2 in (Autor).

3.2 Condiciones Iniciales del vapor

Flexport usa una caldera (Piro-tubular/Acuotubular) de 80 bhp (bhp: caballos de vapor) usualmente las calderas trabajan con una eficiencia del 90%. Para hallar el valor nominal de la cantidad de vapor generado por esta caldera aplicamos la definición de BHP, en donde 1 BHP = 34,5 Lb/hr. de agua evaporada a 212°F o 100°C (Ver Anexo A – Tablas de vapor)

$$Q_m = (80 * 0,9) * 34,5 = 2484 \text{ Lb/hr}$$

$$Q_m = 2484 \frac{\text{Lb}}{\text{hr}} * 0,454 \text{kg} = 1127,7 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

Ecuación 16 - Flujo másico generado por la caldera.

Posteriormente se debe calcular el caudal que sale de la caldera para ello se deben hallar las propiedades del vapor dependiendo de la presión y temperatura a la salida de la caldera, ya que flexport cuenta con sus indicadores de presión y temperatura se trabajara con datos reales del vapor.

$$P_m = 65 \text{ Psi} = 448,16 \text{ kPa} = 4,4816 \text{ bar}$$

Las propiedades del vapor ya se encuentran en tablas o en calculadoras y se pueden hallar fácilmente, las propiedades que se requieren serán verificadas por medio de las tablas termodinámicas del libro de (CENGEL, 2012).

TABLA A-5

Agua saturada. Tabla de presiones

Pres., P kPa	Temp. sat., T _{sat} °C	Volumen específico, m ³ /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Líqu. sat., v _f	Vapor sat., v _g	Líqu. sat., u _f	Evap., u _{fg}	Vapor sat., u _g	Líqu. sat., h _f	Evap., h _{fg}	Vapor sat., h _g	Líqu. sat., s _f	Evap., s _{fg}	Vapor sat., s _g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322
700	164.95	0.001108	0.27278	696.23	1875.6	2571.8	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071
750	167.75	0.001111	0.25552	708.40	1865.6	2574.0	709.24	2056.4	2765.7	2.0195	4.6642	6.6837

Tabla 6 - Apéndice A – Tabla A5 – Libro termodinámica (CENGEL, 2012)

Debido a que el valor de presión 448,16 kPa no se encuentra tabulado, se debe hacer una interpolación lineal para encontrar los valores deseados.

$$y = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} * (x - x_0)$$

Ecuación 17 - Interpolación lineal

$$T_{sat} = 143,61 + \frac{147,90 - 143,61}{450 - 400} * (448,16 - 400)$$

$$T_{sat} = 147,742 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura de Saturación}$$

$$V_{ps} = 0,46242 + \frac{0,41392 - 0,46242}{450 - 400} * (448,16 - 400)$$

$$V_{ps} = 0,416 \frac{m^3}{kg} \quad \text{Volumen específico vapor saturado}$$

Se procede a calcular el caudal de vapor que sale de la caldera esto se realiza por medio de la siguiente ecuación.

$$Q_s = W_s * v_g$$

$$Q_{Vs} = 1127,7 \frac{kg}{hr} * 0,416 \frac{m^3}{kg}$$

$$Q_{Vs} = 469,12 \frac{m^3}{hr}$$

Ecuación 18 - Flujo volumétrico generado por la caldera

A partir del volumen específico se puede calcular la densidad del vapor ya que este se define como volumen por unidad de masa y, por tanto, es la inversa de la densidad.

$$V_{ps} = \frac{1}{\rho}$$

$$\rho = \frac{1}{V_{ps}}$$

$$\rho_s = \frac{1}{0,416 \frac{m^3}{kg}} = 2,404 \frac{kg}{m^3}$$

Ecuación 19 - Densidad del vapor

Al obtener la densidad podemos calcular el peso específico con la siguiente ecuación.

$$\gamma_s = \rho_s * g$$

Ecuación 20 - Peso específico del vapor

Donde g es la gravedad (9.81 m/s²)

$$\gamma_s = 2,404 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$\gamma_s = 23,58 \frac{N}{m^3}$$

Calculadora: Tabla de Vapor Saturado por Presión

The screenshot shows the 'Calculadora: Tabla de Vapor Saturado por Presión' interface. At the top, there is a header for 'TLV ToolBox - Para iOS y Android'. Below this, the 'Introducir Datos' section contains a 'Presión de Vapor' input field with the value '65', a 'Unidades' dropdown menu set to 'SI(bar)', and another dropdown menu set to 'psi abs'. A 'Mostrar Opciones Avanzadas' link is visible below the input fields. There are two buttons: 'Calcular' and 'Limpiar'. The 'Resultados' section is highlighted in green and contains a table of properties with their values and unit dropdown menus.

Resultados		
Temperatura del Vapor Saturado	147.758	°C
Calor Latente del Vapor	2120.63	kJ/kg
Entalpía Específica del Vapor Saturado	2743.2	kJ/kg
Entalpía Específica del Agua Saturada	622.578	kJ/kg
Volumen Específico del Vapor Saturado	0.415487	m³/kg
Volumen Específico del Agua Saturada	0.00108803	m³/kg

Figura 20 - Calculadora de vapor (Fuente, TLV)

Para verificar los datos obtenidos, realizamos el cálculo de las propiedades del vapor a 65 psi mediante la calculadora online de una empresa llamada TVL especialistas en vapor, los valores obtenidos son muy similares, ya que la variación de la temperatura de saturación es de solo 0.016°C y el valor del volumen específico es el mismo en ambos métodos, dicho esto los datos que se introducirán en la simulación son los valores que se calcularon mediante las tablas termodinámicas (Ver tabla 6).

3.3 Experimento Caracterización del terreno

3.3.1 Base teórica

La simulación por métodos numéricos del flujo a través de un medio poroso depende de dos coeficientes: El coeficiente de resistencia viscosa ($1/\alpha$) y el coeficiente de resistencia inercial (C_2). Estos dos parámetros caracterizan la ecuación de momento S como sigue:

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} V_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |V| V_i\right)$$

Ecuación 21 - Ecuación de momento

Donde el subíndice i relaciona la componente por cada dirección. Los términos de la ecuación son determinados a partir de las propiedades del fluido excepto por los dos coeficientes mencionados anteriormente. El valor de estos coeficientes depende del medio poroso específico que se requiere simular de modo que para este caso es necesario extraerlos de forma experimental.

El medio poroso se comportará como un elemento filtrante que genera una caída de presión en función de la velocidad, de este modo la esencia del experimento radica en caracterizar el comportamiento de una muestra de tierra relacionando presión y velocidad.

Para el experimento, el fluido de prueba va a ser el agua a temperatura ambiente, esto debido a que se cuenta con este recurso y es más sencillo de transportar que si se usara el aire.

3.3.2 Diseño del experimento fase 1

Para el montaje inicial de la caracterización del terreno se planteó como primera alternativa un experimento simple el cual consiste en un tubo de acrílico de diámetro 100 milímetros como se muestra en la figura 21, donde se tendrá una columna de agua con una cabeza de presión constante máxima de 67 cm y en la parte inferior un taco del terreno suministrado por flexport de diferentes espesores, este funcionará como un sistema de filtración, esto con la idea de conocer la velocidad y presión que se tienen después del filtro ya que se visualiza una disminución del volumen que logra atravesar el taco de tierra en un determinado tiempo.

El montaje anterior mostró falencias a la hora del llenado y a la hora de garantizar una cabeza de presión constante, ya que se debía alimentar el sistema de forma manual, debido a esto el caos generado las mediciones tomadas tenían resultados diferentes cada vez que

se realizaba el experimento bajo las mismas condiciones de operación, por tal razón se optó por un experimento más tecnificado descrito en la fase 2, sección 3.3.3.



Figura 21 - Montaje experimento fase 1



Figura 22 - Montaje experimento fase 1 (Autor)



Figura 23 - Montaje experimento fase 1 (Autor)

3.3.3 Diseño del experimento fase 2

Como se mencionó anteriormente se necesita un montaje más tecnificado que permita tener datos más confiables ya que se busca encontrar la relación entre presión y velocidad de un fluido a través del medio poroso que permita posteriormente calcular los coeficientes de resistencia viscosa resistencia inercial. Para lograrlo se requiere por ende de un sensor de flujo y un sensor de presión. Adicionalmente se requiere de una fuente que suministre energía al fluido y que sea regulable de tal modo que se puedan obtener valores de los sensores en un rango de operación.

Se determinó que el montaje iba a consistir de una bomba de agua conectada mediante tubería de PVC a una cámara que contiene la muestra de tierra, aguas abajo de la bomba se instalará una válvula para control del caudal entregado por la bomba, aguas abajo de la válvula se instalará el sensor de flujo y posteriormente el sensor de presión.

Adicionalmente en el punto alto del montaje se incluiría un sistema de venteo para purgar el aire en el circuito.

La señal de ambos sensores sería llevada a una tarjeta de adquisición de datos conectada a un computador de tal forma que se puedan obtener valores de caudal y presión de forma continua. Durante la adquisición de datos se variaría el porcentaje de apertura de la válvula para caracterizar la muestra de tierra a diferentes velocidades del fluido. La figura 24 ilustra el concepto del experimento.

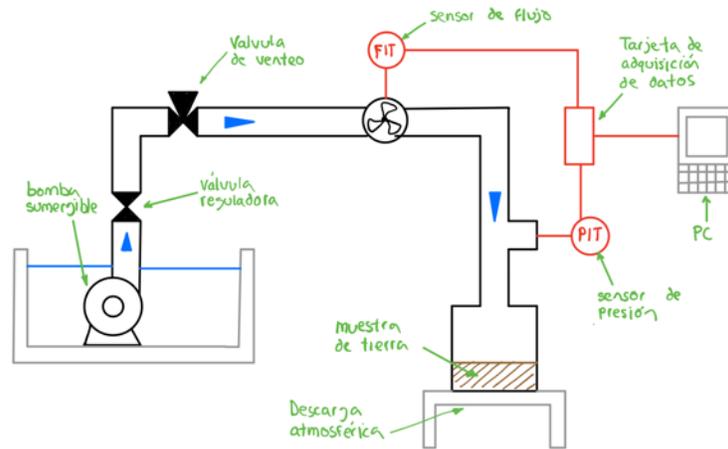


Figura 24 - Esquema conceptual del experimento (Autor)

3.3.4 Selección de sensores y equipos

Sensor de presión

El sensor de presión elegido fue el MPS20N0040D-S, por su rango de operación bajo, de 0 a 5.8 psi, compatibilidad de voltaje de alimentación con la tarjeta de adquisición de datos y por su bajo costo. Este sensor incluye alta precisión y su conexión se realiza mediante una manguera de 1/8". La señal de salida es un voltaje linealmente proporcional a la presión aplicada; requiere sin embargo de un amplificador de señal independiente. Se realizó un circuito con un amplificador LM324N en configuración no inversor con ganancia de 50.



Figura 25 - Sensor de presión MPS20N0040D-S (<https://e-radionica.com/>)

Sensor de flujo

Para la medición de flujo, que por medio de procesamiento de datos se traduce a velocidad superficial requerida por la ecuación de momento, se realizó por medio del sensor YF-S201. Este sensor funciona mediante un rotor de paletas que relaciona la velocidad de giro con el caudal del fluido. Como señal de salida el sensor arroja pulsos de voltaje a una frecuencia proporcional al caudal. El rango de operación es de 1 a 30 l/min, por lo que es adecuado para la aplicación. Su precisión sin embargo no es tan alta, con incertidumbre en la medición de caudal del $\pm 5\%$. Por su mecanismo de operación, el sensor debe instalarse directamente sobre la línea de flujo. Aunque el fabricante indica una ecuación que relaciona la frecuencia con el caudal, recomienda que el sensor sea calibrado sobre el montaje ya que su orientación puede incidir en el comportamiento, al igual que el fluido de operación.



Figura 26 - Sensor de flujo YF-S201 (<http://www.fssdyifa.com.cn/>)

Tarjeta de adquisición de datos

Se optó por incorporar una tarjeta Arduino ya que al ser de código abierto lo hace económico y versátil. El modelo de tarjeta elegido fue el Nano V3.0. Este modelo cuenta con procesador de 16 MHz, pines de suministro de voltaje de 5V, compatibles con la alimentación requerida para los sensores y pines para entrada de señales análogas de 10 bits con rango de hasta 5V, lo cual permite una resolución de hasta 1023 valores para la señal del sensor de presión. Adicionalmente cuenta con 2 pines de interrupción, ideales para captar la señal del sensor de flujo por frecuencia de pulsos.

La tarjeta permite programarse mediante lenguaje C. De este modo fue posible escribir un programa específico para la calibración de cada sensor y adicionalmente un programa para operar el experimento y captar datos.

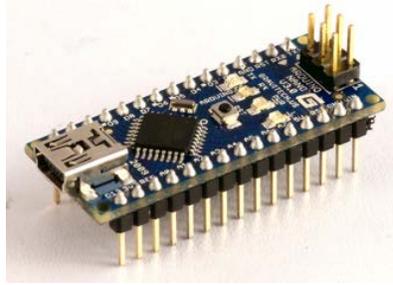


Figura 27 - Tarjeta de adquisición Arduino nanoV3.0 (<https://www.rs-components.com/arduino>)

Bomba de agua

La bomba empleada para el sistema fue una bomba sumergible HY-4501 con cabeza máxima de 3m (4.26 psi) y caudal máximo de 3000 l/hr. La conexión de la bomba es para tubería de ½". Debido a que el sensor de flujo tiene la misma conexión, todo el circuito se dimensionó con este mismo diámetro.



Figura 28 - Bomba sumergible HY-4501 (Autor)

3.3.5 Montaje definitivo

La siguiente imagen representa un esquema del montaje empleado con dimensiones y los equipos y sensores indicados anteriormente:

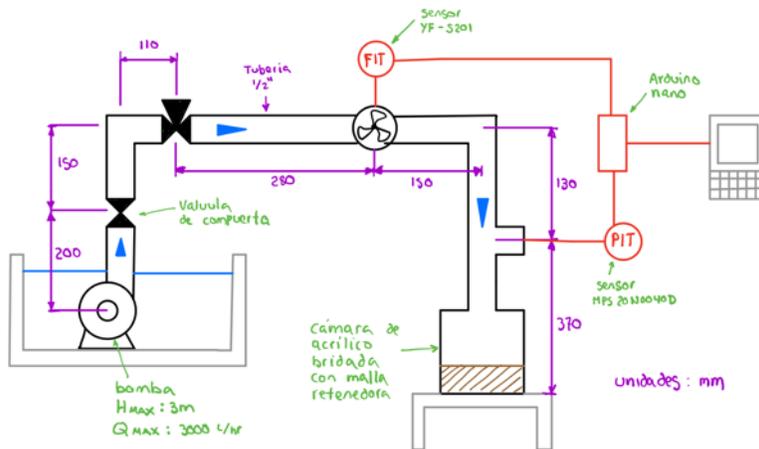


Figura 29 - Diagrama Montaje definitivo (Autor)



Figura 30 - Foto Montaje operativo (Autor)

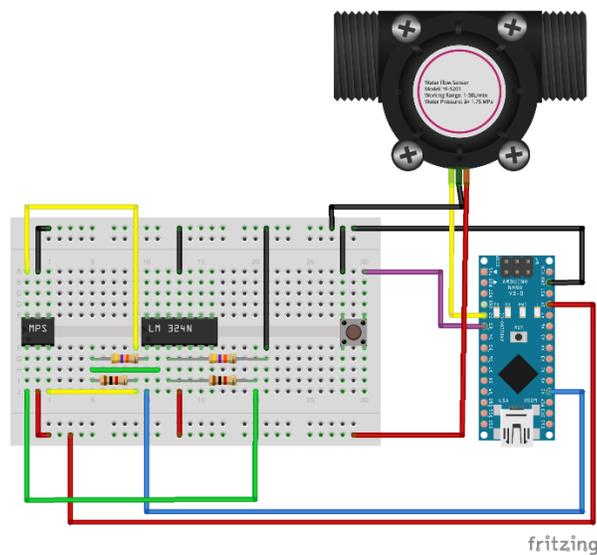


Figura 31 - Esquema del circuito

3.3.6 Calibración de sensores

Sensor de presión

El sensor de presión fue calibrado por medio de una columna de agua empleando una manguera de nivel. Para diferentes alturas se tomaron diferentes datos tanto en sentido ascendente como descendente para verificar el comportamiento por histéresis del transductor.

La calibración se realizó con 2 valores ascendentes y dos valores descendentes para determinar la incertidumbre sistemática y aleatoria.

La incertidumbre sistemática se calculó mediante la propagación de error de la ecuación que gobierna la presión estática de una columna de agua como sigue:

$$P(\rho, g, h) = \rho gh$$

Ecuación 22 - Ecuación de cabeza hidrostática (MOTT, 2006)

$$B_x(P) = \sqrt{\left(\Delta\rho \cdot \frac{\partial P}{\partial \rho}\right)^2 + \left(\Delta g \cdot \frac{\partial P}{\partial g}\right)^2 + \left(\Delta h \cdot \frac{\partial P}{\partial h}\right)^2}$$

Ecuación 23 - Ecuación propagación de incertidumbre

Donde $\Delta\rho$, Δg y Δh son las incertidumbres de la densidad, gravedad y cabeza de la columna respectivamente y con valores establecidos en 3 kg/m³, 0.01 m/s² y 0.03m respectivamente. En cuanto a la incertidumbre en el voltaje, se toma el valor indicado en la hoja de datos de 0.3% sobre la lectura.

La incertidumbre aleatoria se calcula bajo la suposición de que la distribución de probabilidad t es válida para muestreos pequeños. Para los valores de presión se estableció como criterio un intervalo de confianza del 90%, de modo que esta incertidumbre se calcula como sigue:

$$P_x(P) = \frac{t_{0.05} \cdot S_x}{n^{1/2}}$$

Ecuación 24 - Ecuación de incertidumbre aleatoria (BECKWITH, MARANGONI, & LIENHARD, 1993)

Donde S_x es desviación estándar de la muestra $t_{0.05}$ es el valor de la distribución para cada extremo representando la mitad del intervalo de confianza y n es el número de muestras.

La incertidumbre total se calculó como sigue:

$$U_x(P) = \sqrt{B_x(P)^2 + P_x(P)^2}$$

Ecuación 25 - Incertidumbre total

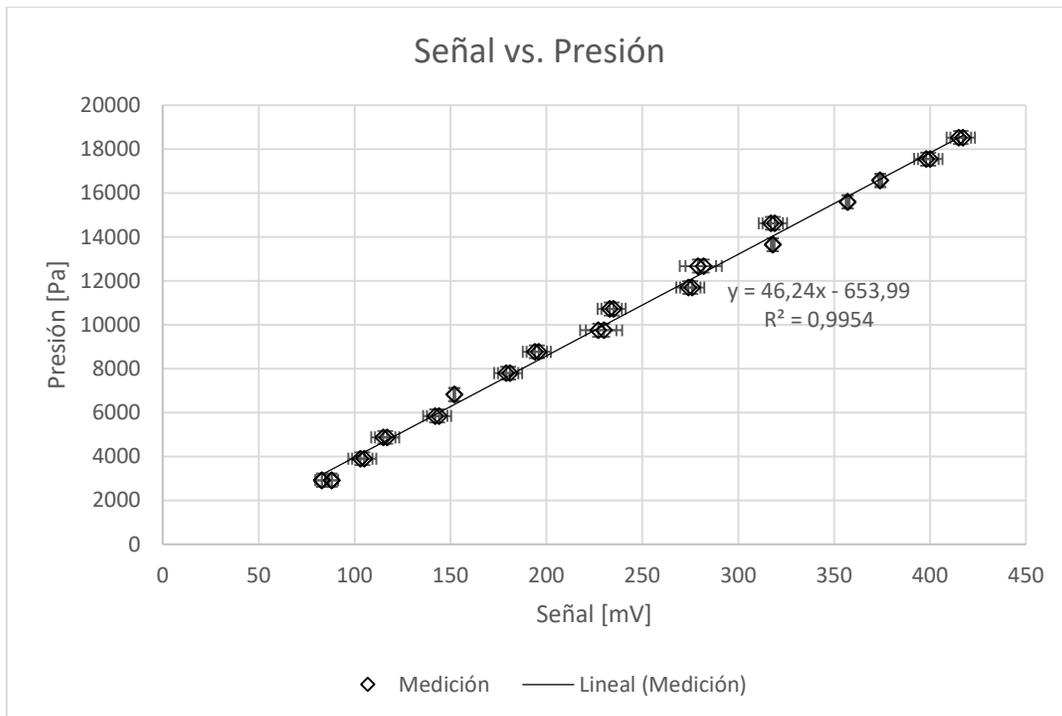


Figura 32 - Calibración del sensor de presión

3.3.7 Sensor de flujo

Similar al caso del sensor de presión, se recurrió a una ecuación que gobierna el caudal de un fluido como la tasa de volumen desplazado en el tiempo. De este modo el sensor fue calibrado captando las frecuencias arrojadas por el mismo y cronometrando el tiempo requerido para llenar un volumen específico. La ecuación de flujo es como sigue:

$$F(V_i, V_f, t) = \frac{V_f - V_i}{t}$$

Ecuación 26 - Ecuación de flujo

$$B_x(F) = \sqrt{\left(\Delta V_i \cdot \frac{\partial F}{\partial V_i}\right)^2 + \left(\Delta V_f \cdot \frac{\partial F}{\partial V_f}\right)^2 + \left(\Delta t \cdot \frac{\partial F}{\partial t}\right)^2}$$

Ecuación 27 - Ecuación propagación de incertidumbre

Donde ΔV_i , ΔV_f y Δt son las incertidumbres del volumen inicial, volumen final y tiempo respectivamente y con valores establecidos en 0.1 s, 0.05 s y 2 s respectivamente. En cuanto a la incertidumbre en la frecuencia, se toma el valor indicado en la hoja de datos de 5% sobre la lectura.

En la calibración del sensor de flujo no se aplicó incertidumbre aleatoria ya que todos los valores medidos corresponden a frecuencias diferentes. De esta forma la incertidumbre total se tomó como $B_x(F)$.

Se comparó también la curva de calibración teórica de fábrica y se notó que se obtuvo un resultado similar en la pendiente, no obstante, por la recomendación del fabricante se empleó la curva obtenida en la calibración.

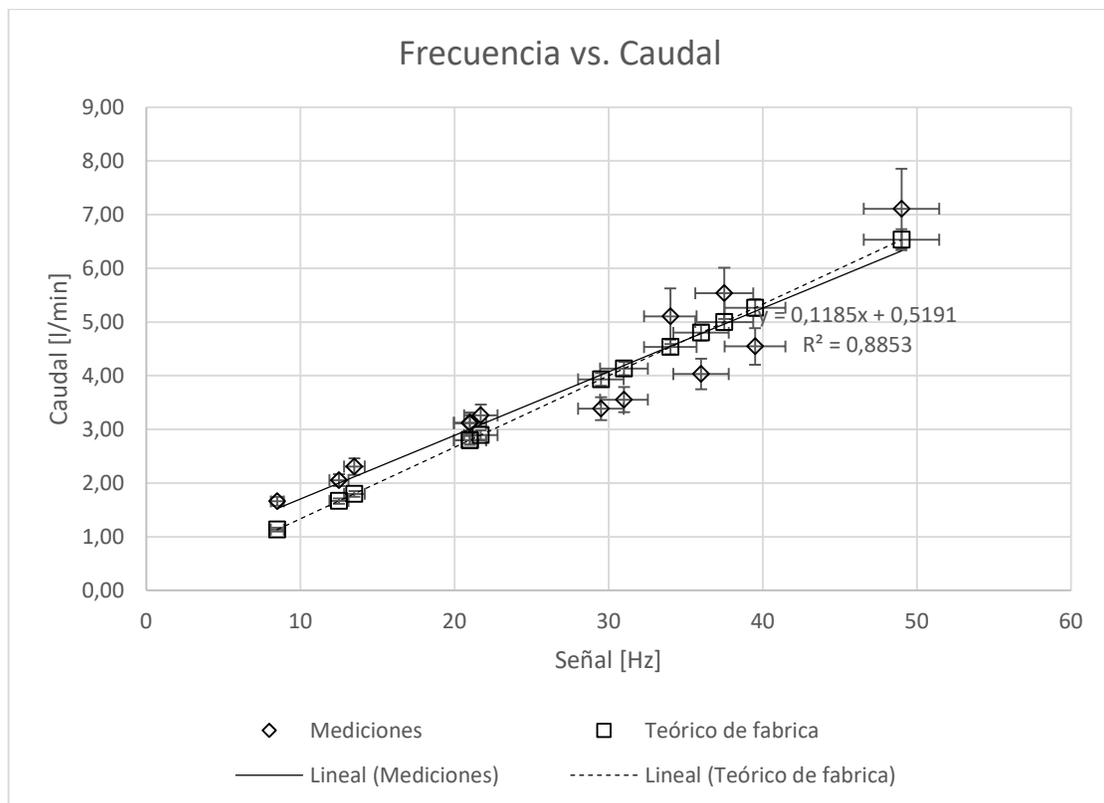


Figura 33 - Calibración del sensor de flujo

3.3.8 Resultados

El experimento se repitió varias veces para calcular una incertidumbre aleatoria mediante la distribución de probabilidad t. Adicionalmente se realizaron pruebas con dos espesores de muestra diferentes de 5cm y 2cm.

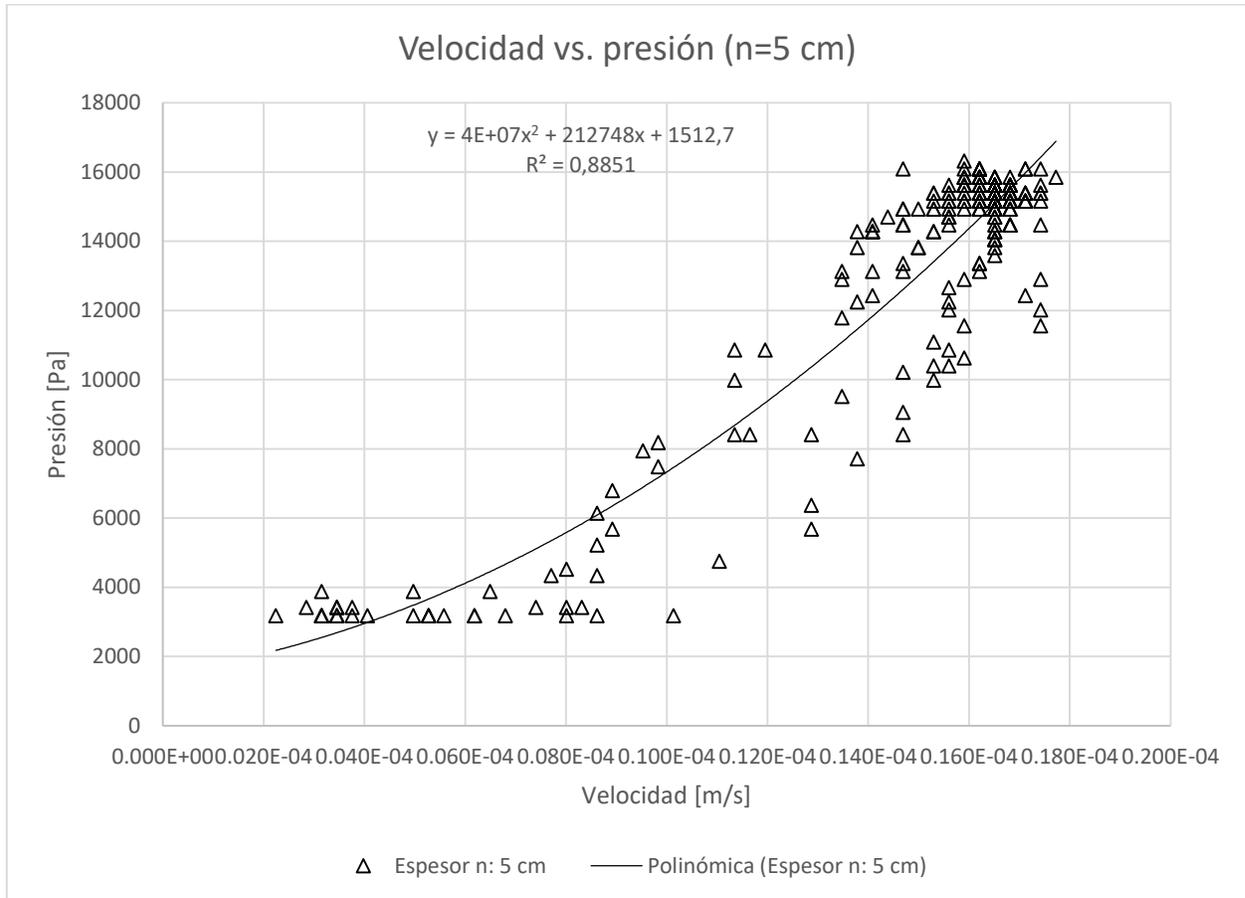


Figura 34 - Relación de velocidad y presión con espesor de tierra de 5 cm

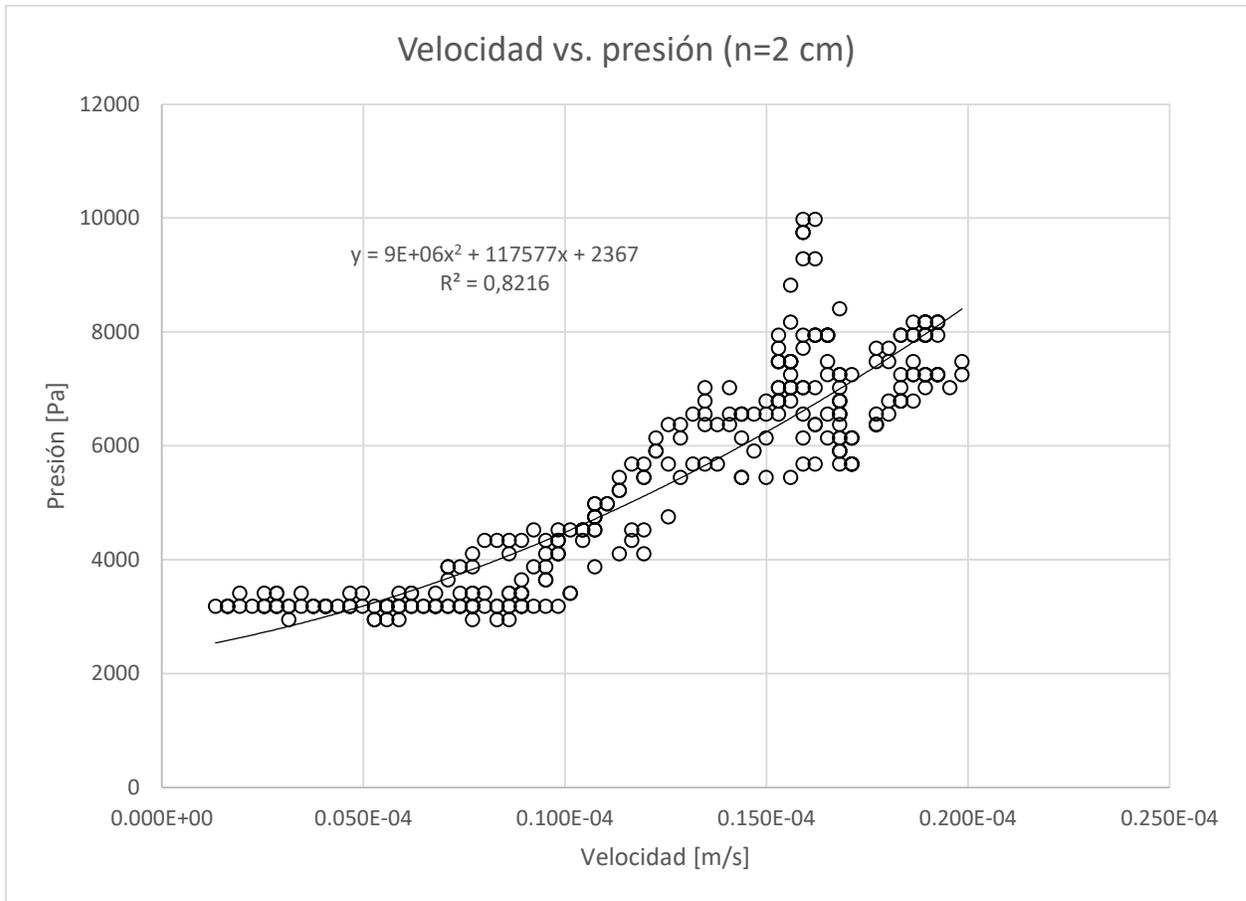


Figura 35 - Relación de velocidad y presión con espesor de tierra de 2 cm

De las curvas anteriormente indicadas fue posible obtener una regresión polinómica de segundo orden que permite igualar sus coeficientes a los parámetros de la ecuación de momento y así calcular los coeficientes de resistencia viscosa y de resistencia inercial como sigue:

$$P(V) = AV^2 + BV$$

$$A = C_2 \frac{1}{2} \rho \Delta n$$

$$B = \frac{\mu}{\alpha} \Delta n$$

Los resultados para los dos juegos de experimentos con los dos espesores diferentes se encuentran a continuación:

Set	Coeficiente		n	μ [kg/m-s]	ρ [kg/m ³]	$1/\alpha$ [1/m ²]	C2 [1/m]
	A [kg/m ³]	B [kg/m ² -s]					
1	4,00E+07	212748	0,05	1,00E-03	998	4,24E+09	1603206,41
2	9,00E+06	117577	0,02	1,00E-03	998	5,86E+09	901803,607

Tabla 7 - Coeficientes resistencia viscosa y resistencia inercial.

La tabla número 7 muestra los datos de los coeficientes de resistencia viscosa y resistencia inercial para dos espesores de tierra diferentes un taco de 5 cm y otro de 2 cm, podemos observar la diferencia entre los valores $1/\alpha$ y C2 para ambos casos, estos se debe a que el taco de tierra de 2 cm no presentaba una oposición significativa al paso del agua a través del medio poroso, por el contrario después de probar con varios espesores de tierra se visualizó que el mejor comportamiento para la toma de datos se presentaba en el espesor de 5 cm por tal razón dichos coeficientes serán usados para la simulación más adelante desarrollada en el capítulo 5.

Capítulo 4

4. Diseño

4.1 Objeto

El objeto del diseño es presentar la alternativa más adecuada para dar solución a las deficiencias que posee el sistema de rastrillos para la desinfección de suelos utilizado por FLEXPOR actualmente como durabilidad en materiales, peso del sistema y obstrucción a la salida del vapor mencionados anteriormente, para ello se plantearon 3 posibles diseños y estos fueron desarrollados bajo el software Autodesk Inventor que es un programa especializado en la generación de modelos 3d, ensambles, planos y simulaciones de forma paramétrica que permiten garantizar que los diseños sean lo más precisos posibles a la hora de su fabricación e instalación.

4.2 Criterios de diseño

- Materiales resistentes a la corrosión.
- Que los rastrillos sean de un peso menor de 35 kg.
- Garantizar el paso libre de vapor hacia el terreno.
- Mantener los mismos puntos de inyección de vapor actual ya que FLEXPOR cuenta con un proceso estandarizado de desinfección.

4.3 Alternativa 1

Se generó un modelo similar de rastrillo al actual utilizado por flexport en donde se modificaron los materiales de acero al carbón por un polímero conocido como polietereetercetona o (PEEK) este material es un termoplástico de alta resistencia a capaz de soportar temperaturas de hasta 260°C y ya que es un polímero cuenta con una resistencia a la corrosión elevada además ya que este cuenta con una densidad de 1,31 g/cm³ el peso de los rastrillos disminuirá un 58% respecto del sistema actual.

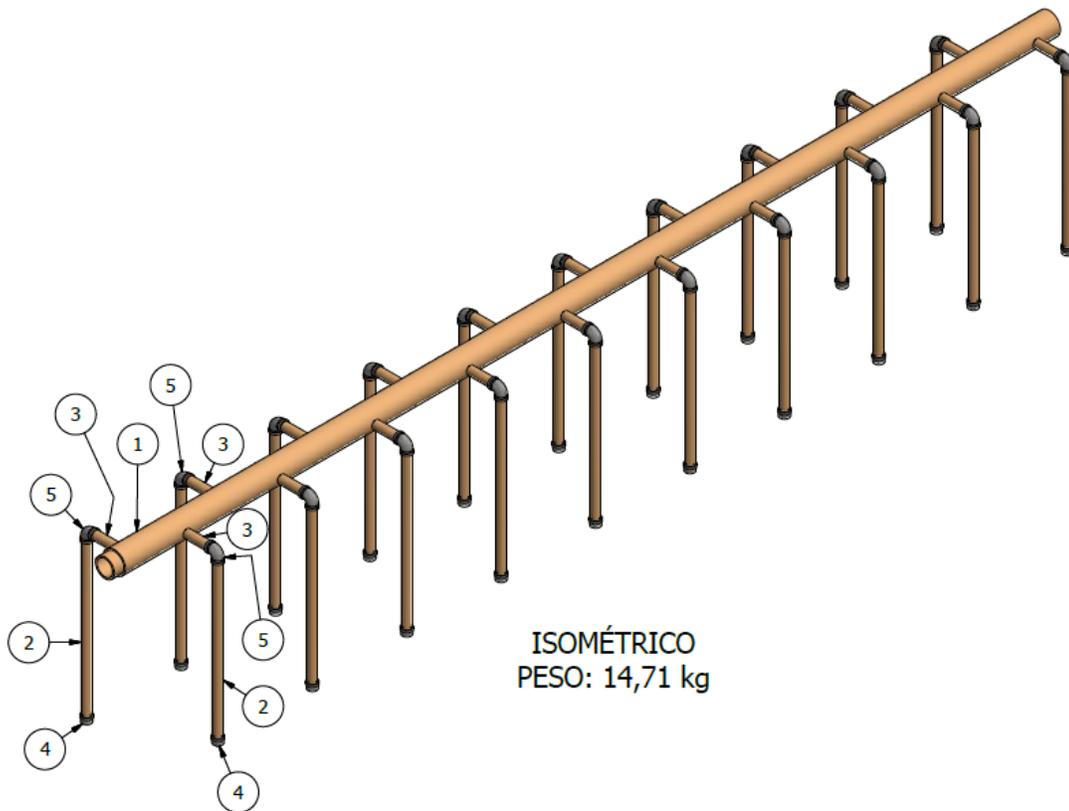


Figura 36 - Isométrico diseño alternativa 1

LISTA DE MATERIALES						
ÍTEM	CANT	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	L(mm)	P/U(Kg)	P/ST(Kg)
1	1	TUBERÍA EXT Ø70 mm - INT Ø50 mm	Tecapeek	3000	7,67	7,67
2	20	TUBERÍA EXT Ø25 mm - INT Ø18 mm	Tecapeek	500	0,16	3,20
3	20	TUBERÍA EXT Ø25 mm - INT Ø18 mm	Tecapeek	90	0,03	0,52
4	20	TAPON Ø1/2" NPT	Inox		0,06	1,20
5	20	CODO Ø1/2" NPT	Inox		0,11	2,13

Figura 37 - Listado de materiales alternativa 1

El diseño consiste en un colector principal fabricado en tubo de (PEEK) de diámetro interno de 50 mm y externo de 70 mm con longitud de 3 metros y derivaciones en tubería de (PEEK) de diámetro interno de 18 mm y externo de 25 mm ya que las presentaciones de este polímero solo están disponibles en placas, barras redondas y tuberías y el fabricante no cuenta con accesorios como codos, tees, tapas las tuberías deben mecanizarse y conectarse por medio de accesorios roscados npt en acero inoxidable.

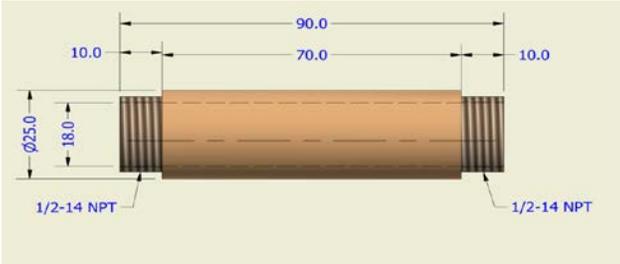


Figura 38 - Detalle mecanizado tubería PEEK

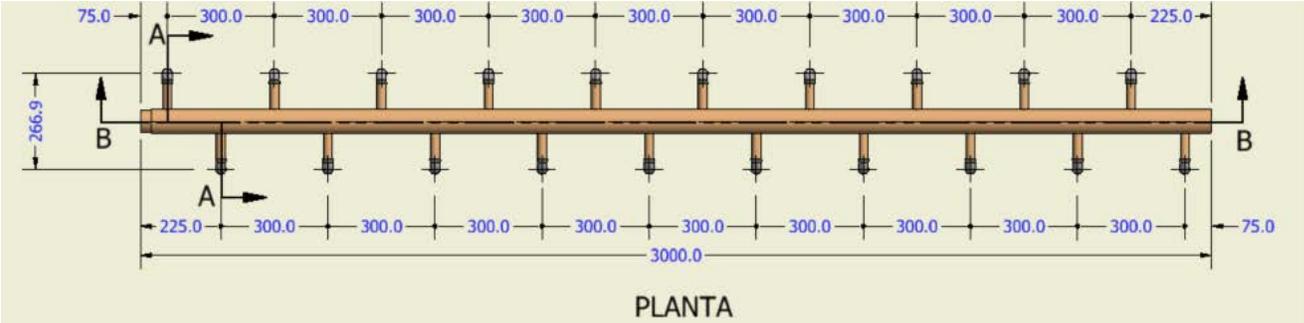


Figura 39 - Vista planta rastrillo en tubería PEEK.

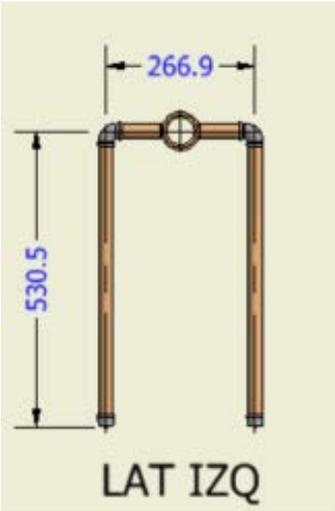


Figura 40 - Vista frontal rastrillo tubería PEEK.

4.4 Alternativa 2

La siguiente propuesta consiste en dos rastrillos laterales que se insertan de forma diagonal en el terreno, los rastrillos cuentan con un colector principal en tubería de acero al carbón galvanizado de diámetro 1-1/2" SCH 40 y derivaciones en tubería de diámetro 1/2" SCH 40, la salida de los inyectores se encuentra en la misma posición del sistema garantizando que no se altere la desinfección que FLEXPOR ha estandarizado las derivaciones van a contar con una camisa protectora en polímero (PEEK) que permite proteger la corrosión del inyector y además es retráctil para impedir la obstrucción de las boquillas de salida de vapor.

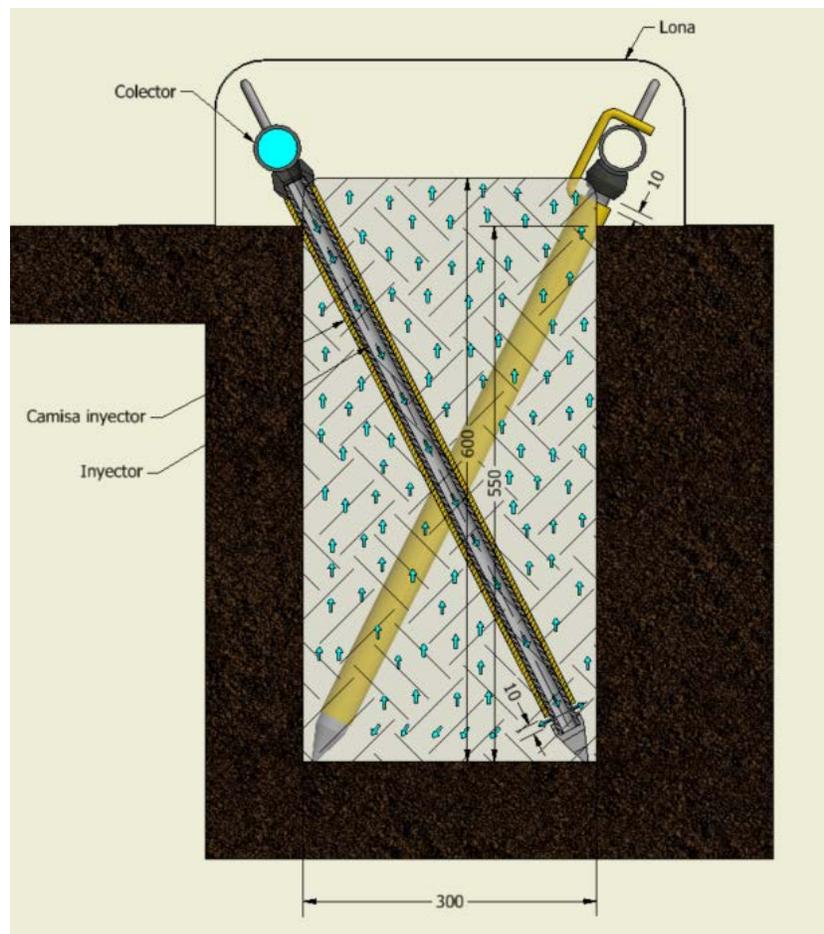


Figura 41 - Vista en sección inyectores alternativa 2

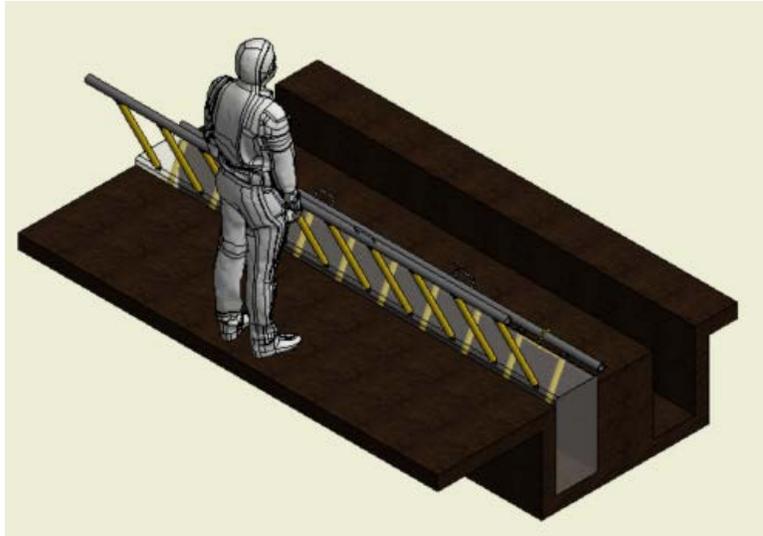


Figura 42 - Isométrico alternativa 2

Este diseño consiste en dividir es rastrillo actual en dos rastrillos laterales independientes que sean más fáciles de manipular por los trabajadores, estos serán insertados de forma lateral, de esta manera el proceso de remoción de la tierra para enterrar los rastrillos no será necesario ya su diseño y que el terreno no se es compactado permite con un poco de presión ubicarlos en la posición requerida.

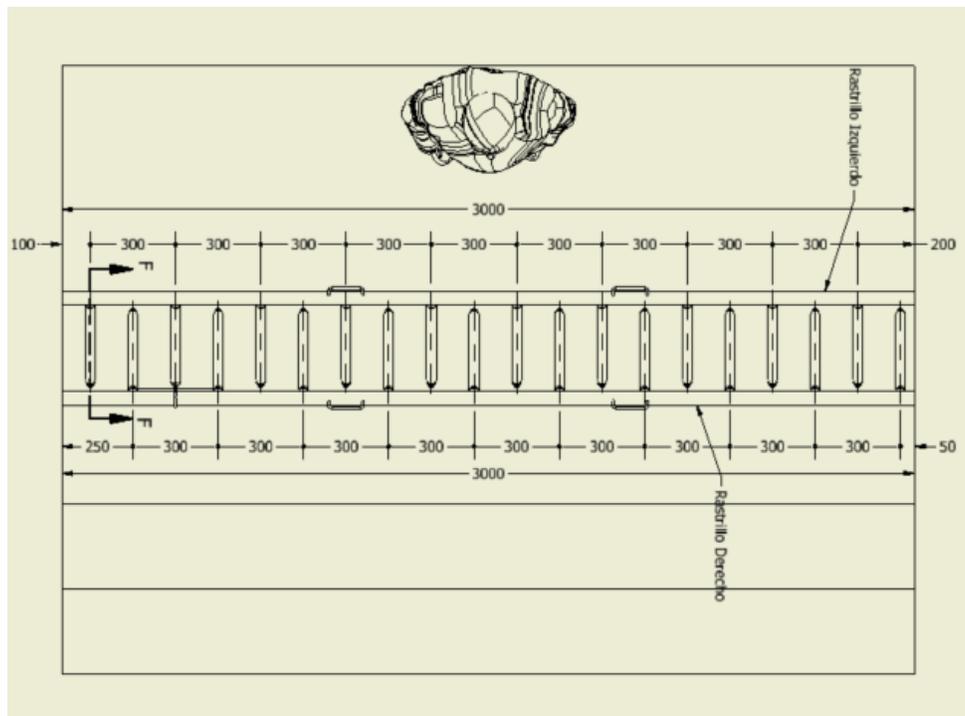


Figura 43 - Vista planta alternativa 2

4.5 Alternativa 3

Se generó un modelo similar de rastrillo al actual utilizado por flexport en donde se modificaron los materiales de acero al carbón por tuberías en acero inoxidable y un casquillo giratorio que impide la obstrucción al paso de vapor hacia el terreno. El acero inoxidable garantiza una duración mayor ya que tiene una alta resistencia a la corrosión y oxidación que permite que el sistema tenga un tiempo de uso prolongado.

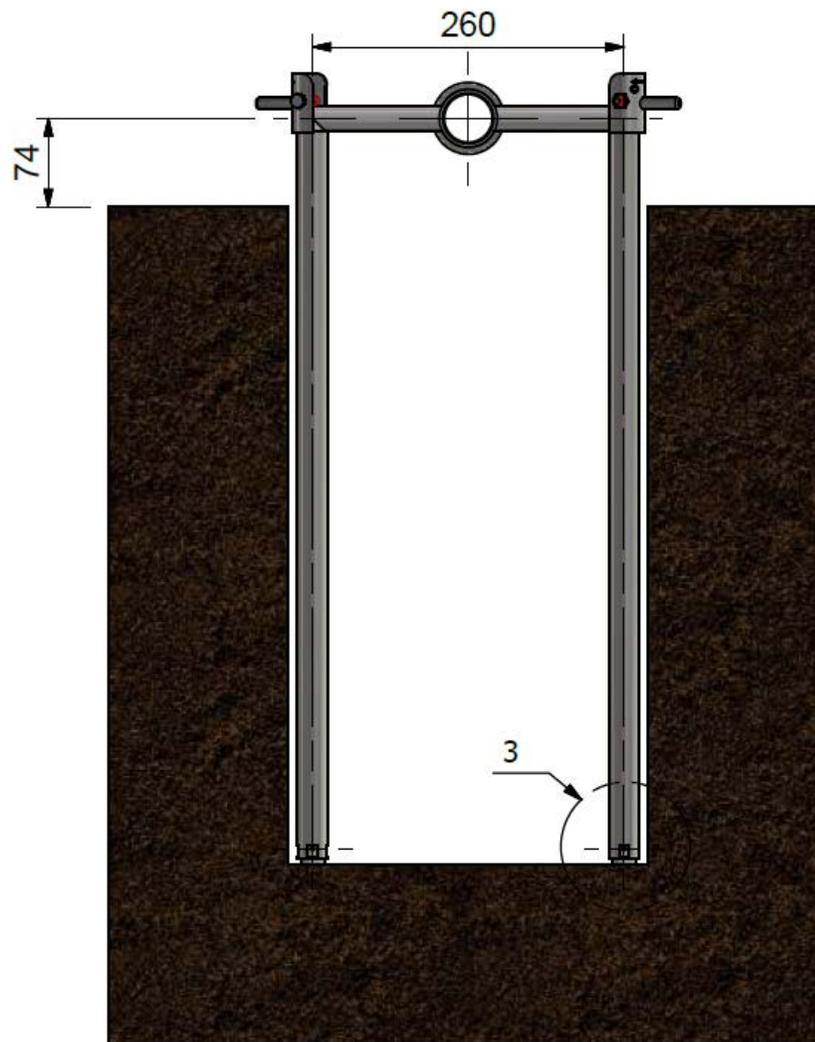


Figura 44 - Vista en sección inyectores alternativa 3

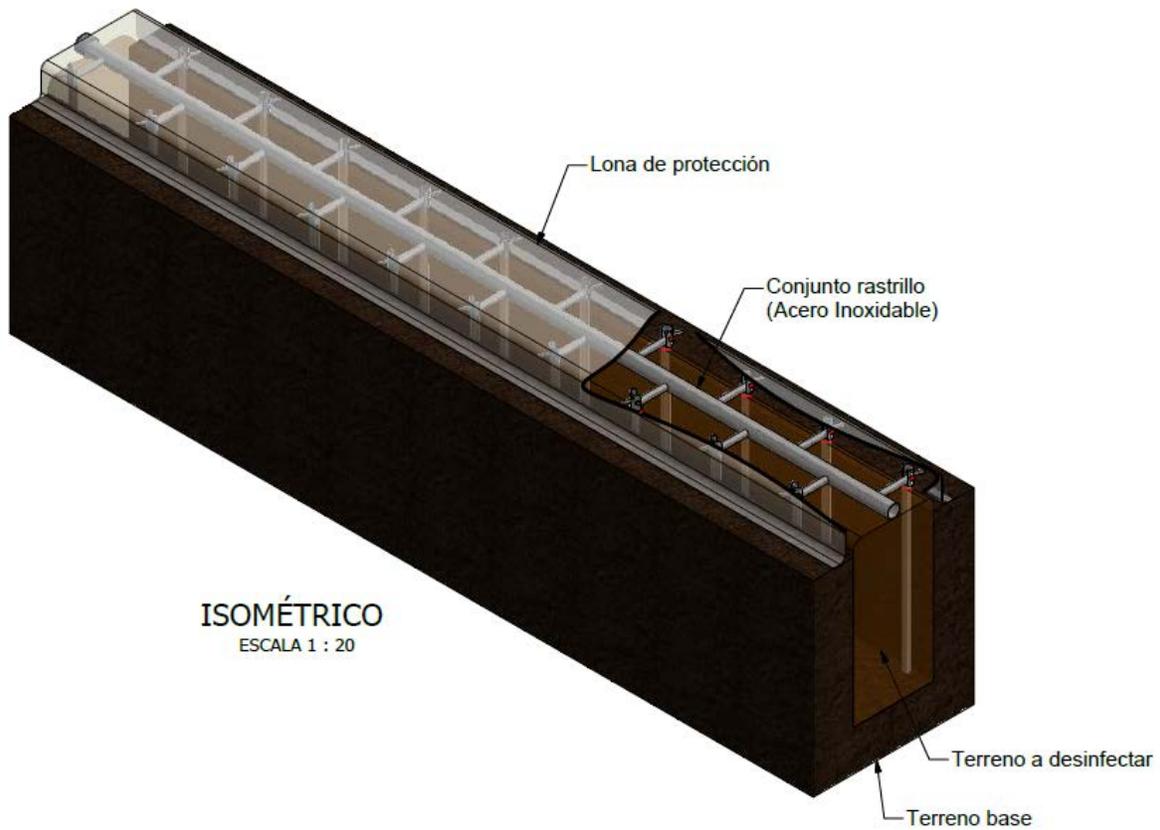


Figura 45 - Isométrico alternativa 3

Este diseño cuenta con colector principal en tubería de Ø1-1/2" SCH 40 ASTM A312 INOX y derivaciones en tubería de Ø1/2" que llevan el vapor hacia el terreno.



Figura 46 - Detalle posiciones apertura y cierre de casquillo.

Capítulo 5

5. Simulación

El objeto de la simulación es validar la distribución del vapor en el suelo mediante la aplicación del software ANSYS 20 – Fluent.

Para lo anterior se ejecuta un modelo básico que estará compuesto por:

1. Dominio del fluido
2. Dominio del fluido – poroso (terreno).

Las tuberías se consideran en su espesor, pero con el ánimo de simplificar el análisis se excluye los dominios de acero y sus interfaces de transferencia de calor. Considerando el modelo adiabático en la longitud del tubo.

5.1 Modelo 3D

Utilizando el software Inventor 2016 se modela de manera simplificada

En la plataforma Workbench de ANSYS se generan selecciones predefinidas que contienen las geometrías con nombres que FLUENT posteriormente reconocerá (Inlet, Interface u Outlet).

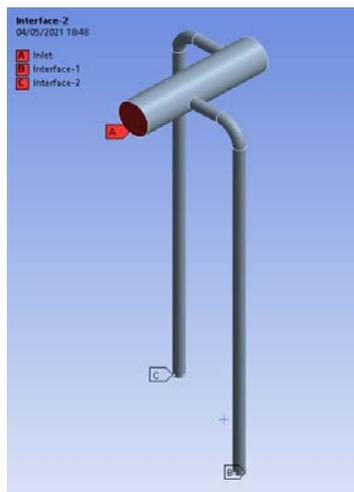


Figura 47 - Modelo de tuberías simplificado

A continuación, se determina la salida sobre el nivel de piso del terreno

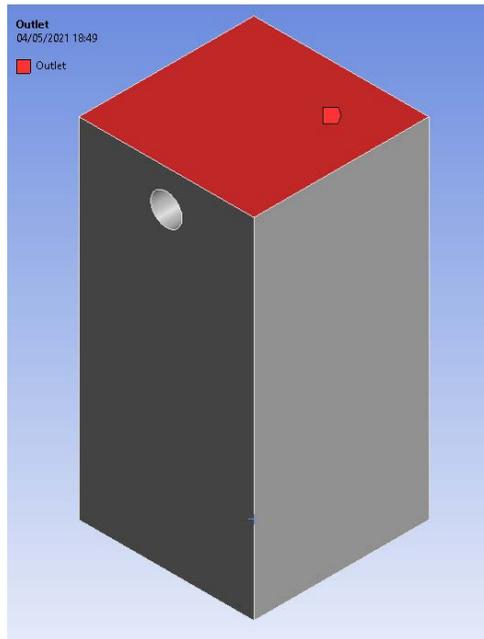


Figura 48 - Modelo del terreno simplificado

El modelo ha sido ejecutado dejando espacios vacíos, los cuales son reconocidos como fronteras de los dominios de fluido (vapor) y fluido poroso (vapor – tierra).

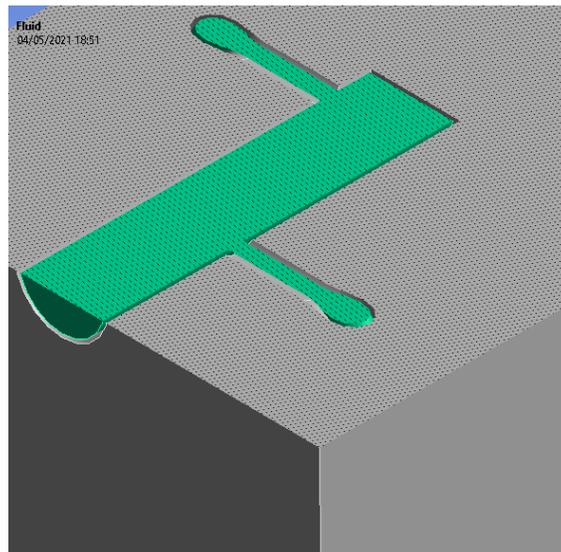


Figura 49 - Sección planta interacción fluido y medio poroso.

5.2 Generación de la malla

Dentro de las mismas opciones permitidas por ANSYS MESHING se establece que ambos cuerpos (dominios), serán tipo fluido, y de preferencia su solver tipo CFD.

Se ejecuta el enmallado configurando la malla con los siguientes parámetros básicos:

[-] Display	
Display Style	Use Geometry Setting
[-] Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Linear
<input type="checkbox"/> Element Size	10, mm
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No
[-] Sizing	
Use Adaptive Sizing	No
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,2)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (20, mm)
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (5,e-002 mm)
Capture Curvature	Yes
<input type="checkbox"/> Curvature Min Size	Default (0,1 mm)
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18,°)
Capture Proximity	No
Bounding Box Diagonal	734,85 mm
Average Surface Area	25615 mm ²
Minimum Edge Length	9,4368 mm
[+] Quality	
[+] Inflation	
[+] Advanced	
[+] Statistics	

Figura 50 - Cuadro de configuración enmallado ANSYS

Se utilizaron elementos tipo tet-4 (tetraedros) de 10 mm en la malla con el objeto de permitir una malla lo suficientemente densa en el terreno, sin embargo dentro de la geometría se encuentran algunas zonas con dimensiones incluso menores a 10 mm, entre las cuales se encuentran, el diámetro de salida de las boquillas (3 mm), el espesor del tubo que simula el espacio de la boquilla (2 mm) entre otras, por dicha razón es necesario implementar el comando “mesh defeaturing” que se encarga de refinar estas zonas con un máximo establecido por defecto a 0.05mm.

Considerando lo anterior se realiza un análisis de calidad del enmallado, donde se categorizan los elementos tet-4 entre 0 y 1, donde 1 es una calidad alta y 0 una calidad muy baja.

Porcentaje RAT intervalo de sección	Valor medio [xi]	Frecuencia [fi]	xFi	frecuencia acumulada [Fi]	frecuencia acumulada [Fi%]
[0.1765-0.2595]	0.218	5	1.09	5	0.00%
[0.2595-0.3425]	0.301	87	26.187	92	0.01%
[0.3415-0.4245]	0.383	693	265.419	785	0.09%
[0.4235-0.5065]	0.465	3690	1715.85	4475	0.53%
[0.5055-0.5885]	0.547	13600	7439.2	18075	2.15%
[0.5885-0.6715]	0.63	37600	23688	55675	6.63%
[0.6705-0.7535]	0.712	101000	71912	156675	18.66%
[0.7525-0.8355]	0.794	224000	177856	380675	45.34%
[0.8455-0.9285]	0.887	294000	260778	674675	80.35%
[0.9175-1.0005]	0.959	165000	158235	839675	100.00%

Tabla 8 - Análisis estadístico de calidad del elemento.

Se realiza un histograma de frecuencias para determinar la media y la función de distribución acumulada.

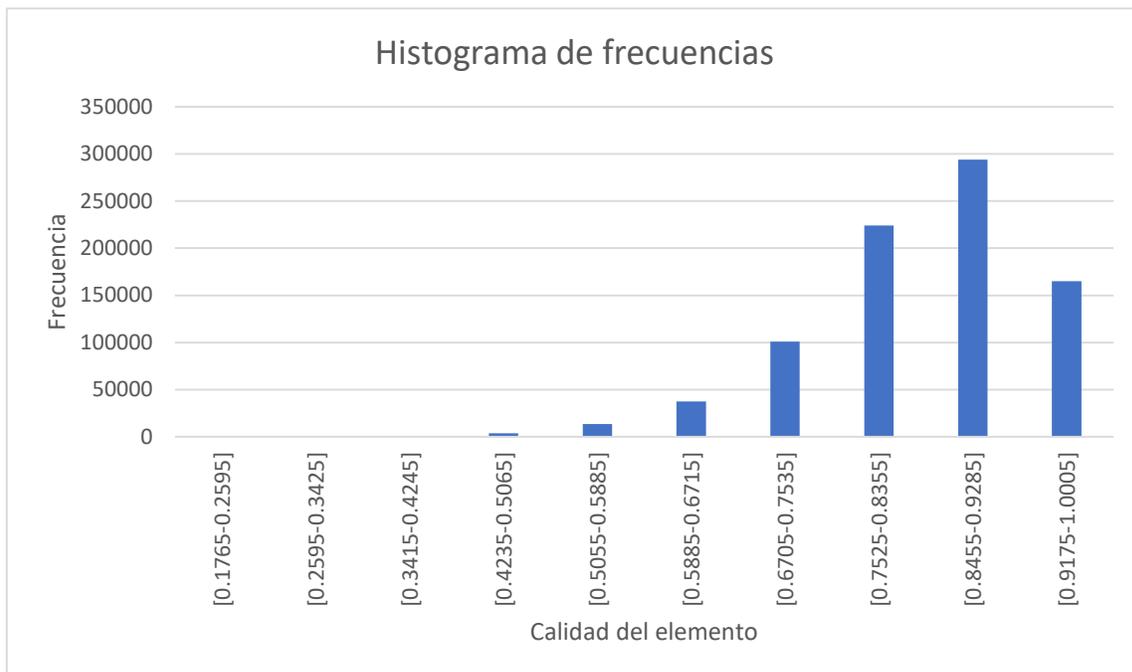


Figura 51 - Histograma de frecuencias calidad del elemento.

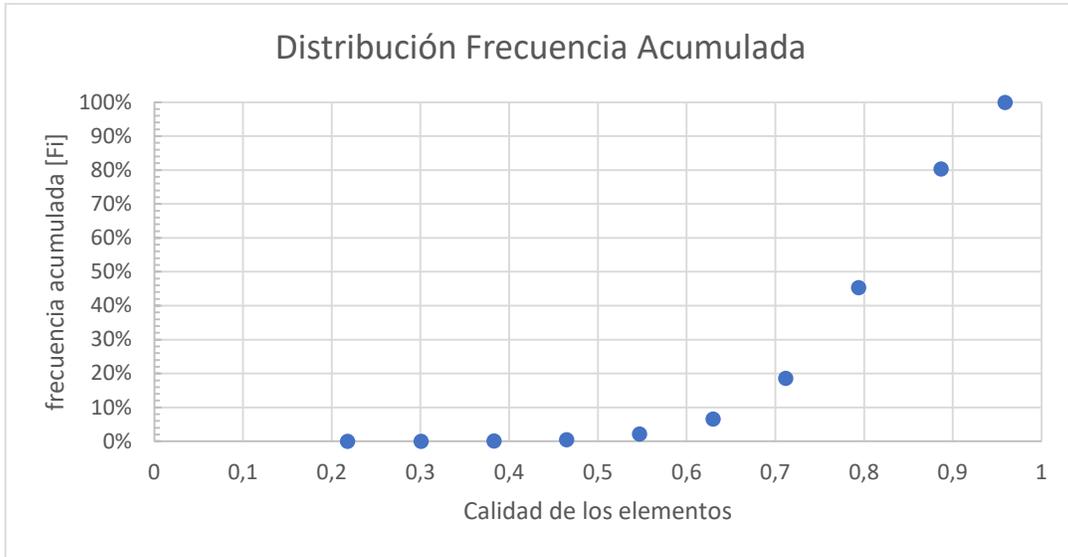


Figura 52 - Distribución de frecuencia acumulada y calidad de los elementos.

La media se encuentra localizada sobre 0,8359, lo que quiere decir que el 50% de los elementos tienen una calidad alta

La distribución estándar será entonces:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

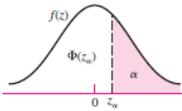
Ecuación 28 - Desviación estándar.

Porcentaje RAT intervalo de sección	Valor medio [xi]	Frecuencia [fi]	frecuencia acumulada [Fi]	□
[0.1765-0.2595]	0.218	5	5	2
[0.2595-0.3425]	0.301	87	92	25
[0.3415-0.4245]	0.383	693	785	142
[0.4235-0.5065]	0.465	3690	4475	508
[0.5055-0.5885]	0.547	13600	18075	1135
[0.5885-0.6715]	0.63	37600	55675	1595
[0.6705-0.7535]	0.712	101000	156675	1551
[0.7525-0.8355]	0.794	224000	380675	394
[0.8455-0.9285]	0.887	294000	674675	767
[0.9175-1.0005]	0.959	165000	839675	2499
			Desv. estándar	0.101305871

Tabla 9 - Desviación estándar

Para asegurar que el 95% de los elementos se encuentran con una calidad superior a 0.8 se hará un análisis de confiabilidad de los datos.

$$\Phi(z_\alpha) = \int_{-\infty}^{z_\alpha} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$$

$$= \begin{cases} \alpha & z_\alpha \leq 0 \\ 1 - \alpha & z_\alpha > 0 \end{cases}$$


Z_α	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3238	0.3192	0.3156	0.3121
0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
1.0	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
2.0	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.00990	0.00964	0.00939	0.00914	0.00889	0.00866	0.00842
2.4	0.00820	0.00798	0.00776	0.00755	0.00734	0.00714	0.00695	0.00676	0.00657	0.00639
2.5	0.00621	0.00604	0.00587	0.00570	0.00554	0.00539	0.00523	0.00508	0.00494	0.00480
2.6	0.00466	0.00453	0.00440	0.00427	0.00415	0.00402	0.00391	0.00379	0.00368	0.00357
2.7	0.00347	0.00336	0.00326	0.00317	0.00307	0.00298	0.00289	0.00280	0.00272	0.00264
2.8	0.00256	0.00248	0.00240	0.00233	0.00226	0.00219	0.00212	0.00205	0.00199	0.00193
2.9	0.00187	0.00181	0.00175	0.00169	0.00164	0.00159	0.00154	0.00149	0.00144	0.00139

Tabla 10 - Función de distribución acumulada de la distribución normal gaussiana (BUDYNAS & NISBETT, 2008).

$$\bar{X} = 0,83594 \text{ - Media aritmética}$$

$$\sigma = 0,10131 \text{ - Desviación estándar}$$

$$N = 839675 \text{ - Número de muestras}$$

$$\text{Confiabilidad} = 95\%$$

$$z = 1,96$$

$$\text{Intervalo de confianza} = 0,000217$$

$$\mu_{max} = 0,861553 \text{ - Grado de calidad máximo}$$

$$\mu_{min} = 0,8357219 \text{ - Grado de calidad mínimo.}$$

Con lo anterior se garantiza que el 95% de los elementos bajo una distribución estándar se encontrarán con un grado de calidad entre 0,835 y 0,836

Como parte del trabajo iterativo para obtener resultados adecuados de enmallado, se intentó la aplicación de zonas tipo “inflation” que permitieran ver el comportamiento de la capa limite sobre el tubo, pero debido a la geometría propia del rastrillo no es posible, ya que se necesitaría una geometría simplificada de transiciones a lo largo de un patrón.

Sin embargo, pese a que no fue posible se obtuvo resultados de malla bastante finos sobre las boquillas.

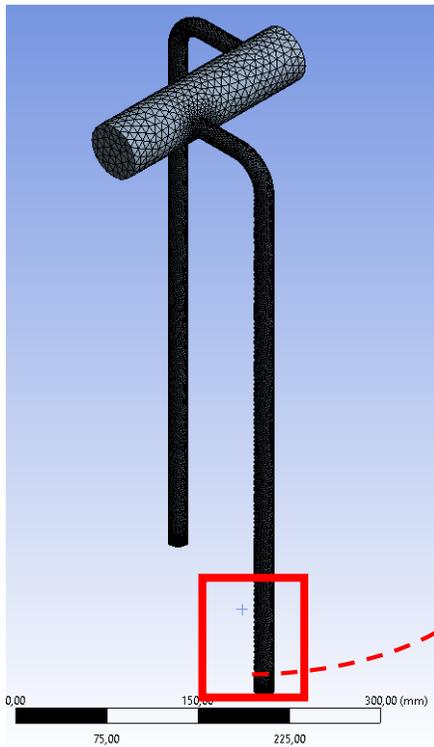


Figura 53 - Enmallado dominio de fluido.

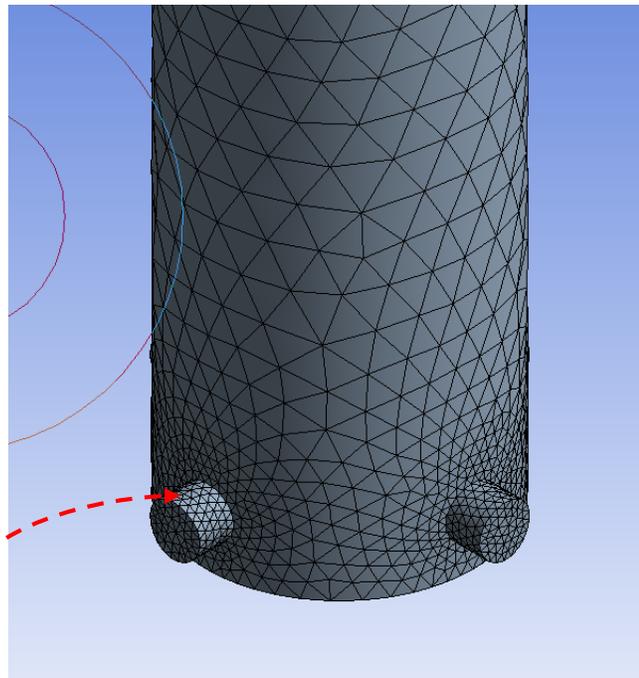


Figura 54 - Salidas de vapor (dominio de fluido)

Sobre las salidas de las boquillas, se genera un área llamada interfaz, la cual será el punto de conexión entre el dominio fluido y el dominio poroso, como se puede visualizar en la figura 54 la interfaz entre el medio poroso. Esta zona es crítica para la generación de la malla, debido a que la boquilla de salida tiene una dimensión de $\varnothing 3$ mm.

Se verificó la calidad de los elementos internos al dominio de tubería (fluido) y el exterior (medio poroso), donde gracias a la aplicación de “defeaturing size” refinó con mayor cantidad de elementos tet-4.

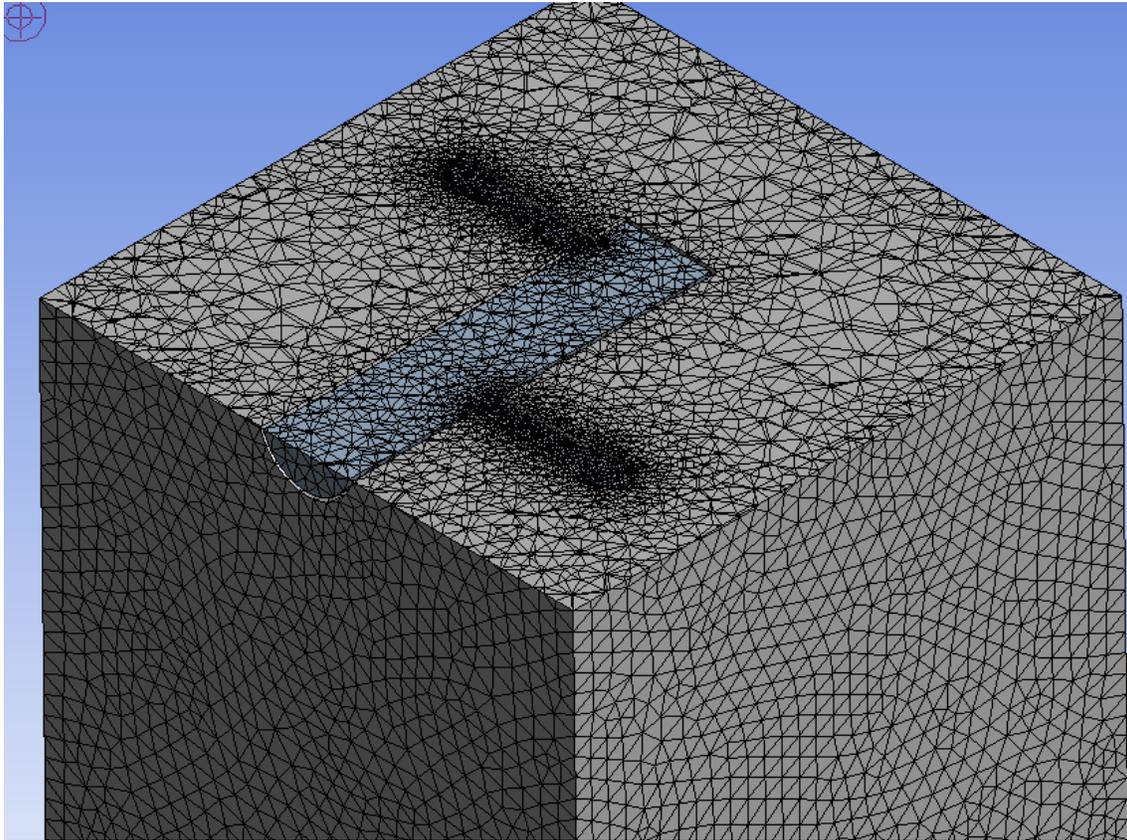


Figura 55 - Sección planta enmallado ANSYS.

Luego de ejecutar el enmallado se obtienen los siguientes resultados:

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	160827
<input type="checkbox"/> Elements	839738

Figura 56 - Resultados del enmallado ANSYS.

5.3 Configuración del análisis con FLUENT

Debido a que la simulación es bastante compleja el software ANSYS requiere unas características de equipo importantes, para poder correr la simulación, por tal razón se utilizó un equipo de diseño de alta capacidad con 32 GB de memoria RAM, disco duro de estado sólido y un procesador de 7 núcleos y alta precisión.

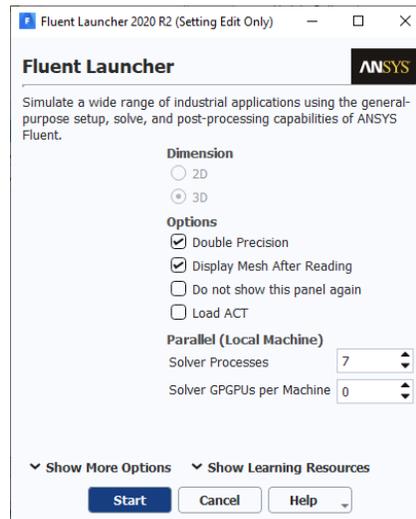


Figura 57 - Configuración del solver de FLUENT

Dentro de los parámetros de configuración se habilita el modelo multifase de vapor húmedo, debido a que el fluido de interés es vapor e ingresa en una condición de vapor saturado, pero al atravesar la frontera de los tubos se comporta como vapor húmedo.

También se implementa el modelo de energía, el cual permite establecer condiciones de temperatura y transferencia entre las fronteras del sistema.

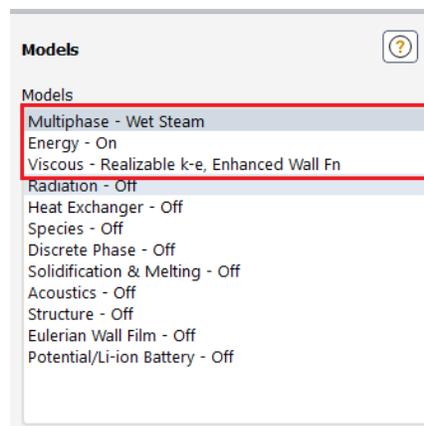


Figura 58 - Configuración del modelo de análisis

A continuación, se detalla la configuración de cada uno de los modelos activos para el análisis:

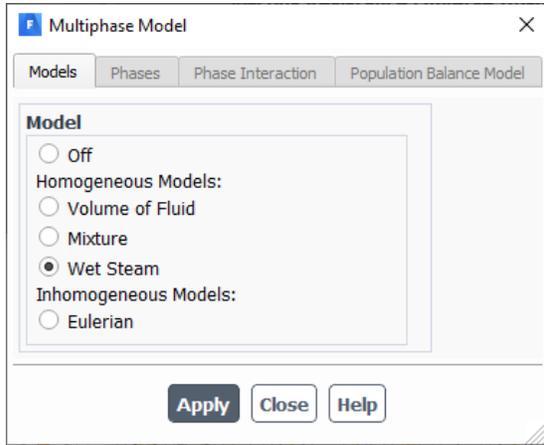


Figura 59 - Configuración modelo multifase

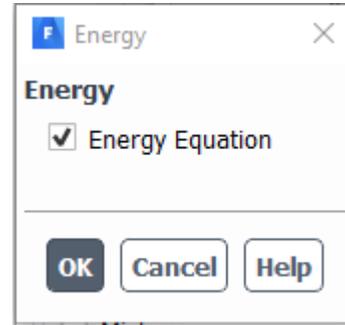


Figura 60 - Configuración del modelo energético

Se selecciona el modelo k-E con opción realizable, el cual se aplica para salidas tipo jet o zonas con alta velocidad como lo es en nuestro caso. Se selecciona tratamiento estándar para las paredes, lo cual habilitará la posibilidad de incluir el término de rugosidad relativa y encontrar el comportamiento del fluido en inmediaciones a la pared

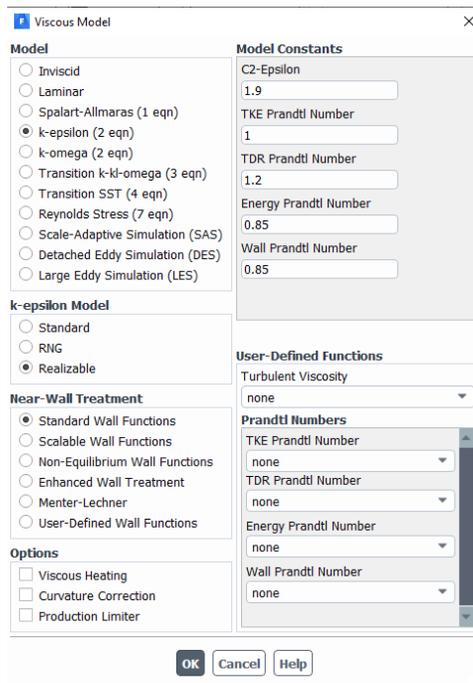


Figura 61 - Configuración del modelo viscoso

Dentro de las condiciones de operación del análisis es necesario efectuar la corrección por altura al nivel aproximado de Bogotá (2650 metros sobre el nivel del mar)

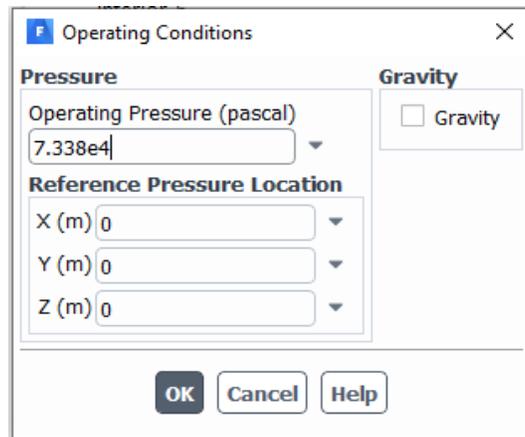


Figura 62 - Corrección en condiciones de operación

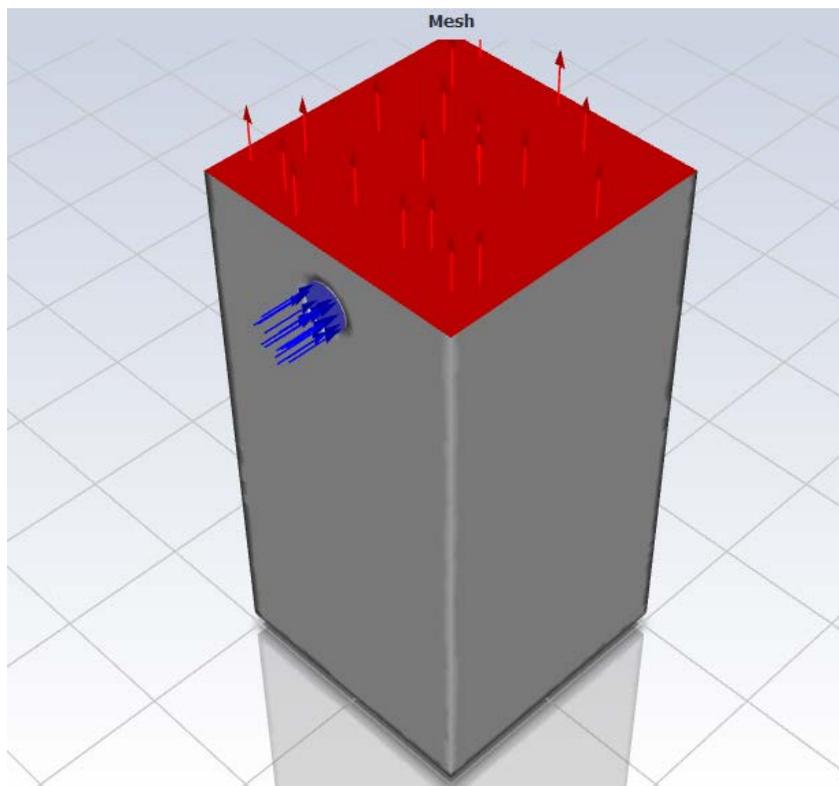


Figura 63 - Salida de vapor a la atmosfera condición de frontera.

El modelo de vapor de FLUENT restringe el uso de las condiciones de frontera, permitiendo únicamente las siguientes condiciones:

- Mass flow Inlet
- Pressure Inlet
- Pressure Outlet

Considerando lo anterior se vuelve necesario desarrollar el problema conociendo los parámetros de flujo másico calculado mediante la ecuación 16 donde se tiene un valor de 1127,7 kg/hr este flujo másico este valor es el total que ingresa al sistema desde la caldera, para la simulación se ingresará la mitad de este ya que en sistema tiene una derivación como se muestra en la figura 19, también se ingresa una presión de 413685,4 Pa o 65 psi que es un dato de entrada suministrado por flexport.

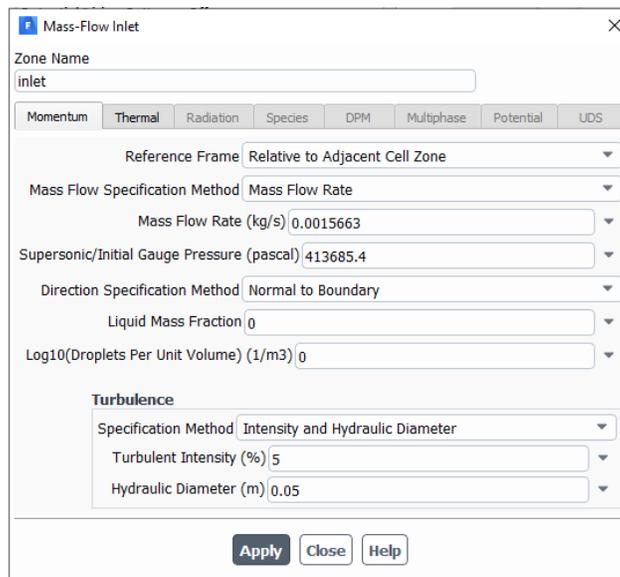


Figura 64 - Condición de frontera en la entrada

Adicionalmente a los parámetros indicados en la anterior figura, se efectúa la corrección en la temperatura de ingreso según los datos medidos en campo.

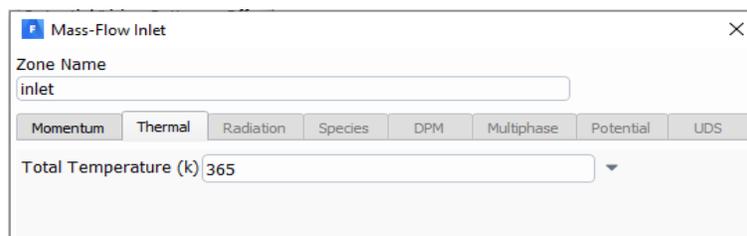


Figura 65 - Corrección de temperatura en la entrada

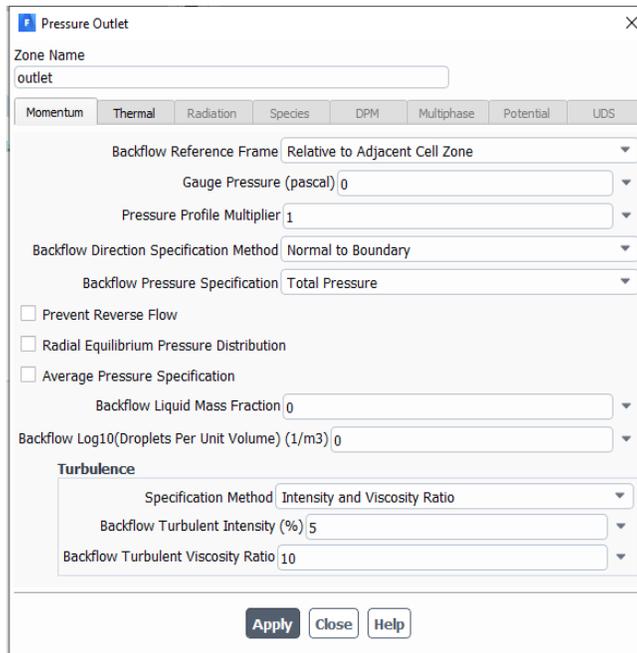


Figura 66 - Condición de frontera en la salida

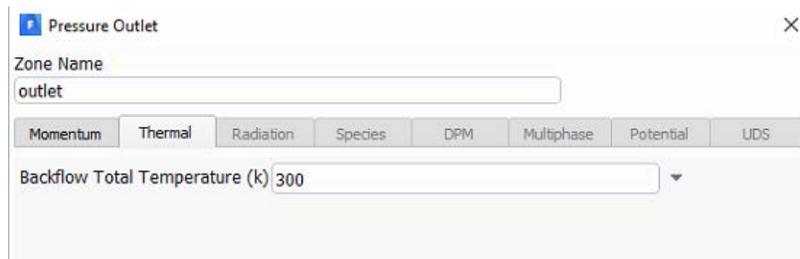


Figura 67 - Corrección de temperatura en la frontera de salida

Para el modelamiento del medio poroso, se deben introducir los datos determinados mediante el experimento y los resultados obtenidos en el capítulo 3 indicados en la tabla número 7. Este modelo poroso simulará la dispersión del flujo de vapor en la tierra y todas las propiedades asociadas (temperatura, velocidad de flujo, presión y dispersión).

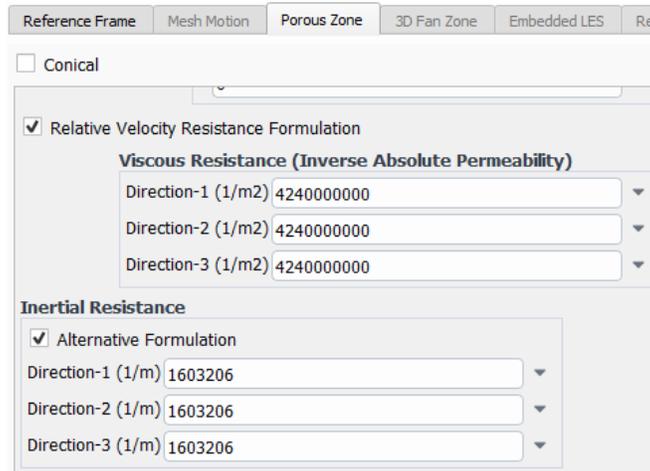


Figura 68 - parámetros de resistencia viscosa y resistencia inercial

5.4 Resultados

En la verificación de resultados se presentarán las siguientes variables:

- Temperatura
- Velocidad en la descarga

Para representar dichas variables se seleccionan 3 superficies de interés (señaladas en color verde) e identificadas con números, según la siguiente figura:

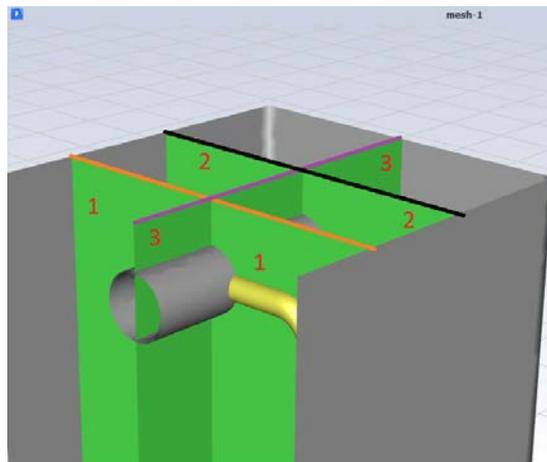


Figura 69 - Planos de seccionamiento para análisis

- 1-1 plano transversal a la primera boquilla del rastrillo
- 2-2 plano transversal a la segunda boquilla del rastrillo
- 3-3 plano transversal a la tubería de suministro de vapor.

5.4.1 Análisis de distribución de temperaturas

Se analiza la distribución de temperaturas en el terreno, sobre el plano 1-1 encontrando que el terreno alcanza temperaturas de 356K (82°C), con lo cual se evita el crecimiento y desarrollo de patógenos nocivos para el cultivo.

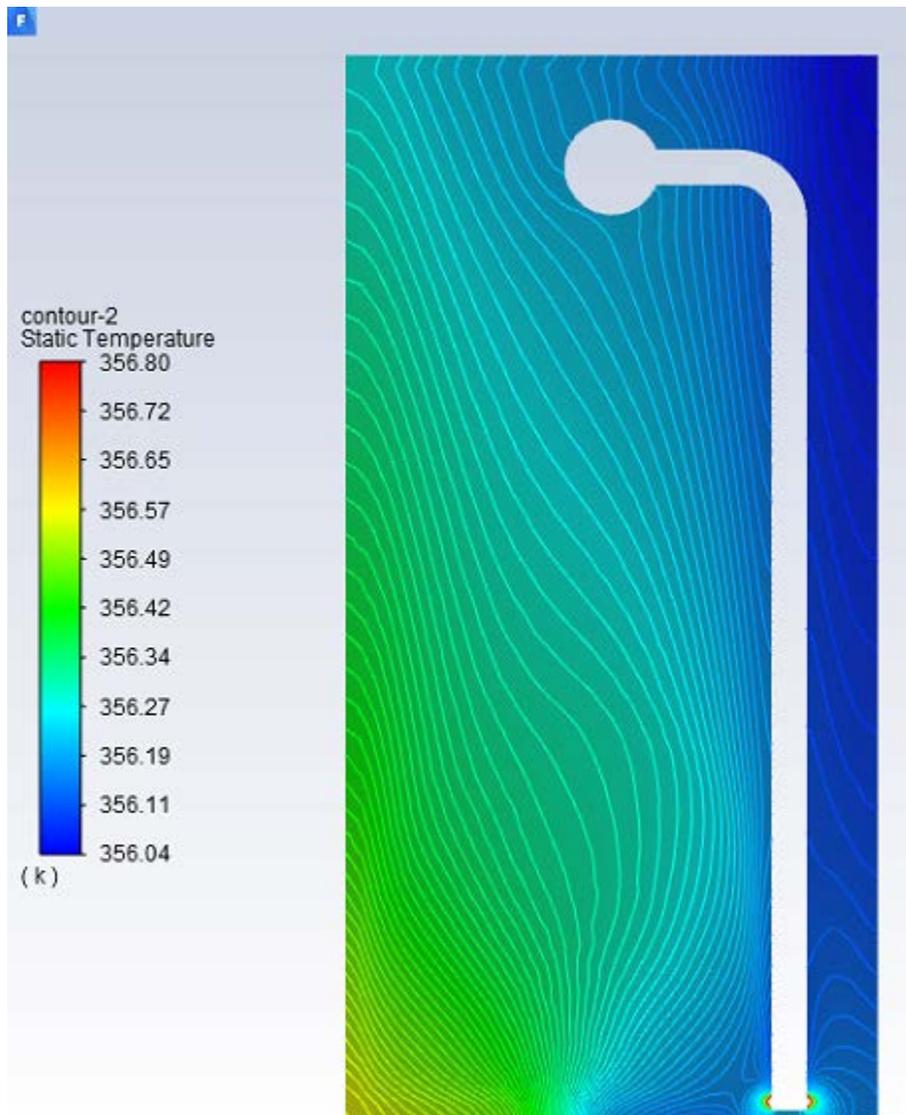


Figura 70 - Distribución de temperaturas - Plano 1-1

Se evidencia un comportamiento asimétrico en la temperatura de los planos 1-1 y 2-2, se presume que puede ser debido a las condiciones de frontera en la parte final del rastrillo, ya que se consideró una superficie adiabática. Sin embargo, aun cuando las distribuciones de temperaturas varían, la temperatura ponderada se encuentra sobre los 356K (82°C).

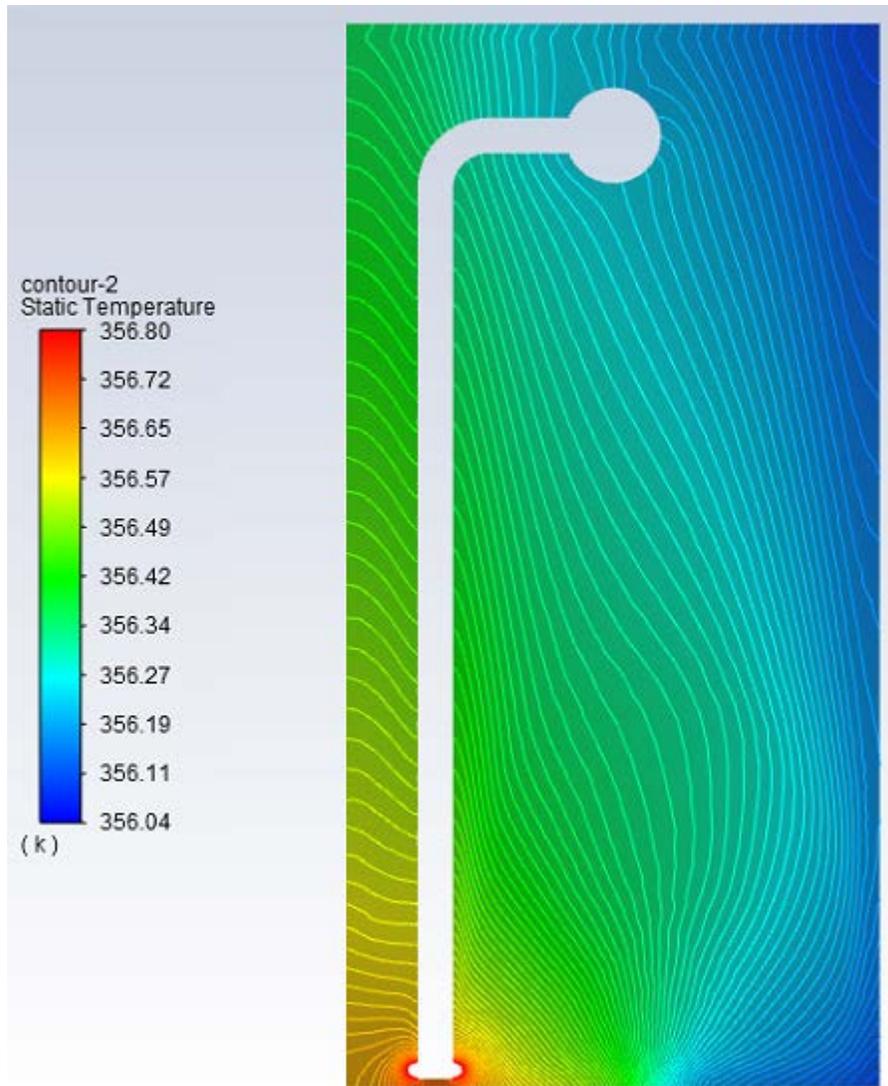


Figura 71 - Distribución de temperaturas en terreno - Plano 2-2

En las anteriores gráficas se muestra vacío el tubo para mayor entendimiento debido a que la temperatura al ser mucho mayor, casi 365K (92 °C) no permite visualizar el diferencial de temperaturas en el terreno, que es aproximadamente 0.8K.

A continuación, se detalla la temperatura esperada en la salida de la boquilla en el plano 2-2, donde se puede apreciar un gradiente rápido de temperatura al llegar al borde finito de la boquilla. Este comportamiento con forma de parábola tiene fundamento en 2 situaciones:

1. El perfil de las velocidades dentro de la tubería
2. Factor de forma en la boquilla (dirección de flujo)

La rápida expansión tiene implicación directa en la pérdida de energía, por lo cual la temperatura tiende a caer desde 365.5 K (92.35°C) hasta los 356 K (82.85°C)

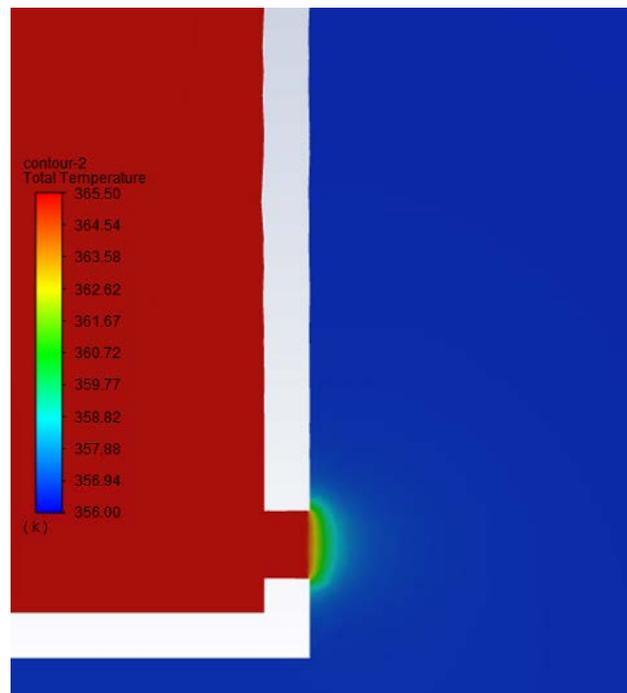


Figura 72 - Boquilla plano 2-2

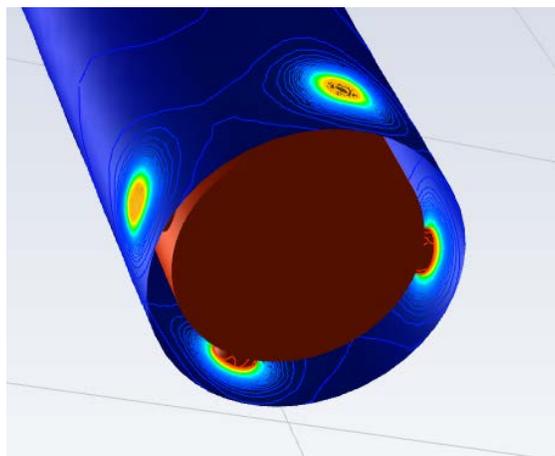


Figura 73 - Isométrico boquilla plano 2-2

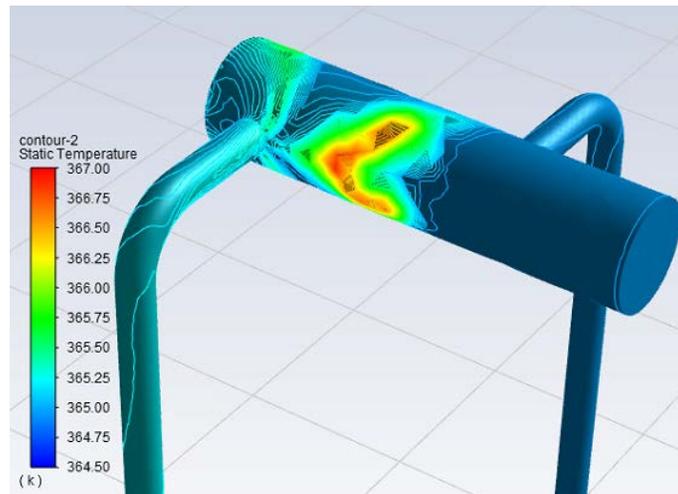


Figura 74 - Distribución de temperaturas en la superficie de la tubería

Con la anterior figura se puede concluir que según las condiciones de simulación al final del tubo principal, el gradiente de temperatura en el sentido de flujo tiene un ligero ascenso y genera un incremento de temperatura de 0.5K en el brazo de salida final.

La siguiente figura muestra el diferencial de temperatura en las descargas al terreno.

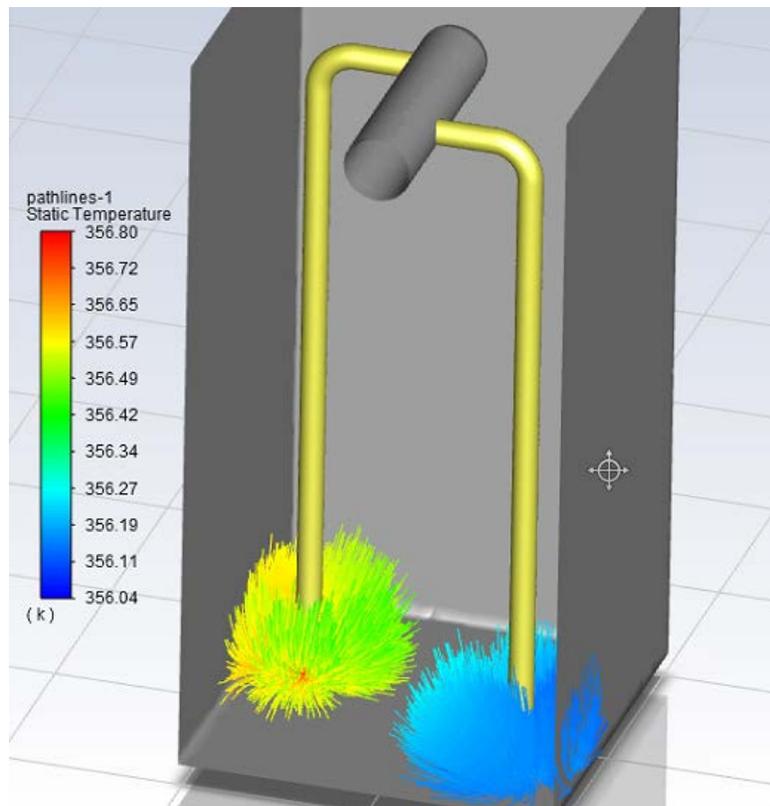


Figura 75 - Líneas de flujo en la descarga de vapor

Debido a que la simulación considera únicamente los 2 tubos finales del spool, se puede verificar que la temperatura más alta se encuentra al final del spool, sin que esta sea significativa, apenas unas décimas por encima. La explicación de este fenómeno se debe a la geometría de la tubería, el vapor se estanca al final del tubo, produciendo vorticidad que favorece el intercambio térmico.

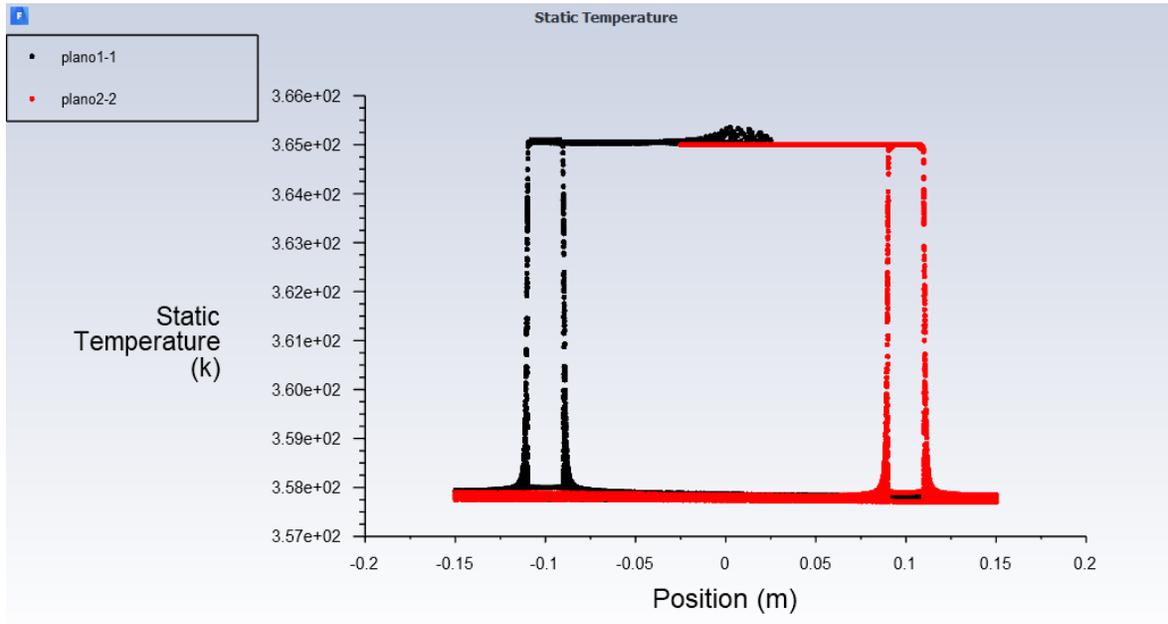


Figura 76 - Distribución de temperatura desde el colector hacia las boquillas.

De lo indicado en la figura 76, siendo 0 m el plano central de la tubería, se aprecia el decremento en la temperatura, desde el punto central de suministro a 365 K (92°C) con los 2 brazos y la temperatura de salida, que oscila sobre los 358 K (85°C), donde se puede concluir que las líneas verticales localizadas en -0.1m y 0.1m corresponden a las expansiones de las boquillas, donde se libera energía.

Analizando sobre el nivel de terreno, se obtiene una temperatura ponderada de 357 K (84°C), como se aprecia en la figura 77.

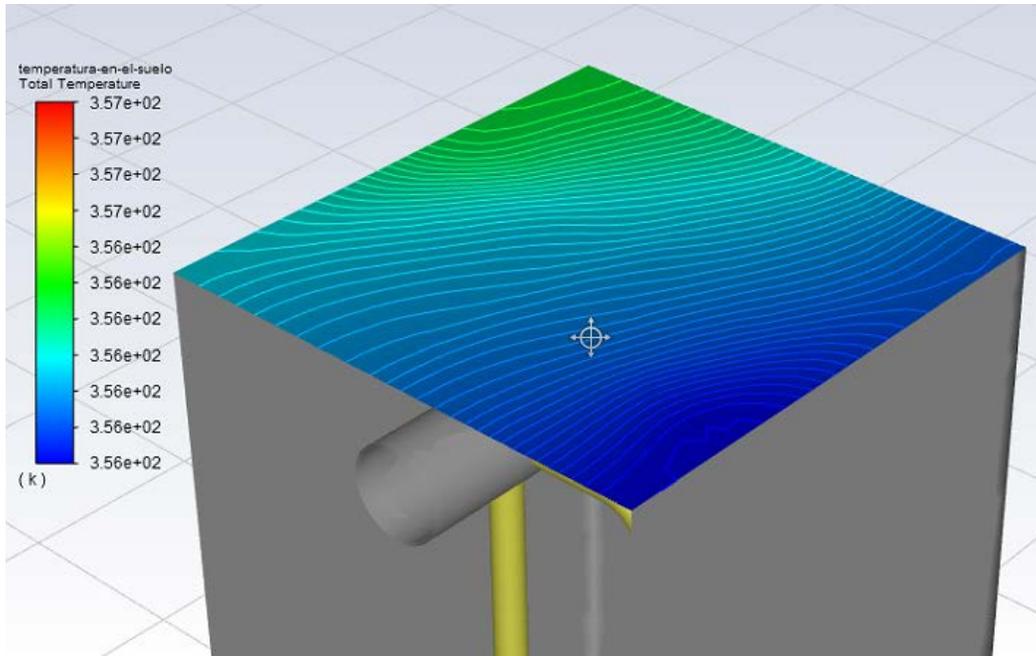


Figura 77 - Distribución de temperaturas a nivel de terreno

Teniendo en cuenta el concepto de modelo poroso aplicado a este análisis es posible confirmar mediante las líneas de flujo, que existe una saturación uniforme del terreno, Las diferencias en la temperatura de saturación del terreno se encuentran entre 356 a 357 K esto es aproximadamente entre 83°C y 84°C una diferencia de 1°C con lo cual se concluye que es un gradiente menor, el cual no afectará la temperatura de esterilización del terreno como se indican en las tablas 1 y 2 para las temperaturas letales para la gran mayoría de microorganismos patógenos que afectan el suelo.

A continuación, se muestra el desarrollo de las líneas de flujo desde las boquillas hasta la salida del sistema, apreciándose zonas de temperatura alta y baja.

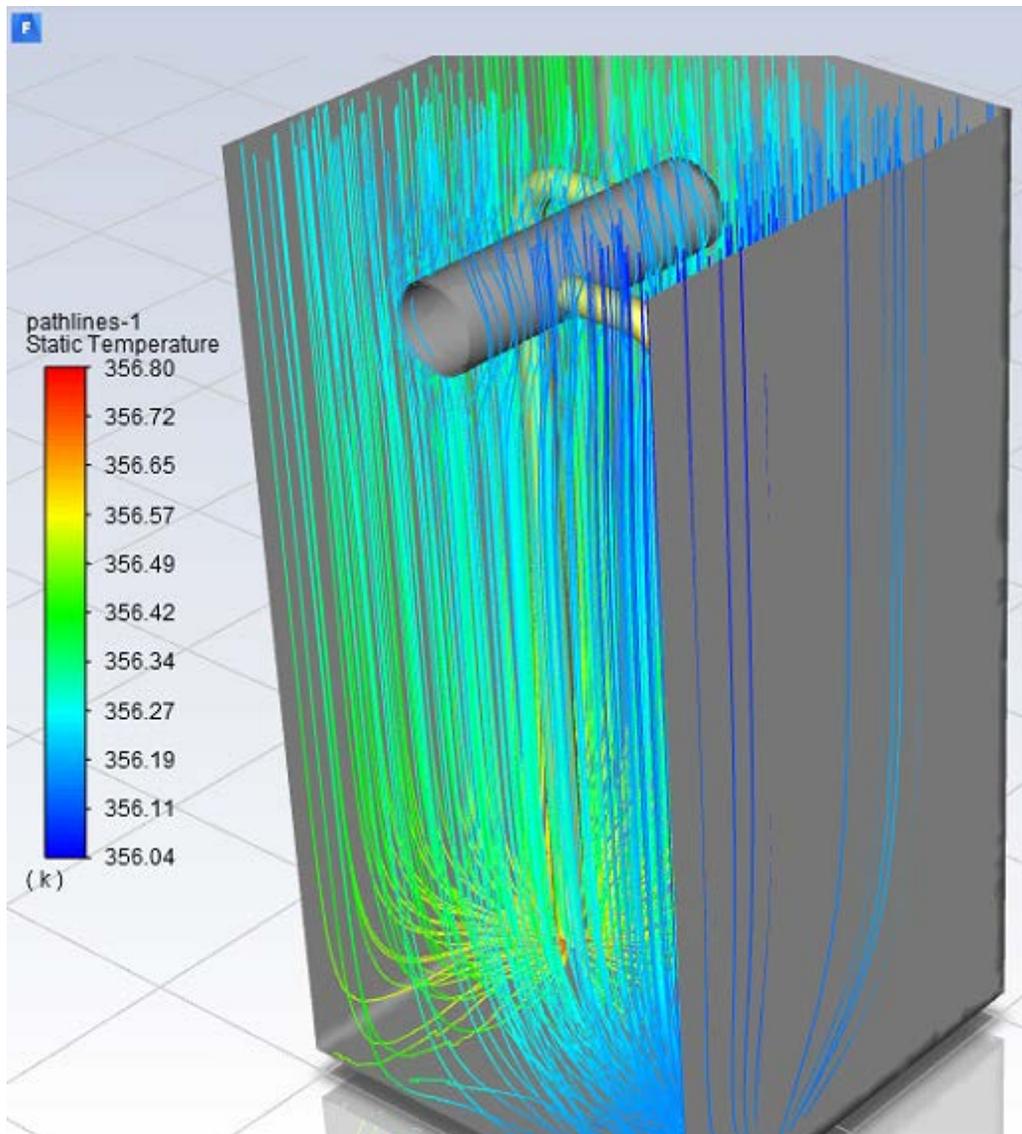


Figura 78 - Distribución del flujo

Se observa que se logra saturación del terreno, con temperaturas aceptables de esterilización que se encuentran entre los 356.04 K (82.89°C) y los 356.8 K (83.65°C), esto no muestra una diferencia de menos de 1°C entre las líneas de flujo a la salida de las boquillas y la temperatura en diversas partes del volumen de tierra analizado.

La velocidad oscila entre los 0m/s y 0.1m/s como se muestra en la figura 79, esto se debe a que el flujo másico transportado por la sección diametral del tubo, considerando la ley conservación de masa estaría transportando el mismo flujo másico, que la sección completa de tierra analizada en esta simulación.

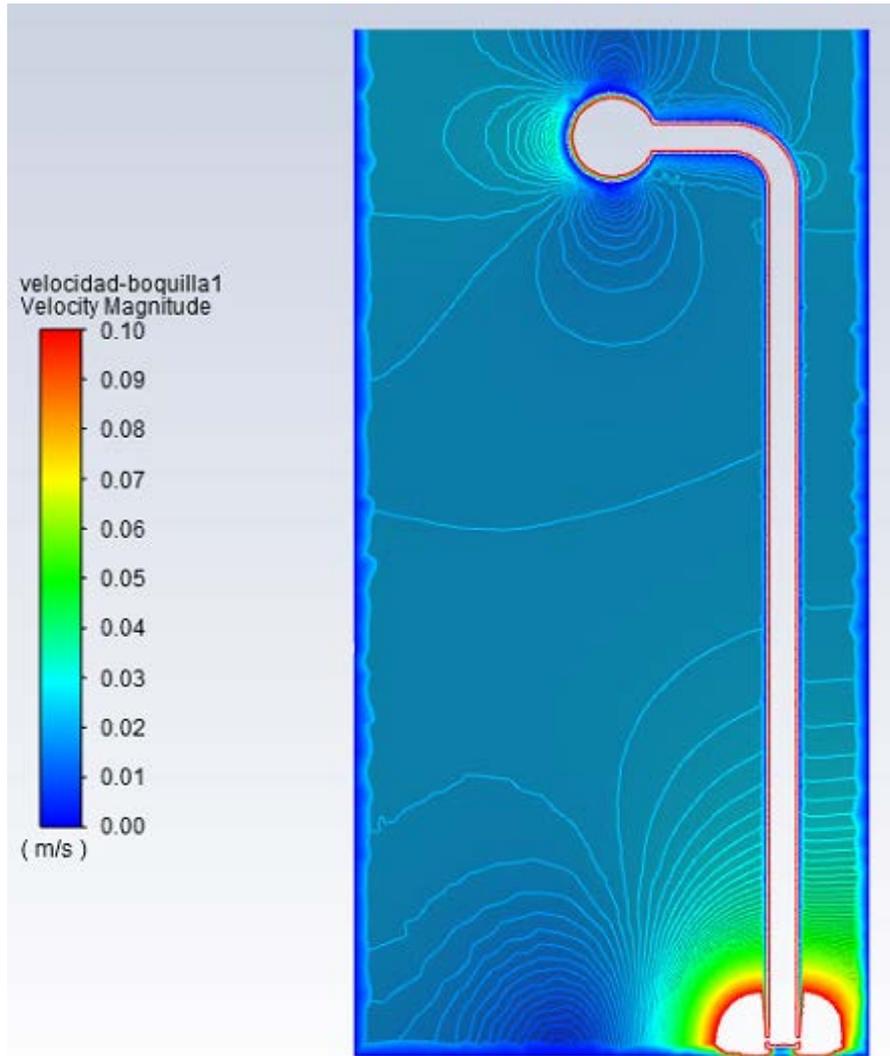


Figura 79 - Distribución de velocidades - Plano 1-1

También es posible verificar que muy rápidamente en el terreno, cerca de las boquillas que la velocidad de flujo tiene un gradiente alto.

Las zonas blancas conforman el tubo donde la velocidad es cercana a los 8 m/s y para claridad del concepto explicado, se han excluido. También es posible notar una ligera línea roja formándose justo sobre la superficie interior, lo cual refleja perfil de velocidades desarrollándose dentro de la tubería, donde el fluido en su punto de contacto con la superficie metálica tiene tendencia a 0 m/s.

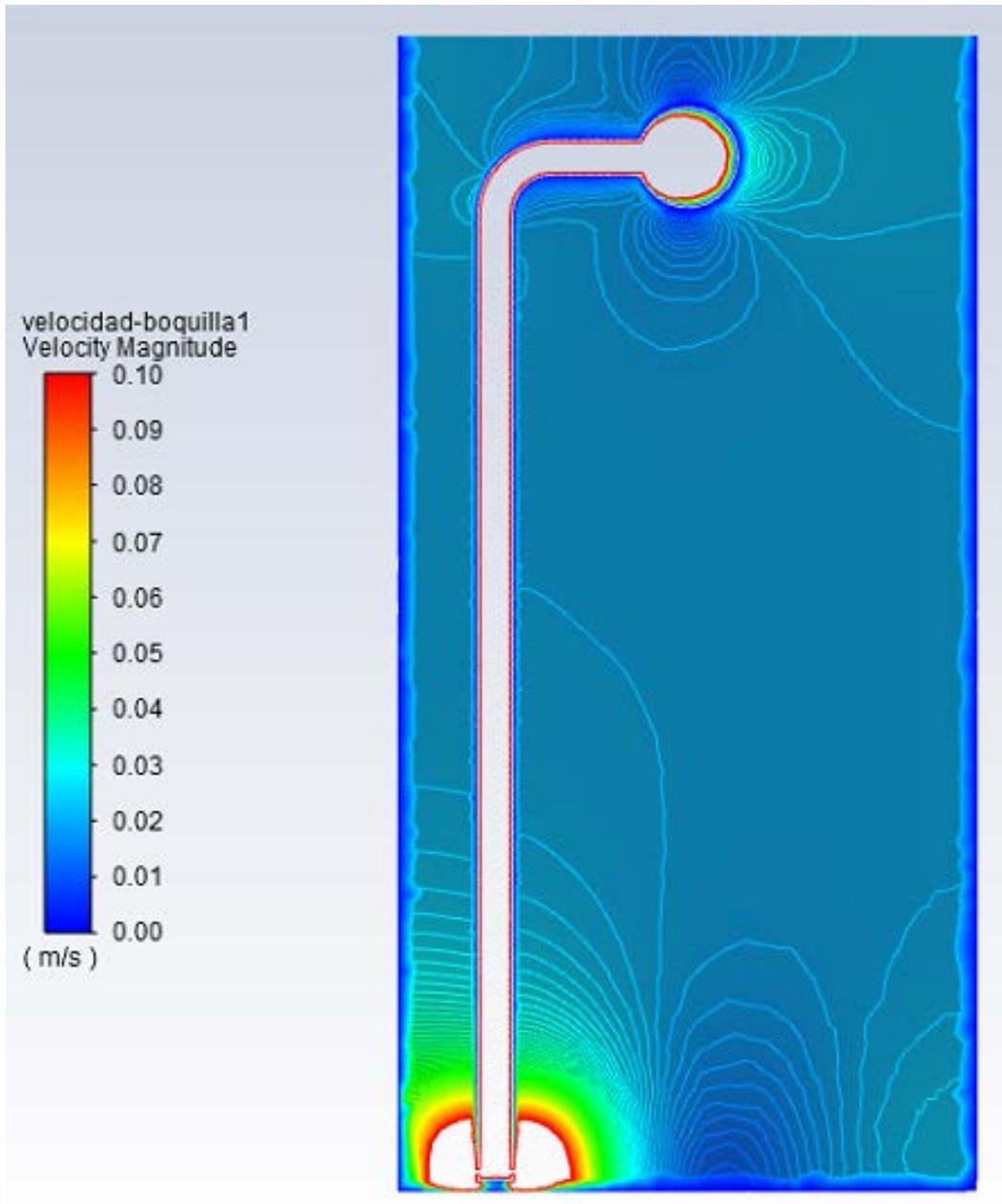


Figura 80 - Distribución de velocidades - Plano 2-2

De las figuras 79 y 80 se puede concluir que la distribución de velocidades tiene tendencia a ser simétrica entre ambas boquillas como era de esperarse, es importante notar que la velocidad sobre las superficies de contacto tiende a cero, y esto quiere decir que la aplicación del modelo viscoso es correcta, aun cuando no se haya hecho un enmallado para verificar el comportamiento de la capa límite del vapor en las tuberías. Es posible también concluir que la velocidad de disparo de las boquillas es superior a los 8m/s, lo cual puede inducir un desgaste prematuro en una boquilla de un material con una dureza baja.

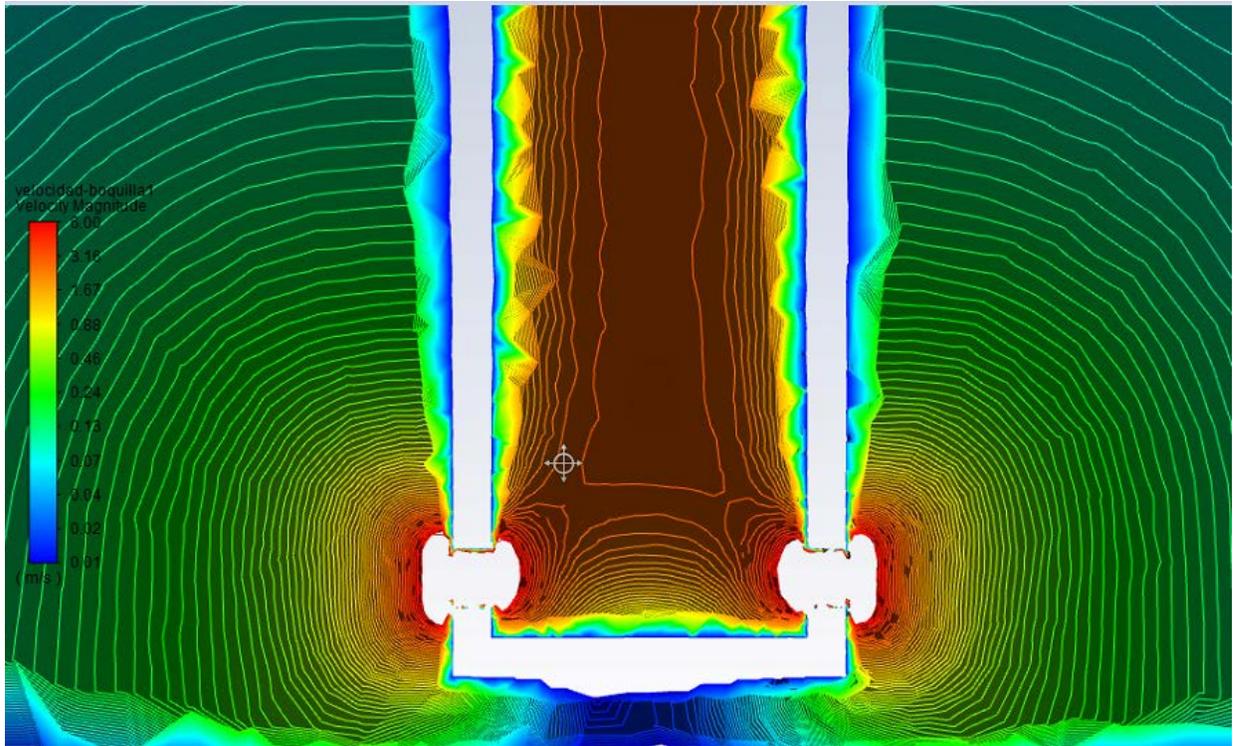


Figura 81 - Distribución de velocidades en la boquilla de salida

Con el objeto de profundizar un poco más en los resultados a continuación se presenta la distribución de velocidades sobre los planos 1-1 y 2-2, donde se establece como plano medio el centro del tubo matriz de vapor, donde la velocidad es relativamente baja, aproximadamente 0.5 m/s, y a medida que se avanza sobre los brazos, la velocidad aumenta hasta los 3 m/s aproximadamente y luego se notan 2 líneas verticales a ambos lados. Estas líneas representan las boquillas, donde la velocidad aumenta y luego vuelve a caer muy cerca de 0 m/s

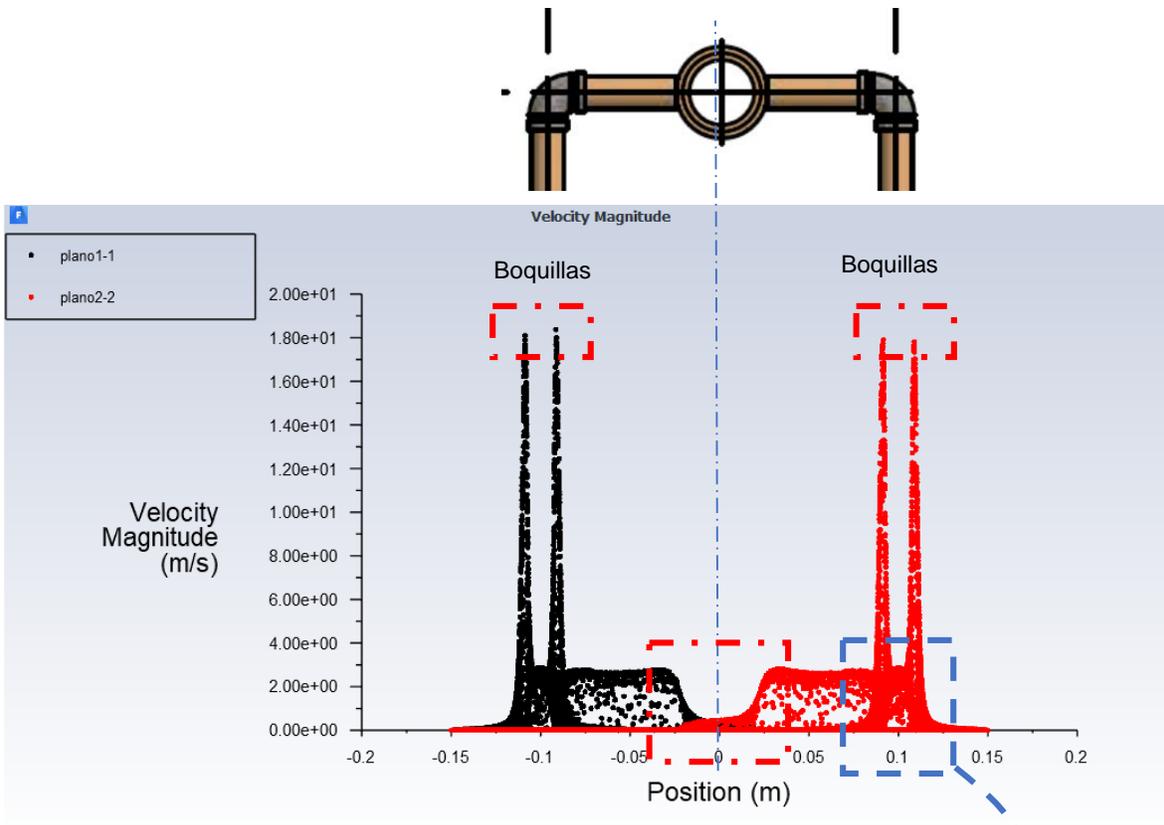


Figura 82 - Distribución de velocidades en el planos 1-1 y 2-2

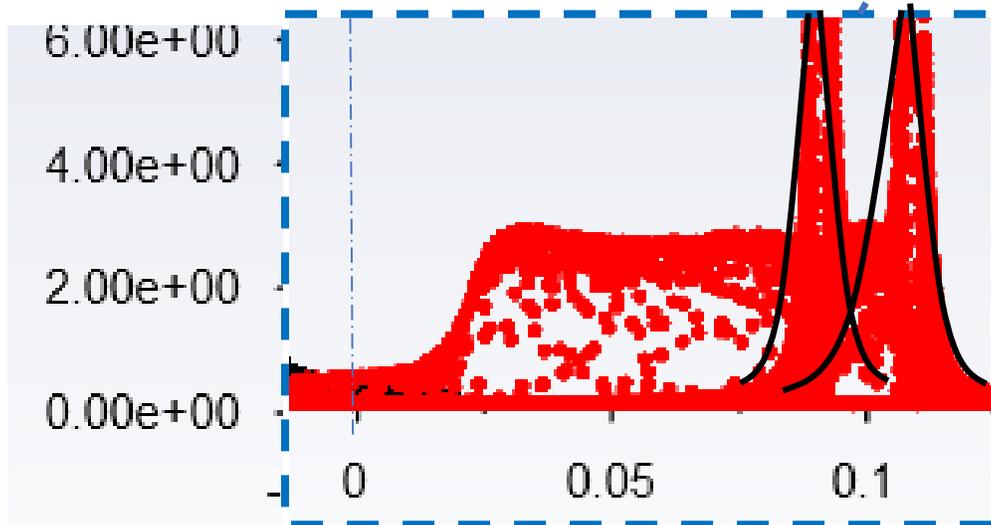


Figura 83 - Gradiente de velocidad en las boquillas

En las figuras 82 y 83 se indica con flechas negras el gradiente de velocidad desde las boquillas hacia el medio poroso.

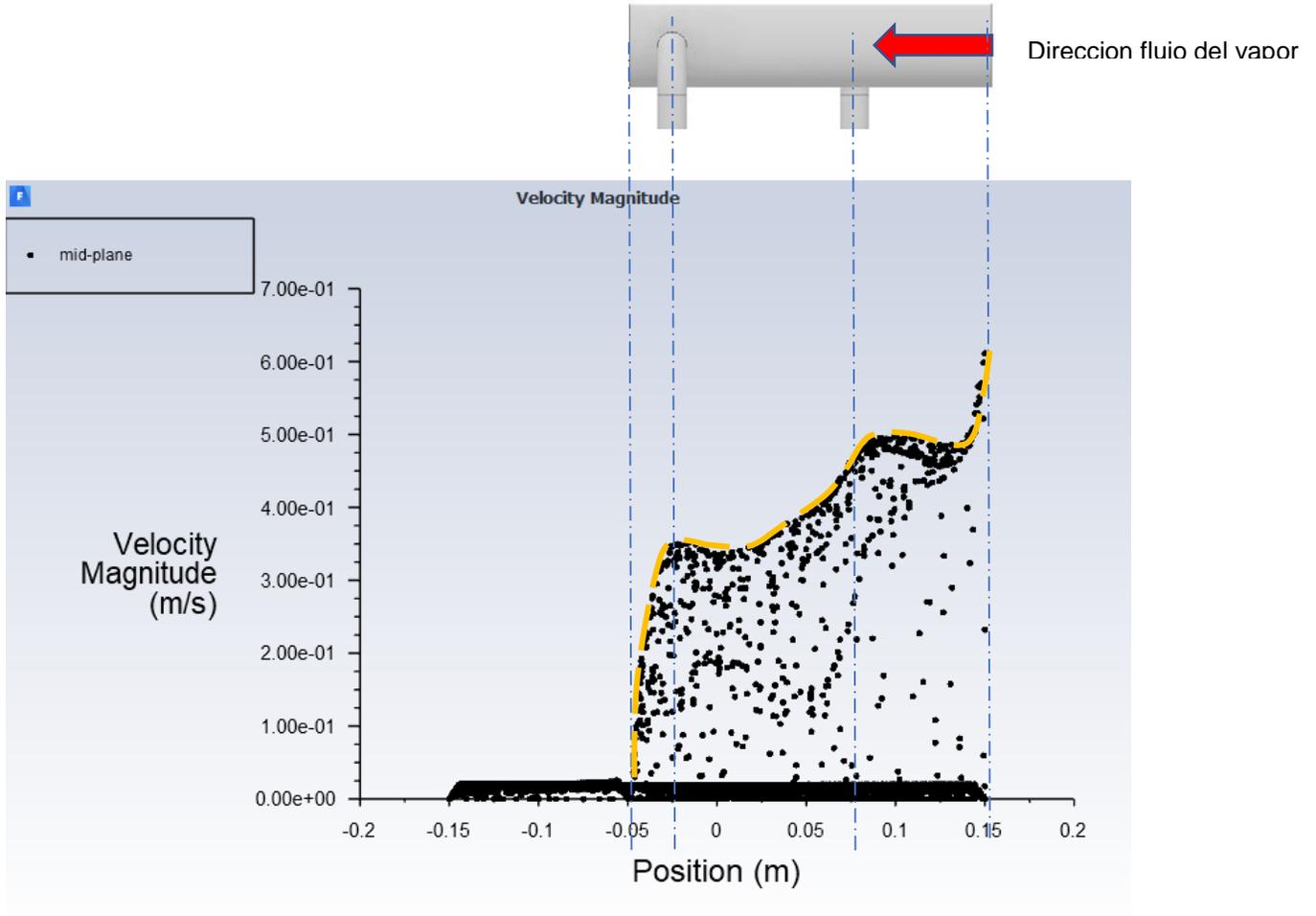


Figura 84 - Distribución de velocidades en el plano 3-3

En la figura 84 es posible reconocer la velocidad punta del perfil de velocidades sobre el diámetro de la tubería sobre el plano 3-3, en la parte inferior se reconoce la velocidad del flujo en el medio poroso.

Capítulo 6

6. Análisis de Costos y Selección de diseño

En el siguiente capítulo se presentará un análisis de los costos necesarios para la fabricación de cada una de las alternativas propuestas en el capítulo 4. Esto con el fin de conocer el valor total que se tendría que invertir para cada uno de los 3 diseños planteados.

Para conocer los costos de los materiales se realizaron 3 cotizaciones para validar los precios promedio de los materiales requeridos.

6.1 Materiales y procesos requeridos para la alternativa 1

La alternativa 1 está diseñada con un material principal conocido como polieterecetona o (PEEK) este material se encuentra en varias presentaciones para nuestro caso de diseño se requieren perfiles tubulares (Ver figura 36).

Este material no es comercializado directamente por ningún proveedor en Colombia y de ser la alternativa seleccionada se debe realizar la importación de este.

Este material es comercializado por una empresa alemana con sede en Brasil llamada Ensinger, esta empresa se dedica a la producción de plásticos de alto rendimiento para usos de ingeniería.

La alternativa 1 también requiere accesorios roscados en acero inoxidable como codos de 90° y tapones con rosca npt.

Para realizar el conexionado del sistema y debido a que este material no se puede soldar ni usar algún tipo de pegamento el proceso que se debe llevar a cabo es mecanizar las tuberías de PEEK y las conexiones serán uniones roscadas.

TECAPEEK Tubes

	TECAPEEK natural Polymer: PEEK Density: 1.31 g/cm ³ Colour: beige opaque																	
Diameter Outer [mm] →	16	20	25	30	36	40	45	50	56	60	65	70	75	80	85	90	100	110
Diameter Inner [mm] ↓	[kg/m]																	
8	0.239																	
10	0.362																	
15	0.239	0.483	0.779															
18	0.384	0.680																
20	0.603	1.09	1.42															
25	0.375	0.871	1.20	1.66	2.17	2.92	3.42	4.14	4.87	5.65	6.48	7.52	8.47	10.51				
30	0.926	1.90	2.64	3.15	3.87	4.60	5.38	6.21	7.27	8.21	10.26							
35	0.598	1.06	2.32															
36			1.50															
40			0.678	1.19	1.94	2.45	3.17	3.90	4.68	5.52	6.60	7.55	9.59					
45			0.758	1.52	2.02	2.75	3.48	4.26	5.09	6.19	7.14	9.18						
50						1.54	3.00	3.78	4.61	5.73	6.67	8.72	10.97					
56									3.97	5.10	6.05	8.09						
60								1.88	3.50	4.64	5.59	7.63	9.88					
65									4.02	4.96	7.01	9.26						
70										2.17	4.29	6.34	8.59					
80											2.79	4.83	7.08					
90												5.37						
Tolerance Outer [mm]			+0.4	+1.1		+0.6	+2.0	+0.8	+2.5		+0.8	+3.0	+1.2	+3.6				
Tolerance Inner [mm]			-1.1	-0.4		-2.0	-0.6	-2.5	-0.8		-3.0	-0.8	-5.0	-1.6				

Figura 85 - Catalogo de tuberías PEEK (Ensinger)

6.1.1 Costos de materiales y fabricación alternativa 1.

COSTOS ALTERNATIVA 1 - RASTRILLO PEEK						
ITEM	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	PESO (kg)	CANT	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	TUBERIA EXT Ø70 mm - INT Ø50 mm	PEEK	7,6	10	\$ 900.000,00	\$ 68.400.000,00
2	TUBERIA EXT Ø25 mm - INT Ø18 mm	PEEK	0,19	200	\$ 900.000,00	\$ 34.200.000,00
3	TAPON Ø1/2" NPT	INOX		200	\$ 3.000,00	\$ 600.000,00
4	CODO 90° Ø1/2 NPT	INOX		200	\$ 3.000,00	\$ 600.000,00
5	FABRICACION			10	\$ 500.000,00	\$ 5.000.000,00
					TOTAL	\$ 108.800.000,00

Tabla 11 - Costos de materiales y fabricación alternativa 1.

Nota:

La tubería en PEEK tiene un costo de 257 UDS el kilogramo y debido a que la tasa representativa del dólar varia constantemente se asume un precio de venta promedio de \$3500 COP por cada dólar es decir un precio aproximado de \$900.000 COP el kilogramo.

6.2 Materiales y procesos requeridos para la alternativa 2

La alternativa 2 se diseñó con tuberías en acero galvanizado y una camisa para el inyector en PEEK el mismo material mencionado en la sección 6.1. Las tuberías de acero galvanizado son comercializadas por bastantes compañías en Colombia se tomó como referencia los precios manejados por dos proveedores de tuberías y accesorios, ferretería Reina y Tuvalrep ambas empresas localizadas en la ciudad de Bogotá.

La alternativa 2 requiere fabricaciones de taller como soldaduras y mecanizados para realizar la conexión entre el colector y los inyectores (Ver figura 41).

6.2.1 Costos de materiales y fabricación alternativa 2.

COSTOS ALTERNATIVA 2 - RASTRILLO GALVANIZADO						
ITEM	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	LONG (m)	CANT	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	TUBERIA Ø1-1/2" SCH 40	ASTM A-53 Gr.B - GALV	6	5	\$ 58.100,00	\$ 1.743.000,00
2	TUBERIA Ø1/2" SCH 40	ASTM A-53 Gr.B - GALV	6	20	\$ 18.300,00	\$ 2.196.000,00
3	TUBERIA EXT Ø35 mm - INT Ø25 mm	PEEK	0,374	200	\$ 900.000,00	\$ 67.320.000,00
4	UNION SOCKET WELD	ASTM A-105 - GALV		10	\$ 5.000,00	\$ 50.000,00
5	FABRICACION			10	\$ 300.000,00	\$ 3.000.000,00
					TOTAL	\$ 74.309.000,00

Tabla 12 - Costos de materiales y fabricación alternativa 2.

6.3 Materiales y procesos requeridos para la alternativa 3

La alternativa 3 se diseñó con tuberías en acero inoxidable y un casquillo giratorio fabricado en tubería inoxidable de ornamentación, Las tuberías de acero inoxidable son comercializadas por bastantes compañías en Colombia, se tomó como referencia los precios manejados por dos proveedores de tuberías y accesorios, ferretería Reina y Wesco ambas empresas localizadas en la ciudad de Bogotá.

La alternativa 3 requiere fabricaciones de taller como soldaduras y ensamblado (Ver figura 46).

6.3.1 Costos de materiales y fabricación alternativa 3.

COSTOS ALTERNATIVA 3 - RASTRILLO INOXIDABLE						
ITEM	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	LONG (m)	CANT	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	TUBERIA Ø1-1/2" SCH 40	ASTM A-312 - INOX	6	5	\$ 56.981,00	\$ 1.709.430,00
2	TUBERIA Ø1/2" SCH 40	ASTM A-312 - INOX	6	20	\$ 20.512,00	\$ 2.461.440,00
3	TUBERÍA ORNAMENTACIÓN Ø1"	ASTM A554-13 - INOX	6	20	\$ 18.500,00	\$ 2.220.000,00
4	UNION SOCKET WELD	ASTM A-192 - INOX		10	\$ 8.000,00	\$ 80.000,00
5	FABRICACIÓN			10	\$ 800.000,00	\$ 8.000.000,00
					TOTAL	\$ 14.470.870,00

Tabla 13 - Costos de materiales y fabricación alternativa 3.

6.4 Comparativa de Alternativas

La fabricación de un juego de rastrillos completo para una cama de tierra de 30 metros le cuesta a Flexport aproximadamente \$4.900.000 anualmente, ya que es el tiempo de durabilidad de los rastrillos actuales, se procede a calcular la tasa interna de retorno (TIR) y el valor presente neto (VPN) para cada una de las alternativas y validar su viabilidad en términos financieros.

Para calcular los ingresos que tendrá flexport año tras año se definió que las 3 alternativas van a tener una durabilidad igual o mayor a los 5 años, también se estima que los costos de materiales y fabricación aumenten un 5% cada año y ese valor sería el costo que flexport ya no tendría, es decir que lo que era un gasto para la empresa año tras año se convierte en un ingreso.

Para calcular la tasa interna de retorno TIR usaremos la función de Excel =TIR (A2:A6).

Alternativa 1 - PEEK	
Inversión inicial	-\$108.800.000,00
1 año	\$4.900.000,00
2 año	\$5.145.000,00
3 año	\$5.402.250,00
4 año	\$5.672.362,50
5 año	\$5.955.980,63
TIR	-33%
VPN	\$0,00

Tabla 14 - TIR y VPN para la alternativa 1.

Alternativa 2 - GALV	
Inversión inicial	-\$74.309.000,00
1 año	\$4.900.000,00
2 año	\$5.145.000,00
3 año	\$5.402.250,00
4 año	\$5.672.362,50
5 año	\$5.955.980,63
TIR	-26%
VPN	-\$0,00

Tabla 15 - TIR y VPN para la alternativa 2.

Alternativa 3 - INOX	
Inversión inicial	-\$14.470.870,00
1 año	\$4.900.000,00
2 año	\$5.145.000,00
3 año	\$5.402.250,00
4 año	\$5.672.362,50
5 año	\$5.955.980,63
TIR	24%
VPN	\$0,00

Tabla 16 - TIR y VPN para la alternativa 3.

La TIR es un indicador de viabilidad o no de un proyecto, si el valor calculado nos da como resultado un valor positivo en porcentaje este indica que la inversión realizada será recuperada.

Para las tres alternativas planteadas la única que cumple dicho requisito es la alternativa número 3, la cual consiste en la fabricación de los rastrillos en acero inoxidable con casquillo giratorio.

Capítulo 7

7. Análisis QFD

Las siglas QFD significan “Quality Function Deployment” que quiere decir despliegue de la función de calidad esta herramienta se utiliza para transmitir que desean los clientes y como satisfacer su necesidad, por medio de este método se darán las calificaciones por parte de FLEXPOR y los criterios de diseño que se utilizarán para cumplir de la mejor manera las expectativas de este.

7.1 Requerimientos del Cliente (Flexport)

Requerimientos de funcionalidad.

- El diseño deberá garantizar la desinfección de la misma manera que el diseño actualmente en funcionamiento.
- El diseño deberá tener una duración mayor a 1 año por motivos de corrosión de sus partes al estar expuesto a condiciones de humedad y altas temperaturas.
- El diseño deberá tener un peso menor de 35 kg.
- El diseño deberá garantizar la no obstrucción del paso de vapor en los agujeros del inyector.

Requerimientos de Coste

- Bajo coste de materia prima.
- Bajo coste de fabricación.
- Bajo coste de operación.
- Bajo coste de mantenimiento.

Requerimientos de seguridad.

- Seguridad operativa.
- Ergonomía de operación.

7.2 Análisis de Alternativas de diseño

Requerimientos del cliente

Se realizó una tabla para identificar las prioridades del cliente respecto al posible diseño que reemplazará al sistema actual con 3 principios fundamentales los cuales son Funcionalidad, Coste y seguridad valorándose de 1 a 5, donde 5 será la mayor puntuación y especifica un requerimiento fundamental del diseño.

TABLA DE REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE	
	Prioridad
Funcionalidad	
El diseño deberá garantizar la desinfección de la misma manera que el diseño actualmente en funcionamiento.	5
El diseño deberá tener una duración mayor a 1 año por motivos de corrosión de sus partes al estar expuesto a condiciones de humedad y altas temperaturas.	5
El diseño deberá tener un peso menor de 35 kg.	3
El diseño deberá garantizar la no obstrucción del paso de vapor en los agujeros del inyector.	5
Coste	
Bajo costo de materia prima.	4
Bajo costo de fabricación.	4
Bajo coste de operación.	4
Bajo coste de mantenimiento.	4
Requerimientos de Seguridad.	
Seguridad Operativa	5
Ergonomía de operación	4

Tabla 17 - Requerimientos de cliente y su prioridad.

Requerimientos de Diseño y características técnicas

Los requerimientos de diseño son aquellos que el diseñador define con el cliente para que este sea funcional y cumpla los requerimientos técnicos necesarios para entrar en operación en nuestro caso son los siguientes.

1. El sistema debe conducir el vapor desde la caldera hacia el terreno por medio de perfiles tubulares.
2. Los rastrillos deben ser fabricados en materiales que soporten temperaturas mayores a los 100°C.
3. Los rastrillos deben ser fabricados en tuberías que soporten presiones mayores a los 100 psi.
4. Los rastrillos deben ser fabricados en materiales con una buena resistencia mecánica ya que son de uso continuo.
5. Los rastrillos deben ser fabricados en materiales con una buena resistencia a la corrosión o el óxido debido a que están sometidos a condiciones de humedad y las altas temperaturas a las que se encuentra en terreno.
6. Se debe encontrar la manera de disminuir el peso actual de 35 kg de un rastrillo para mejorar su ergonomía y seguridad de operación.
7. Se debe encontrar la manera de impedir la obstrucción en el paso del vapor a la salida de los inyectores debido al ingreso de tierra en los agujeros de salida.
8. Un diseño que sea fácil de ensamblar.
9. Un diseño que sea fácil de desmontar.
10. Amigable con el medio ambiente.

7.2.1 Interrelación entre requerimientos del cliente y los requerimientos técnicos.

Para valorar la interrelación entre los requerimientos del cliente y los de diseño se definió una relación fuerte, relación media o relación baja. Donde la relación fuerte se calificará con 5 puntos, media con 3 puntos y baja con 1 punto.

Tipo	Calificación
Relación fuerte	5
Relación Media	3
Relación Baja	1

Tabla 18 - Relación entre los requerimientos del cliente y diseño.

Para realizar una evaluación de importancia damos una calificación de acuerdo al tipo de relación e identificamos cuales son los requerimientos técnicos más importantes en los cuales debemos enfocarnos para tener un diseño que cumpla todos los requerimientos tanto del cliente como de diseño.

QUE	COMO	Perfiles tubulares	Materiales para altas temperaturas	Materiales para altas presiones	Resistencia mecánica	Resistencia a la corrosión	Liviano	inyector sin obstrucciones	Fácil de ensamblar	Fácil de Desmontar	Amigable con el medio ambiente
		Requerimientos	Prioridad								
El diseño deberá garantizar la desinfección de la misma manera que el diseño actualmente en funcionamiento.	5	5	5	5	5	5	0	0	0	0	0
El diseño deberá tener una duración mayor a 1 año por motivos de corrosión de sus partes al estar expuesto a condiciones de humedad y altas temperaturas y el uso continuo.	5	0	3	3	5	5	0	0	0	0	0
El diseño deberá tener un peso menor de 35 kg.	3	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0
El diseño deberá garantizar la no obstrucción del paso de vapor en los agujeros del inyector.	5	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0
Bajo costo de materia prima.	4	3	5	5	5	5	5	3	0	0	3
Bajo costo de fabricación.	4	1	3	3	3	3	0	5	3	3	0
Bajo coste de operación.	4	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
Bajo coste de mantenimiento.	4	0	5	5	5	5	5	5		0	0
Seguridad Operativa	5	0	0	0	0	0	3	3	5	5	5
Ergonomía de operación	4	0	0	0	0	0	5	1	5	5	0
ABSOLUTO		41	92	92	102	102	102	96	57	57	37
RELATIVO		5,27%	11,83%	11,83%	13,11%	13,11%	13,11%	12,34%	7,33%	7,33%	4,76%

Tabla 19 - Matriz de relación entre los requerimientos del cliente y los criterios de diseño.

Para el cálculo del valor absoluto de los requerimientos de diseño se multiplicó la columna de calificación de prioridad indicada por el cliente y la calificación de relación que se le asignó a cada una de estas y posteriormente se realizó la sumatoria.

Para el cálculo del valor relativo se realizó la sumatoria de cada uno de los resultados del valor absoluto y posteriormente se dividió el valor absoluto de cada requerimiento de diseño entre la sumatoria.

Con la tabla anterior obtenemos una evaluación de importancia absoluta y relativa que nos indica cuales son los requerimientos técnicos principales que el diseño debe garantizar.

Los requerimientos que se deben cumplir en orden de importancia son los siguientes.

1. Resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y que el diseño sea liviano.
2. Inyector sin obstrucciones.
3. Materiales que soporten altas temperaturas y presiones.
4. Fácil de ensamblar y desmontar.
5. Perfiles tubulares.
6. Amigable con el medio ambiente.

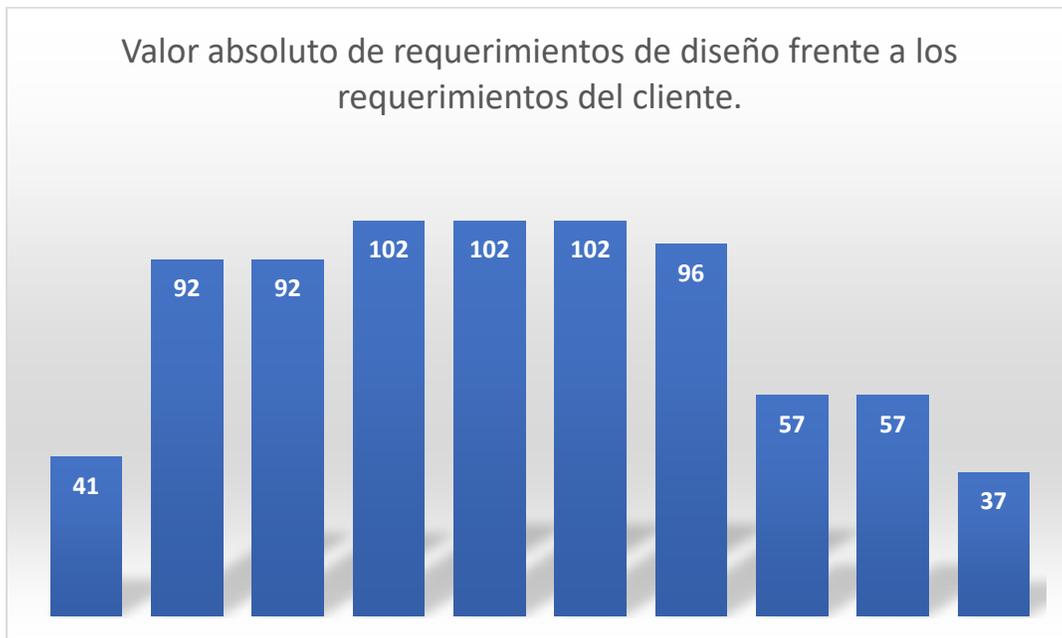


Figura 86 - Valores absolutos req. de diseño vs los req. del cliente.

7.2.2 Interrelación entre requerimientos del cliente y las alternativas de diseño propuestas.

Para valorar la interrelación entre los requerimientos del cliente y las alternativas de diseño valorándose de 1 a 5, donde 5 será la mayor puntuación y 1 la menor. Donde de acuerdo a nuestro criterio se le da una puntuación si la alternativa cumple con los requerimientos del cliente.

QUE	COMO	EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS		
		Prioridad	PEEK	GALV
Requerimientos				
El diseño deberá garantizar la desinfección de la misma manera que el diseño actualmente en funcionamiento.	5	5	3	5
El diseño deberá tener una duración mayor a 1 año por motivos de corrosión de sus partes al estar expuesto a condiciones de humedad y altas temperaturas y el uso continuo.	5	5	4	5
El diseño deberá tener un peso menor de 35 kg.	3	5	2	2
El diseño deberá garantizar la no obstrucción del paso de vapor en los agujeros del inyector.	5	5	4	5
Bajo costo de materia prima.	4	1	5	4
Bajo costo de fabricación.	4	1	4	3
Bajo coste de operación.	4	4	2	2
Bajo coste de mantenimiento.	4	1	4	4
Seguridad Operativa	5	4	3	3
Ergonomía de operación	4	4	3	3
	ABSOLUTO	154	148	160
	RELATIVO	33,33%	32,03%	34,63%

Tabla 20 - Matriz de relación entre los requerimientos del cliente y la puntuación de las alternativas.

Nota: Para el cálculo de los valores absolutos y relativos se realizó el mismo procedimiento que para la tabla 19.

8. Conclusiones

Se realizó el diagnóstico técnico mediante una visita en la cual se determinó el funcionamiento del sistema de desinfección que utiliza Flexport en sus cultivos de flores, se identificó las condiciones iniciales del vapor utilizado para la desinfección como flujo másico entre otros, además de las propiedades termodinámicas de este gracias a los datos de iniciales de temperatura y presión provistos por el departamento de ingeniería de Flexport.

Se diseñaron tres alternativas para reemplazar el diseño actual de rastrillos que actualmente usa Flexport en sus camas de tierra para la desinfección.

Mediante un experimento se logró la caracterización de un medio poroso en nuestro caso la tierra utilizada por Flexport, el experimento que se explica en la sección 3.3 del documento nos permitió encontrar los coeficientes de resistencia viscosa e inercial que se presentan en el terreno al intentar pasar un fluido por este medio ya estos datos no se encuentran tabulados ni existe una norma que rijan dicho procedimiento. Para obtener datos confiables en el experimento fue necesario tecnificar el montaje por medio de bombas, válvulas, sensores y tarjetas de datos para reducir de manera significativa el error al momento de tomar los datos; se logró crear una técnica y metodología confiable que permita caracterizar un medio poroso, siendo más específicos cualquier terreno disponible.

A partir de varias alternativas de diseño, análisis de costos y una matriz de calidad se definió que la mejor alternativa es la número 3, ya que su tasa interna de retorno TIR es de un 24% a los 5 años a partir de la inversión inicial, además el análisis QFD refleja que la alternativa 3 cumple con los requerimientos del cliente y los requerimientos de diseño. Aunque es importante precisar que las tres alternativas cumplen en su gran mayoría con los requisitos tanto del cliente como los de diseño, ya que sus ponderados tanto absolutos y relativos son muy similares, no se llevan ni un 2% de diferencia, esto se debió a que el gran factor diferencial fueron los costos tanto de materia prima como de fabricación entre las alternativas.

También se concluyó que la alternativa 1 a pesar de tener un costo elevado de fabricación y el retorno de su inversión se vería reflejado a un plazo aproximado de 20 años, esta permitiría implementar un sistema con un material novedoso en Colombia ya que cuenta con características mecánicas de un gran desempeño y un peso liviano para su operación,

permitiendo que los trabajadores de Flexport manipulen de manera más fácil los rastrillos de inyección de vapor, esto tal vez suceda cuando materiales como el PEEK sean fabricados en el país o sus precios sean más asequibles para la industria colombiana.

Se demostró por medio de una simulación del software ANSYS desarrollada en la sección 5 del documento que el vapor fluye de manera homogénea por todo el medio poroso “tierra” y que la temperatura del terreno se encuentra a 84°C aproximadamente un valor muy cercano al medido por Flexport en campo el cual es de 90°C.

Se verificó el enmallado por medio de un análisis estadístico que refleja la calidad de los datos obtenidos, se garantiza que el 95% de los elementos bajo una distribución estándar se encontrarán con un grado de calidad entre 0,835 y 0,836; aunque siempre es posible refinar la malla para obtener una calidad de elemento de 1, tratar de alcanzar valores de calidad de elemento superiores a 0,8 en un 95% de los datos incrementará de manera exponencial el tiempo de máquina sin obtener resultados perceptiblemente de mejor calidad.

9. Bibliografía

- AGUILERA, N. C. (2015). *Análisis de sistemas de convección en el tratamiento térmico de suelos o sustratos agrícolas para su desinfección en continuo*.
- ANSYS, I. (2017). *ANSYS Fluent User's Guide*.
- BARTOK, J. W. (1994). *Steam Sterilization of Growing Media*.
- BECKWITH, T. G., MARANGONI, R. D., & LIENHARD, J. H. (1993). *Mechanical Measurements* (5 ed.). Londres: Addison-Wesley.
- BUDYNAS, R. G., & NISBETT, J. K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (8 ed.). Mc Graw Hill.
- CENGEL, Y. A. (2012). *Termodinámica* (7 ed.). Madrid: Mc Graw Hill.
- CORELLA HURTADO, A. (1993). *Aspectos generales de la producción de flores en Colombia*.
- DURAN, L. F. (2017). *Análisis y desarrollo de la simulación termo-hidráulica de flujo multifase en CFD con ANSYS Fluent*. Madrid.
- FAO. (s.f.). *Alternativas no químicas para la desinfección del suelo*. Obtenido de <http://www.fao.org/3/Y1806S/y1806s08.htm#TopOfPage>
- LANGHANS, R. W. (1990). *Greenhouse Management*. Ithaca NY: Halcyon Press.
- LEON, J. D. (2010). *Manual técnico Diseño y Cálculos en redes de vapor*.
- MERRITT, C. (2016). *Process steam systems*. Canada: Wiley.
- MOTT, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos* (6 ed.). Mexico: Pearson.
- NIELD, D. A., & BEJAN, A. (2006). *Convection in Porous Media* (5 ed.). Springer.
- RUNIA, W. T. (2000). *Steaming methods for soils and substrates*. Obtenido de <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2000.532.13>
- Salamanco, V. (6 de Enero de 2015). *La red del campo chacra*. Obtenido de <https://www.revistachacra.com.ar/nota/desinfeccion-a-vapor/>
- SARCO, S. (1998). *Distribución de vapor*.
- STPS. (2010). *Desinfección de suelos y sustratos agrícolas*. Obtenido de http://www.stps.gob.mx/bp/secciones/dgsst/publicaciones/prac_seg/prac_chap/PS%20Desinfección%20de%20Suelos%20y%20Sustratos%20Agrícolas.pdf
- VAFAI, K. (2005). *Handbook of Porous Media* (2 ed.). Taylor & Francis.

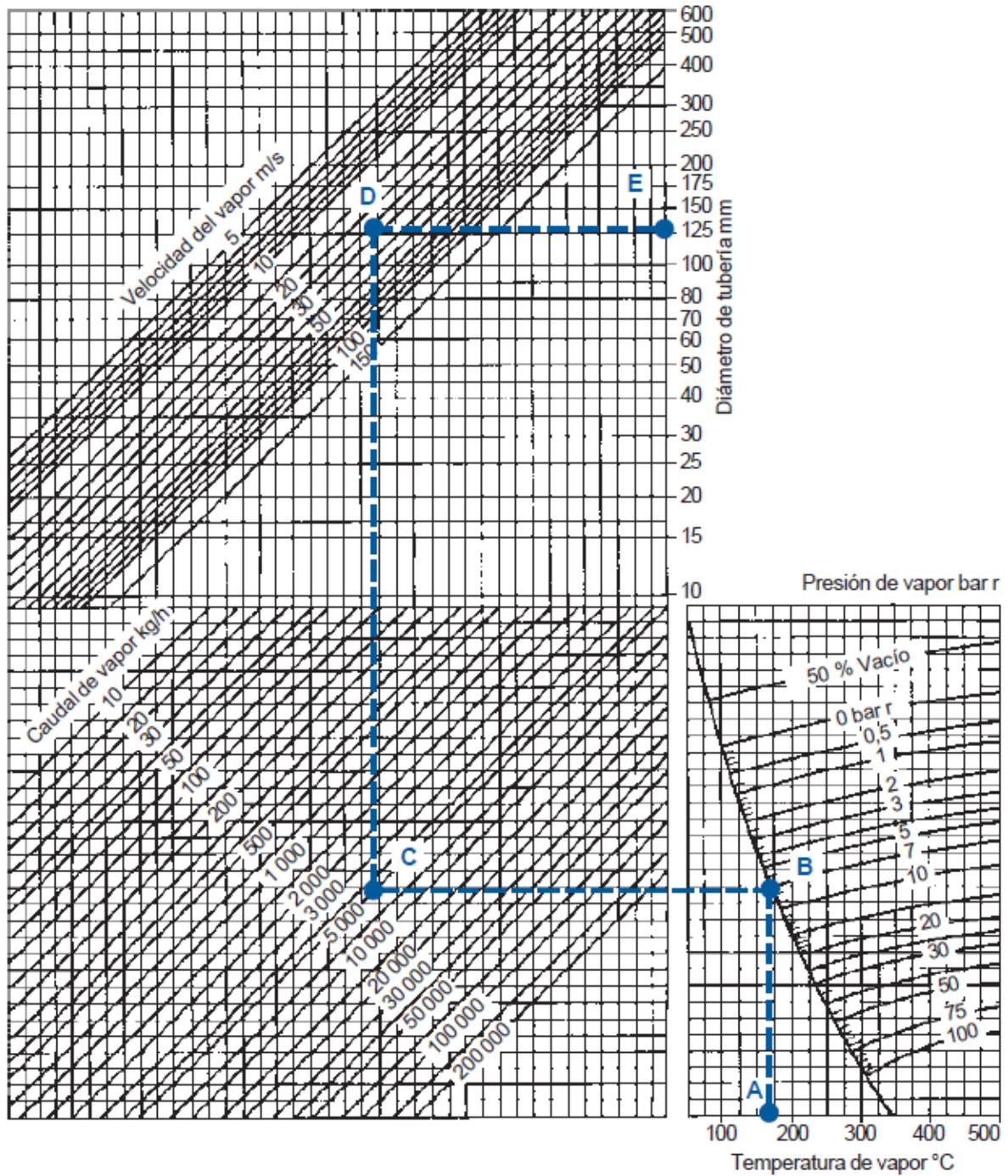
WALLS, I. G. (1992). *The complete book of the greenhouse*. (5 ed.). Londres: Ward Lock.

10. Anexos

10.1 Anexo A – Tablas de Vapor

Presión absoluta bara	Temperatura °C	Entalpia específica kWh/kg	Densidad kg/m ³	Volumen específico m ³ /kg	Viscosidad dinámica cP	Viscosidad cinemática cSt	Calor específico kWh/kg K
0,1	45,81	0,717746	0,068164	14,670558	0,010486	153,829602	0,0005393
0,2	60,06	0,724708	0,130751	7,648151	0,010936	83,643381	0,0005462
0,3	69,10	0,729042	0,191257	5,228560	0,011231	58,720149	0,0005515
0,4	75,86	0,732236	0,250431	3,993110	0,011454	45,737808	0,0005559
0,5	81,32	0,734781	0,308628	3,240149	0,011636	37,703850	0,0005599
0,6	85,93	0,736904	0,366055	2,731829	0,011791	32,212043	0,0005636
0,7	89,93	0,738727	0,422851	2,364899	0,011927	28,205490	0,0005670
0,8	93,49	0,740327	0,479113	2,087189	0,012047	25,144926	0,0005704
0,9	96,69	0,741754	0,534914	1,869458	0,012156	22,725515	0,0005736
1	99,61	0,743042	0,590311	1,694023	0,012256	20,761550	0,0005766
2	120,21	0,751734	1,129006	0,885735	0,012963	11,482172	0,0006042
3	133,53	0,756914	1,650749	0,605785	0,013423	8,131467	0,0006283
4	143,61	0,760571	2,162668	0,462392	0,013771	6,367790	0,0006501
5	151,84	0,763363	2,668058	0,374804	0,014055	5,267986	0,0006702
6	158,83	0,765594	3,168816	0,315575	0,014297	4,511649	0,0006889
7	164,95	0,767430	3,666173	0,272764	0,014507	3,957123	0,0007065
8	170,41	0,768973	4,160988	0,240328	0,014696	3,531747	0,0007231
9	175,36	0,770288	4,653897	0,214874	0,014866	3,194261	0,0007390
10	179,89	0,771422	5,145386	0,194349	0,015022	2,919431	0,0007542
11	184,07	0,772408	5,635842	0,177436	0,015166	2,690922	0,0007688
12	187,96	0,773269	6,125579	0,163250	0,015300	2,497678	0,0007830
13	191,61	0,774026	6,614856	0,151175	0,015425	2,331934	0,0007968
14	195,05	0,774693	7,103894	0,140768	0,015544	2,188072	0,0008103
15	198,30	0,775281	7,592880	0,131702	0,015656	2,061923	0,0008235
16	201,38	0,775800	8,081978	0,123732	0,015762	1,950325	0,0008364
17	204,31	0,776259	8,571331	0,116668	0,015864	1,850835	0,0008491
18	207,12	0,776663	9,061065	0,110362	0,015961	1,761532	0,0008616
19	209,81	0,777018	9,551295	0,104698	0,016055	1,680889	0,0008740
20	212,38	0,777329	10,042122	0,099581	0,016144	1,607671	0,0008862
21	214,87	0,777600	10,533640	0,094934	0,016231	1,540870	0,0008983
22	217,26	0,777834	11,025935	0,090695	0,016315	1,479655	0,0009103
23	219,56	0,778035	11,519083	0,086812	0,016396	1,423334	0,0009222
24	221,80	0,778204	12,013158	0,083242	0,016474	1,371327	0,0009340
25	223,96	0,778345	12,508228	0,079947	0,016550	1,323144	0,0009457
26	226,05	0,778460	13,004356	0,076897	0,016624	1,278364	0,0009573
27	228,09	0,778549	13,501600	0,074065	0,016696	1,236630	0,0009689
28	230,06	0,778615	14,000018	0,071428	0,016767	1,197633	0,0009805
29	231,99	0,778660	14,499662	0,068967	0,016836	1,161104	0,0009920
30	233,86	0,778685	15,000582	0,066664	0,016903	1,126809	0,0010034
31	235,68	0,778690	15,502828	0,064504	0,016969	1,094543	0,0010148
32	237,46	0,778677	16,006444	0,062475	0,017033	1,064127	0,0010262
33	239,20	0,778647	16,511476	0,060564	0,017096	1,035400	0,0010376
34	240,90	0,778601	17,017966	0,058761	0,017158	1,008222	0,0010490
35	242,56	0,778540	17,525955	0,057058	0,017219	0,982468	0,0010603
36	244,19	0,778464	18,035484	0,055446	0,017278	0,958024	0,0010717
37	245,78	0,778374	18,546592	0,053918	0,017337	0,934790	0,0010830
38	247,33	0,778271	19,059316	0,052468	0,017395	0,912677	0,0010944
39	248,86	0,778155	19,573694	0,051089	0,017452	0,891601	0,0011058
40	250,36	0,778027	20,089761	0,049777	0,017508	0,871490	0,0011172
41	251,83	0,777887	20,607553	0,048526	0,017563	0,852278	0,0011286
42	253,27	0,777737	21,127106	0,047333	0,017618	0,833902	0,0011400
43	254,68	0,777575	21,648453	0,046193	0,017672	0,816308	0,0011514
44	256,07	0,777403	22,171628	0,045103	0,017725	0,799446	0,0011629
45	257,44	0,777221	22,696666	0,044059	0,017778	0,783269	0,0011744

Gráfico para dimensionar tuberías para vapor saturado y vapor recalentado (método de la velocidad)



Factor de conversión para hallar el flujo másico a partir de la potencia de una caldera en BHP.

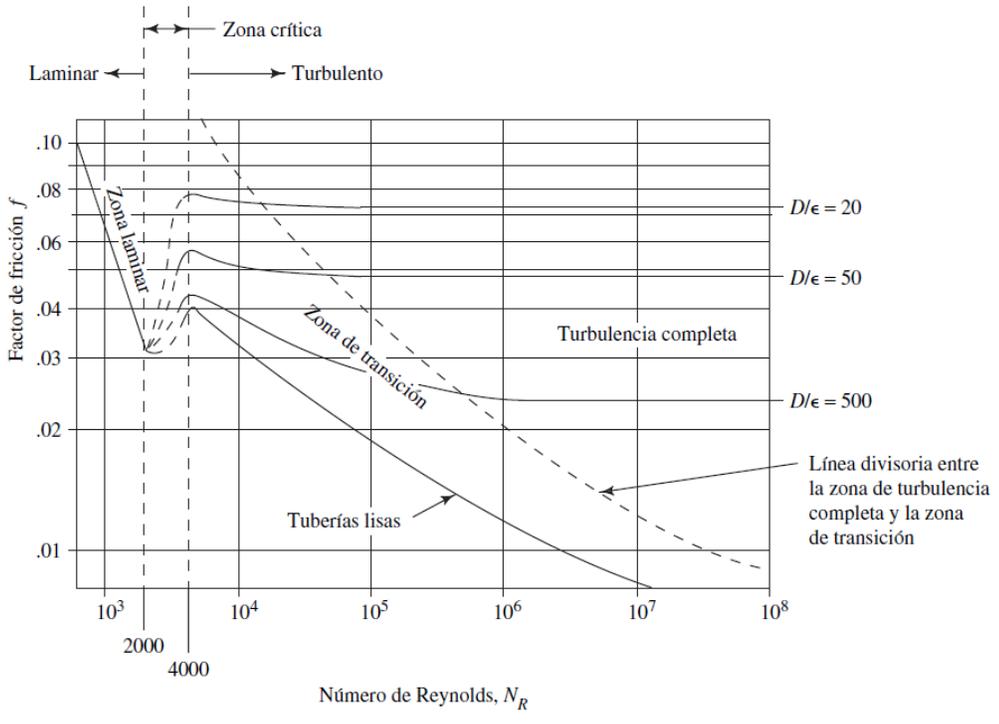
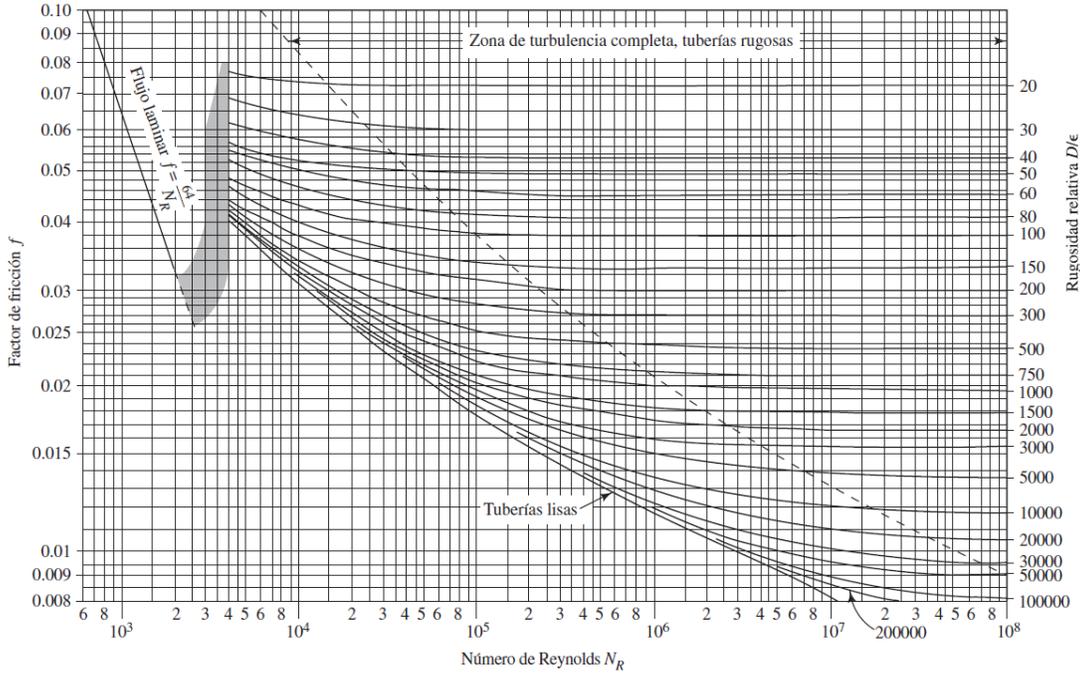
CONVERSION FACTORS

Multiply	By	To Obtain
BHP	33,479	Btu / hr
BHP	34.5	Lb / hr
BHP	0.069	GPM
BHP	139	EDR
EDR	0.000496	GPM
Lb / hr Steam	0.002	GPM
Lb / hr Condensate	960	Btu / hr
Lb / hr Condensate	4	EDR
PSI	2.31	Feet of Water (TDH)
Gallon of Water	8.345	Lbs. of Water
Ft ³	7.48	Gallons of Water
GPM	12,000	Tons of Refrigeration
To Obtain	By	Divide

METRIC CONVERSION FACTORS

Multiply	By	To Obtain
Inches	2.54	Centimeters
Feet of Water	2.24165	Centimeters of Mercury
Ft ³	28.32	Liters
In ³	16.39	Cm ³
Gallons	3.7853	Liters
GPM	0.06308	Liters / sec
Btu / hr	.252	Kilo-calories / hr
PSI	.0703	Kilogram / cm ²
To Obtain	By	Divide

10.2 Anexo B – Diagrama de Moody



10.3 Anexo C – Catálogos de Tuberías

Catálogos de tuberías (Acero inoxidable SCH 10)

Diámetro Nominal NPS	Diámetro Externo		SCH 10					
	pg	mm	Grosor	Pared	Presión Int. Trab.		Peso Aprox.	
			pg	mm	PSI	Kg/m	Lb/pie	Kg/m
1/8	.405	10.29	.049	1.24	4270	300	.19	.28
1/4	.540	13.72	.065	1.65	4240	298	.33	.49
3/8	.675	17.15	.065	1.65	3320	233	.42	.63
1/2	.840	21.34	0.83	2.11	3420	240	.67	1.00
3/4	1.050	26.67	.083	2.11	2690	189	.86	1.28
1	1.315	33.40	.109	2.77	2830	199	1.40	2.09
1 1/4	1.660	42.16	.109	2.77	2210	155	1.81	2.69
1 1/2	1.900	48.26	.109	2.77	1920	135	2.09	3.11
2	2.375	60.33	.109	2.77	1520	107	2.64	3.93
2 1/2	2.875	73.03	.120	3.05	1380	97	3.53	5.27
3	3.500	88.90	.120	3.05	1120	79	4.33	6.46
3 1/2	4.000	101.60	.120	3.05	980	69	4.97	7.42
4	4.500	114.30	.120	3.05	867	61	5.61	8.37
6	6.625	168.28	.134	3.40	655	46	9.29	13.85
8	8.625	219.08	.148	3.76	555	39	13.40	19.98
10	10.750	273.05	.165	4.19	495	35	18.70	27.88
NORMA: ASTM A312								
Longitud aprox. 6 mts con costura								

Catálogos de tuberías (Ornamental)

Grado	Diámetro exterior		Espesor (mm)				
	Pulgadas	Milímetros	0,9	1,2	1,5	1,9	2
304							
	4	101,6			Δ		
	3	76,2		Δ	Δ		
	2 1/2	63,5		Δ	Δ		
	2	50,8	Δ	Δ θ α	Δ	Δ	
	1 1/2	38,1	Δ	Δ θ α	Δ		
	1 1/4	31,75		Δ	Δ		
	1	25,4	Δ θ	Δ θ α	Δ θ		
	7/8	22,22		Δ	Δ		Δ
	3/4	19,05		Δ θ α	Δ		
	5/8	15,87	Δ	Δ θ α			
	1/2	12,7	Δ	Δ θ α			
Convenciones:		Δ G 180 - Satinado	θ G 400 - Polish		α G 600 - Brillante		
NORMA: ASTM A554-13							

10.4 Anexo D – Acero Inoxidable.

Ficha técnica del acero inoxidable.

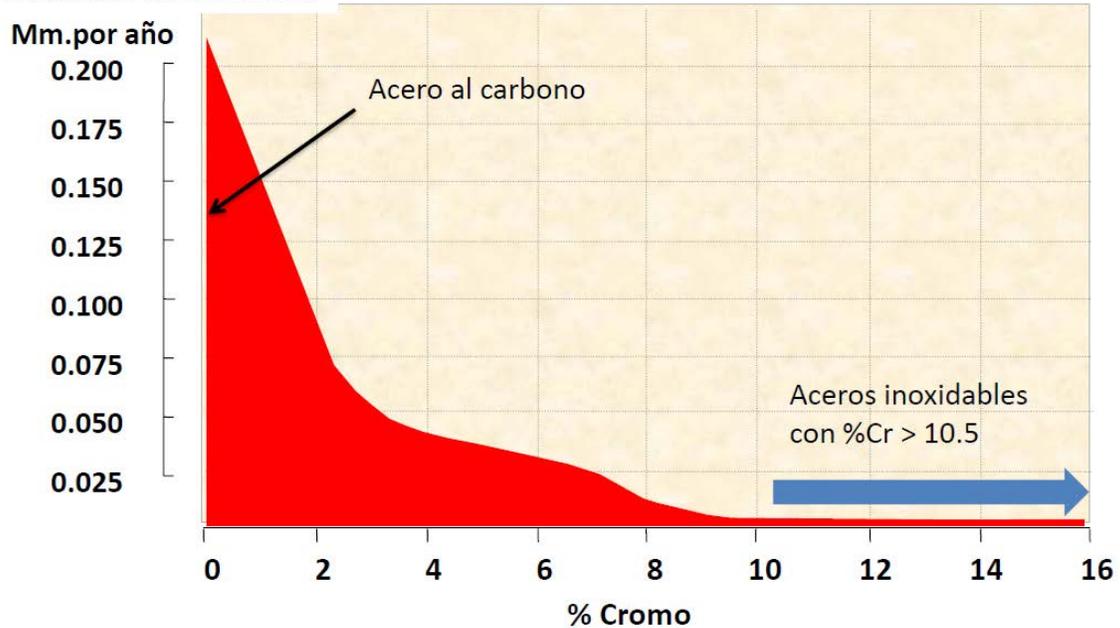
TABLA DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ACERO INOXIDABLE			SERIE 300		
			Acero al Cromo - Níquel	Acero al Cromo - Níquel - Molibdeno	
DESIGNACIÓN	TIPO AISI		304	316	
	COMPOSICIÓN QUÍMICA		C ≤ 0.08%* Si ≤ 1.00% Mn ≤ 2.00% Cr 18% - 20%* Ni 8% - 10,5%*	C ≤ 0.08%* Si ≤ 1.00% Mn ≤ 2.00% Cr 16% - 18%* Ni 10% - 14%* Mo 2% - 2.5%*	
PROPIEDADES FÍSICAS	PESO ESPECÍFICO A 20C (DENSIDAD)	(g/cm ³)	7.9	7.95 - 7.98	
	MÓDULO DE ELASTICIDAD	(N/mm ²)	193,000	193,000	
	ESTRUCTURA		AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	
	CALOR ESPECÍFICO A 20C	(J/Kg K)	500	500	
	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA A 20C/100C	(W/m K)	15 / 16	15 / 16	
	COEFICIENTE DE DILATACIÓN A 100C	(x 10 ⁶ C ⁻¹)	16.0 - 17.30	16.02 - 16.5	
	INTERVALO DE FUSIÓN	(C)	1398/1454	1371/1398	
PROPIEDADES ELÉCTRICAS	PERMEABILIDAD ELÉCTRICA EN ESTADO SOLUBLE RECOCIDO		AMAGNÉTICO 1.008	AMAGNÉTICO 1.008	
	CAPACIDAD DE RESISTENCIA ELÉCTRICA A 20C	(μΩm)	0.72 - 0.73	0.73 - 0.74	
PROPIEDADES MECÁNICAS A 20C	DUREZA BRINELL RECOCIDO HRB/CON DEFORMACIÓN EN FRÍO		130150 / 180330	130185 / -	
	DUREZA ROCKWELL RECOCIDO HRB/CON DEFORMACIÓN EN FRÍO		7088 / 1035	7085 / -	
	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN RECOCIDO / DEFORMACIÓN EN FRÍO	Rm (N/mm ²)	520 - 720 / 540 - 750	540690 / -	
	ELASTICIDAD RECOCIDO / CON DEFORMACIÓN EN FRÍO	Rp (N/mm ²)	210 / 230	205410 / -	
	ELONGACIÓN (A ₅) MIN	(%)	≥ 45		
	RESILIENCIA KCUL / KVL	(J/cm ²)	160 / 180	160 / 180	
PROPIEDADES MECÁNICAS EN CALIENTE	ELASTICIDAD	RP(0.2) A 300C/400C/500C	(N/mm ²)	125 / 97 / 93	140 / 125 / 105
		RP(1) A 300C/400C/500C	(N/mm ²)	147 / 127 / 107	166 / 147 / 127
	LÍMITE DE FLUENCIA A 500C/600C/700C/800C	σ ₁ /10 ³ /t (N/mm ²)	68 / 42 / 14.5 / 4.9	82 / 62 / 20 / 6.5	
TRATAMIENT. TÉRMICOS	RECOCIDO COMPLETO	(OC)	ENFR. RÁPIDO 10081120	ENFR. RÁPIDO 10081120	
	RECOCIDO INDUSTRIAL				
	TEMPLADO		NO ES POSIBLE	NO ES POSIBLE	
	INTERVALO DE FORJA INICIAL / FINAL	(C)	1200 / 925	1200 / 925	
OTRAS PROPIEDADES	FORMACIÓN DE CASCARILLA, SERVICIO CONTINUO / SERVICIO INTERMITENTE		925 / 840	925 / 840	
	SOLDABILIDAD		MUY BUENA	MUY BUENA	
OTRAS PROPIEDADES	MAQUINABILIDAD COMPARADO CON UN ACERO BESSEMER PARA a. B1112		45%	45%	
	EMBUTICIÓN		MUY BUENA	BUENA	

* Son aceptables tolerancias de un 1%

10.5 Anexo E – Resistencia a la corrosión.

Resistencia a la corrosión del acero inoxidable.

Velocidad de Corrosion

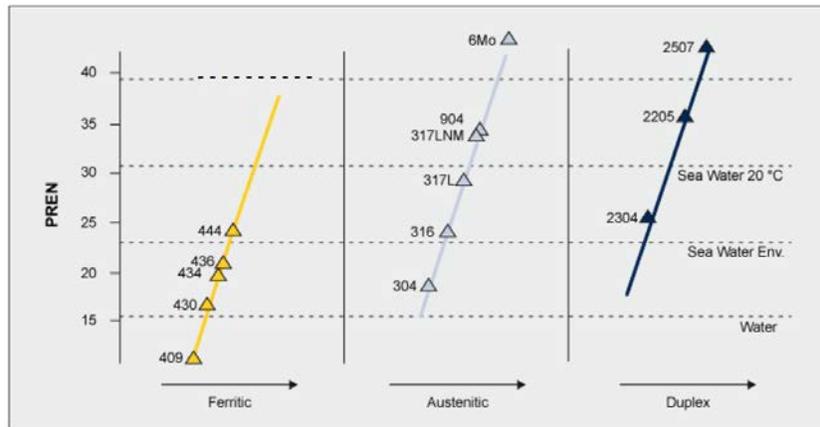


Resistencia a la corrosión por picadura (PREN)

PREN: $Cr + 3.3Mo + 16N$, Donde Cr es el contenido de cromo, Mo contenido de molibdeno y N el contenido de nitrógeno.

EN	AISI	PREN
1.4003	-	10.5 - 12.5
1.4016	430	16.0 - 18.0
1.4301	304	17.5 - 20.8
1.4311	304LN	19.4 - 23.0
1.4401/4	316/L	23.1 - 28.5
1.4406	316LN	25.0 - 30.3
1.4439	317L	31.6 - 38.5
1.4539	-	32.2 - 39.9
1.4362	-	23.1 - 29.2
1.4462	-	30.8 - 38.1
1.4410	-	40
1.4501	-	40

Nota: Cuanto mayor sea el número de PREN mayo será la resistencia.



PREN de aceros inoxidable más comunes.

Average Annual Corrosion Rate (mm/yr)

Metal	Severe Marine**	Severe Marine*	Marine**	Rural*
Type 316	0.0003	0.0001	0.00003	0.00003
Type 304	0.0004	0.0001	0.00008	0.00003
Type 430	0.002	0.0006	0.0004	0.00003
Al 3003	0.019	0.005	0.005	0.00028
Copper	0.025	0.04	0.009	0.00559
Zinc	0.111	NA	0.023	0.0033
Weathering Steel	0.810	1.15	0.212	0.0229
Mild Steel	2.190	0.846	0.371	0.0432

Valores de corrosión de mm/año de IMO (International Molybdenum Association)

10.6 Anexo F – Datos Experimentales.

Datos experimento caracterización del terreno (medio poroso).

Corrida No.	Pase No.	Espesor n [m]	Señal caudal [Hz]	Señal presión [mV]	Caudal Q [l/min]	Velocidad v [m/s]	Presión P [Pa]	Presión corregida Pc [Pa]	ΔQ [l/min]	ΔV [m/s]	Incertidumbre sistemática Bx [Pa]	Incertidumbre aleatoria Px [Pa]	Incertidumbre total Ux [Pa]	Incertidumbre sistemática Bx [m/s]
1	1	0,05	5	88	1,112	2,849E-03	3415	6925	0,000	0,000E+00	292	0	292	0,000E+00
1	1	0,05	6	98	1,230	3,152E-03	3878	7388	0,000	0,000E+00	292	296	416	0,000E+00
1	1	0,05	12	98	1,941	4,974E-03	3878	7388	0,067	1,727E-04	292	2190	2209	1,727E-04
1	1	0,05	17	98	2,534	6,493E-03	3878	7388	0,140	3,577E-04	292	0	292	3,577E-04
1	1	0,05	21	108	3,008	7,707E-03	4340	7850	0,197	5,056E-04	293	0	293	5,056E-04
1	1	0,05	25	137	3,482	8,922E-03	5681	9191	0,255	6,536E-04	293	3503	3516	6,536E-04
1	1	0,05	24	147	3,363	8,618E-03	6143	9653	0,241	6,166E-04	293	1485	1514	6,166E-04
1	1	0,05	25	161	3,482	8,922E-03	6791	10301	0,255	6,536E-04	293	3503	3516	6,536E-04
1	1	0,05	27	186	3,719	9,529E-03	7947	11457	0,284	7,275E-04	294	0	294	7,275E-04
1	1	0,05	34	196	4,548	1,165E-02	8409	11919	0,385	9,864E-04	294	0	294	9,864E-04
1	1	0,05	38	196	5,022	1,287E-02	8409	11919	0,443	1,134E-03	294	2390	2408	1,134E-03
1	1	0,05	40	220	5,259	1,348E-02	9519	13029	0,472	1,208E-03	294	1940	1962	1,208E-03
1	1	0,05	44	235	5,733	1,469E-02	10212	13723	0,529	1,356E-03	295	1424	1454	1,356E-03
1	1	0,05	46	239	5,970	1,530E-02	10397	13908	0,558	1,430E-03	295	1266	1300	1,430E-03
1	1	0,05	47	249	6,089	1,560E-02	10860	14370	0,573	1,467E-03	295	799	852	1,467E-03
1	1	0,05	48	244	6,207	1,591E-02	10629	14139	0,587	1,504E-03	295	652	716	1,504E-03
1	1	0,05	53	264	6,800	1,742E-02	11553	15064	0,659	1,689E-03	295	1047	1088	1,689E-03
1	1	0,05	53	274	6,800	1,742E-02	12016	15526	0,659	1,689E-03	295	1047	1088	1,689E-03
1	1	0,05	52	283	6,681	1,712E-02	12432	15942	0,645	1,652E-03	296	372	475	1,652E-03
1	1	0,05	53	293	6,800	1,742E-02	12894	16404	0,659	1,689E-03	296	1047	1088	1,689E-03
1	1	0,05	53	327	6,800	1,742E-02	14466	17977	0,659	1,689E-03	296	1047	1088	1,689E-03
1	1	0,05	52	342	6,681	1,712E-02	15160	18670	0,645	1,652E-03	297	372	476	1,652E-03
1	1	0,05	52	347	6,681	1,712E-02	15391	18901	0,645	1,652E-03	297	372	476	1,652E-03
1	1	0,05	53	352	6,800	1,742E-02	15622	19133	0,659	1,689E-03	297	1047	1088	1,689E-03
1	1	0,05	53	347	6,800	1,742E-02	15391	18901	0,659	1,689E-03	297	1047	1088	1,689E-03
1	1	0,05	53	347	6,800	1,742E-02	15391	18901	0,659	1,689E-03	297	1047	1088	1,689E-03
1	1	0,05	54	357	6,918	1,773E-02	15854	19364	0,674	1,726E-03	297	0	297	1,726E-03
1	1	0,05	52	362	6,681	1,712E-02	16085	19595	0,645	1,652E-03	297	372	476	1,652E-03
1	1	0,05	53	362	6,800	1,742E-02	16085	19595	0,659	1,689E-03	297	1047	1088	1,689E-03
1	1	0,05	52	362	6,681	1,712E-02	16085	19595	0,645	1,652E-03	297	372	476	1,652E-03
1	1	0,05	48	367	6,207	1,591E-02	16316	19826	0,587	1,504E-03	297	652	717	1,504E-03
1	1	0,05	44	362	5,733	1,469E-02	16085	19595	0,529	1,356E-03	297	1424	1455	1,356E-03
1	1	0,05	49	352	6,326	1,621E-02	15622	19133	0,601	1,541E-03	297	271	402	1,541E-03

1	1	0,05	50	357	6,444	1,651E-02	15854	19364	0,616	1,578E-03	297	103	314	1,578E-03
1	1	0,05	48	357	6,207	1,591E-02	15854	19364	0,587	1,504E-03	297	652	717	1,504E-03
1	1	0,05	48	362	6,207	1,591E-02	16085	19595	0,587	1,504E-03	297	652	717	1,504E-03
1	1	0,05	48	352	6,207	1,591E-02	15622	19133	0,587	1,504E-03	297	652	717	1,504E-03
1	1	0,05	49	352	6,326	1,621E-02	15622	19133	0,601	1,541E-03	297	271	402	1,541E-03
1	1	0,05	50	352	6,444	1,651E-02	15622	19133	0,616	1,578E-03	297	103	314	1,578E-03
1	1	0,05	50	352	6,444	1,651E-02	15622	19133	0,616	1,578E-03	297	103	314	1,578E-03
1	1	0,05	50	352	6,444	1,651E-02	15622	19133	0,616	1,578E-03	297	103	314	1,578E-03
1	1	0,05	51	347	6,563	1,682E-02	15391	18901	0,630	1,615E-03	297	128	323	1,615E-03
1	1	0,05	51	347	6,563	1,682E-02	15391	18901	0,630	1,615E-03	297	128	323	1,615E-03
1	1	0,05	52	342	6,681	1,712E-02	15160	18670	0,645	1,652E-03	297	372	476	1,652E-03
1	1	0,05	52	342	6,681	1,712E-02	15160	18670	0,645	1,652E-03	297	372	476	1,652E-03
1	1	0,05	52	342	6,681	1,712E-02	15160	18670	0,645	1,652E-03	297	372	476	1,652E-03
1	1	0,05	51	347	6,563	1,682E-02	15391	18901	0,630	1,615E-03	297	128	323	1,615E-03
1	1	0,05	51	347	6,563	1,682E-02	15391	18901	0,630	1,615E-03	297	128	323	1,615E-03
1	1	0,05	51	337	6,563	1,682E-02	14929	18439	0,630	1,615E-03	296	128	323	1,615E-03
1	1	0,05	53	342	6,800	1,742E-02	15160	18670	0,659	1,689E-03	297	1047	1088	1,689E-03
1	1	0,05	52	347	6,681	1,712E-02	15391	18901	0,645	1,652E-03	297	372	476	1,652E-03
1	1	0,05	52	342	6,681	1,712E-02	15160	18670	0,645	1,652E-03	297	372	476	1,652E-03
1	1	0,05	50	347	6,444	1,651E-02	15391	18901	0,616	1,578E-03	297	103	314	1,578E-03
1	1	0,05	51	347	6,563	1,682E-02	15391	18901	0,630	1,615E-03	297	128	323	1,615E-03
1	1	0,05	51	342	6,563	1,682E-02	15160	18670	0,630	1,615E-03	297	128	323	1,615E-03
1	1	0,05	52	342	6,681	1,712E-02	15160	18670	0,645	1,652E-03	297	372	476	1,652E-03
1	1	0,05	52	347	6,681	1,712E-02	15391	18901	0,645	1,652E-03	297	372	476	1,652E-03
1	1	0,05	52	347	6,681	1,712E-02	15391	18901	0,645	1,652E-03	297	372	476	1,652E-03
1	1	0,05	51	352	6,563	1,682E-02	15622	19133	0,630	1,615E-03	297	128	323	1,615E-03
1	1	0,05	51	352	6,563	1,682E-02	15622	19133	0,630	1,615E-03	297	128	323	1,615E-03
1	1	0,05	50	347	6,444	1,651E-02	15391	18901	0,616	1,578E-03	297	103	314	1,578E-03
1	1	0,05	52	342	6,681	1,712E-02	15160	18670	0,645	1,652E-03	297	372	476	1,652E-03
1	1	0,05	52	342	6,681	1,712E-02	15160	18670	0,645	1,652E-03	297	372	476	1,652E-03
1	1	0,05	51	352	6,563	1,682E-02	15622	19133	0,630	1,615E-03	297	128	323	1,615E-03
1	1	0,05	51	347	6,563	1,682E-02	15391	18901	0,630	1,615E-03	297	128	323	1,615E-03
1	1	0,05	50	347	6,444	1,651E-02	15391	18901	0,616	1,578E-03	297	103	314	1,578E-03
1	1	0,05	51	352	6,563	1,682E-02	15622	19133	0,630	1,615E-03	297	128	323	1,615E-03
1	1	0,05	50	352	6,444	1,651E-02	15622	19133	0,616	1,578E-03	297	103	314	1,578E-03
1	1	0,05	50	347	6,444	1,651E-02	15391	18901	0,616	1,578E-03	297	103	314	1,578E-03
1	1	0,05	50	347	6,444	1,651E-02	15391	18901	0,616	1,578E-03	297	103	314	1,578E-03
1	1	0,05	50	342	6,444	1,651E-02	15160	18670	0,616	1,578E-03	297	103	314	1,578E-03
1	1	0,05	51	347	6,563	1,682E-02	15391	18901	0,630	1,615E-03	297	128	323	1,615E-03
1	1	0,05	51	352	6,563	1,682E-02	15622	19133	0,630	1,615E-03	297	128	323	1,615E-03
1	1	0,05	51	352	6,563	1,682E-02	15622	19133	0,630	1,615E-03	297	128	323	1,615E-03

1	1	0,05	50	352	6,444	1,651E-02	15622	19133	0,616	1,578E-03	297	103	314	1,578E-03
1	1	0,05	51	352	6,563	1,682E-02	15622	19133	0,630	1,615E-03	297	128	323	1,615E-03
1	1	0,05	50	347	6,444	1,651E-02	15391	18901	0,616	1,578E-03	297	103	314	1,578E-03
1	1	0,05	50	352	6,444	1,651E-02	15622	19133	0,616	1,578E-03	297	103	314	1,578E-03
1	1	0,05	50	352	6,444	1,651E-02	15622	19133	0,616	1,578E-03	297	103	314	1,578E-03
1	1	0,05	49	357	6,326	1,621E-02	15854	19364	0,601	1,541E-03	297	271	402	1,541E-03
1	1	0,05	50	352	6,444	1,651E-02	15622	19133	0,616	1,578E-03	297	103	314	1,578E-03
1	1	0,05	50	352	6,444	1,651E-02	15622	19133	0,616	1,578E-03	297	103	314	1,578E-03
1	1	0,05	51	357	6,563	1,682E-02	15854	19364	0,630	1,615E-03	297	128	323	1,615E-03
1	1	0,05	49	357	6,326	1,621E-02	15854	19364	0,601	1,541E-03	297	271	402	1,541E-03
1	1	0,05	49	357	6,326	1,621E-02	15854	19364	0,601	1,541E-03	297	271	402	1,541E-03
1	1	0,05	50	352	6,444	1,651E-02	15622	19133	0,616	1,578E-03	297	103	314	1,578E-03
1	1	0,05	50	357	6,444	1,651E-02	15854	19364	0,616	1,578E-03	297	103	314	1,578E-03
1	1	0,05	50	357	6,444	1,651E-02	15854	19364	0,616	1,578E-03	297	103	314	1,578E-03
1	1	0,05	49	362	6,326	1,621E-02	16085	19595	0,601	1,541E-03	297	271	402	1,541E-03
1	1	0,05	49	357	6,326	1,621E-02	15854	19364	0,601	1,541E-03	297	271	402	1,541E-03
1	1	0,05	48	357	6,207	1,591E-02	15854	19364	0,587	1,504E-03	297	652	717	1,504E-03
1	1	0,05	49	362	6,326	1,621E-02	16085	19595	0,601	1,541E-03	297	271	402	1,541E-03
1	1	0,05	49	362	6,326	1,621E-02	16085	19595	0,601	1,541E-03	297	271	402	1,541E-03
1	1	0,05	49	362	6,326	1,621E-02	16085	19595	0,601	1,541E-03	297	271	402	1,541E-03
1	1	0,05	48	352	6,207	1,591E-02	15622	19133	0,587	1,504E-03	297	652	717	1,504E-03
1	1	0,05	49	362	6,326	1,621E-02	16085	19595	0,601	1,541E-03	297	271	402	1,541E-03
1	1	0,05	47	352	6,089	1,560E-02	15622	19133	0,573	1,467E-03	297	799	852	1,467E-03
1	1	0,05	49	357	6,326	1,621E-02	15854	19364	0,601	1,541E-03	297	271	402	1,541E-03
1	1	0,05	48	357	6,207	1,591E-02	15854	19364	0,587	1,504E-03	297	652	717	1,504E-03
1	1	0,05	48	352	6,207	1,591E-02	15622	19133	0,587	1,504E-03	297	652	717	1,504E-03
1	1	0,05	49	352	6,326	1,621E-02	15622	19133	0,601	1,541E-03	297	271	402	1,541E-03
1	1	0,05	48	352	6,207	1,591E-02	15622	19133	0,587	1,504E-03	297	652	717	1,504E-03
1	1	0,05	48	352	6,207	1,591E-02	15622	19133	0,587	1,504E-03	297	652	717	1,504E-03
1	1	0,05	47	347	6,089	1,560E-02	15391	18901	0,573	1,467E-03	297	799	852	1,467E-03
1	1	0,05	47	342	6,089	1,560E-02	15160	18670	0,573	1,467E-03	297	799	852	1,467E-03
1	1	0,05	48	342	6,207	1,591E-02	15160	18670	0,587	1,504E-03	297	652	717	1,504E-03
1	1	0,05	48	347	6,207	1,591E-02	15391	18901	0,587	1,504E-03	297	652	717	1,504E-03
1	1	0,05	46	342	5,970	1,530E-02	15160	18670	0,558	1,430E-03	297	1266	1301	1,430E-03
1	1	0,05	47	347	6,089	1,560E-02	15391	18901	0,573	1,467E-03	297	799	852	1,467E-03
1	1	0,05	46	347	5,970	1,530E-02	15391	18901	0,558	1,430E-03	297	1266	1301	1,430E-03
1	1	0,05	46	347	5,970	1,530E-02	15391	18901	0,558	1,430E-03	297	1266	1301	1,430E-03
1	1	0,05	46	337	5,970	1,530E-02	14929	18439	0,558	1,430E-03	296	1266	1301	1,430E-03
1	1	0,05	45	337	5,852	1,500E-02	14929	18439	0,544	1,393E-03	296	1080	1120	1,393E-03
1	1	0,05	46	337	5,970	1,530E-02	14929	18439	0,558	1,430E-03	296	1266	1301	1,430E-03

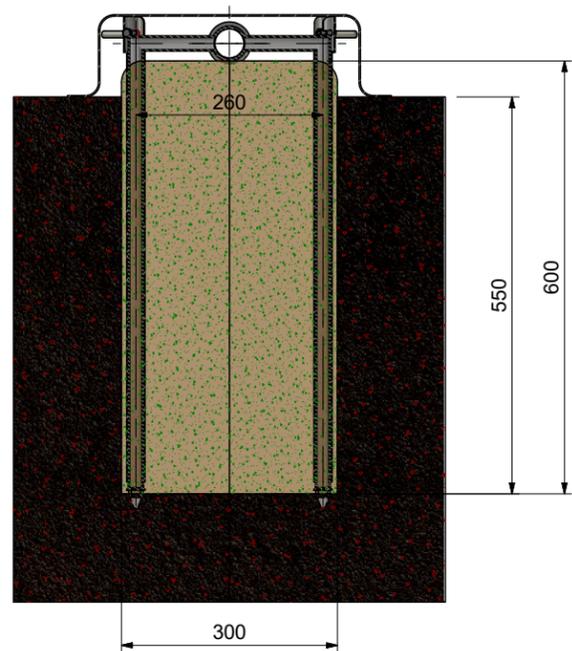
1	1	0,05	44	337	5,733	1,469E-02	14929	18439	0,529	1,356E-03	296	1424	1455	1,356E-03
1	1	0,05	44	337	5,733	1,469E-02	14929	18439	0,529	1,356E-03	296	1424	1455	1,356E-03
1	1	0,05	43	332	5,615	1,439E-02	14698	18208	0,515	1,319E-03	296	0	296	1,319E-03
1	1	0,05	44	327	5,733	1,469E-02	14466	17977	0,529	1,356E-03	296	1424	1455	1,356E-03
1	1	0,05	44	327	5,733	1,469E-02	14466	17977	0,529	1,356E-03	296	1424	1455	1,356E-03
1	1	0,05	44	327	5,733	1,469E-02	14466	17977	0,529	1,356E-03	296	1424	1455	1,356E-03
1	1	0,05	42	323	5,496	1,408E-02	14282	17792	0,500	1,282E-03	296	685	746	1,282E-03
1	1	0,05	42	323	5,496	1,408E-02	14282	17792	0,500	1,282E-03	296	685	746	1,282E-03
1	1	0,05	42	323	5,496	1,408E-02	14282	17792	0,500	1,282E-03	296	685	746	1,282E-03
1	1	0,05	42	327	5,496	1,408E-02	14466	17977	0,500	1,282E-03	296	685	746	1,282E-03
1	1	0,05	41	323	5,378	1,378E-02	14282	17792	0,486	1,245E-03	296	3526	3538	1,245E-03
1	1	0,05	41	313	5,378	1,378E-02	13819	17329	0,486	1,245E-03	296	3526	3538	1,245E-03
1	1	0,05	40	298	5,259	1,348E-02	13126	16636	0,472	1,208E-03	296	1940	1962	1,208E-03
1	1	0,05	40	293	5,259	1,348E-02	12894	16404	0,472	1,208E-03	296	1940	1962	1,208E-03
1	1	0,05	35	249	4,667	1,196E-02	10860	14370	0,399	1,023E-03	295	0	295	1,023E-03
1	1	0,05	33	249	4,430	1,135E-02	10860	14370	0,371	9,495E-04	295	2093	2114	9,495E-04
1	1	0,05	33	230	4,430	1,135E-02	9981	13491	0,371	9,495E-04	295	2093	2114	9,495E-04
1	1	0,05	28	191	3,837	9,833E-03	8178	11688	0,298	7,645E-04	294	2190	2209	7,645E-04
1	1	0,05	28	176	3,837	9,833E-03	7484	10994	0,298	7,645E-04	294	2190	2209	7,645E-04
1	1	0,05	24	127	3,363	8,618E-03	5218	8729	0,241	6,166E-04	293	1485	1514	6,166E-04
1	1	0,05	22	112	3,126	8,011E-03	4525	8035	0,212	5,426E-04	293	1208	1243	5,426E-04
1	1	0,05	22	88	3,126	8,011E-03	3415	6925	0,212	5,426E-04	292	1208	1243	5,426E-04
1	1	0,05	18	83	2,652	6,796E-03	3184	6694	0,154	3,946E-04	292	0	292	3,946E-04
1	1	0,05	16	83	2,415	6,189E-03	3184	6694	0,125	3,207E-04	292	0	292	3,207E-04
1	1	0,05	13	83	2,060	5,278E-03	3184	6694	0,082	2,097E-04	292	0	292	2,097E-04
1	1	0,05	9	83	1,586	4,063E-03	3184	6694	0,024	6,175E-05	292	0	292	6,175E-05
1	1	0,05	7	83	1,349	3,456E-03	3184	6694	0,000	0,000E+00	292	104	310	0,000E+00
1	1	0,05	7	88	1,349	3,456E-03	3415	6925	0,000	0,000E+00	292	104	310	0,000E+00
1	1	0,05	6	83	1,230	3,152E-03	3184	6694	0,000	0,000E+00	292	296	416	0,000E+00
1	1	0,05	6	83	1,230	3,152E-03	3184	6694	0,000	0,000E+00	292	296	416	0,000E+00
1	1	0,05	7	83	1,349	3,456E-03	3184	6694	0,000	0,000E+00	292	104	310	0,000E+00
1	1	0,05	7	88	1,349	3,456E-03	3415	6925	0,000	0,000E+00	292	104	310	0,000E+00
1	1	0,05	7	83	1,349	3,456E-03	3184	6694	0,000	0,000E+00	292	104	310	0,000E+00
1	1	0,05	7	88	1,349	3,456E-03	3415	6925	0,000	0,000E+00	292	104	310	0,000E+00
1	2	0,05	6	83	1,230	3,152E-03	3184	6694	0,000	0,000E+00	292	296	416	0,000E+00
1	2	0,05	8	83	1,467	3,760E-03	3184	6694	0,010	2,476E-05	292	730	786	2,476E-05
1	2	0,05	12	83	1,941	4,974E-03	3184	6694	0,067	1,727E-04	292	2190	2209	1,727E-04
1	2	0,05	13	83	2,060	5,278E-03	3184	6694	0,082	2,097E-04	292	0	292	2,097E-04
1	2	0,05	13	83	2,060	5,278E-03	3184	6694	0,082	2,097E-04	292	0	292	2,097E-04
1	2	0,05	20	88	2,889	7,403E-03	3415	6925	0,183	4,686E-04	292	0	292	4,686E-04
1	2	0,05	24	83	3,363	8,618E-03	3184	6694	0,241	6,166E-04	292	1485	1513	6,166E-04

1	2	0,05	23	88	3,245	8,314E-03	3415	6925	0,226	5,796E-04	292	0	292	5,796E-04
1	2	0,05	29	83	3,956	1,014E-02	3184	6694	0,313	8,015E-04	292	0	292	8,015E-04
1	2	0,05	32	117	4,311	1,105E-02	4756	8266	0,356	9,125E-04	293	0	293	9,125E-04
1	2	0,05	38	137	5,022	1,287E-02	5681	9191	0,443	1,134E-03	293	2390	2408	1,134E-03
1	2	0,05	38	152	5,022	1,287E-02	6374	9885	0,443	1,134E-03	293	2390	2408	1,134E-03
1	2	0,05	41	181	5,378	1,378E-02	7715	11226	0,486	1,245E-03	294	3526	3538	1,245E-03
1	2	0,05	44	196	5,733	1,469E-02	8409	11919	0,529	1,356E-03	294	1424	1454	1,356E-03
1	2	0,05	44	210	5,733	1,469E-02	9056	12567	0,529	1,356E-03	294	1424	1454	1,356E-03
1	2	0,05	46	230	5,970	1,530E-02	9981	13491	0,558	1,430E-03	295	1266	1300	1,430E-03
1	2	0,05	47	239	6,089	1,560E-02	10397	13908	0,573	1,467E-03	295	799	852	1,467E-03
1	2	0,05	46	254	5,970	1,530E-02	11091	14601	0,558	1,430E-03	295	1266	1300	1,430E-03
1	2	0,05	48	264	6,207	1,591E-02	11553	15064	0,587	1,504E-03	295	652	716	1,504E-03
1	2	0,05	47	274	6,089	1,560E-02	12016	15526	0,573	1,467E-03	295	799	852	1,467E-03
1	2	0,05	47	279	6,089	1,560E-02	12247	15757	0,573	1,467E-03	295	799	852	1,467E-03
1	2	0,05	47	288	6,089	1,560E-02	12663	16173	0,573	1,467E-03	296	799	852	1,467E-03
1	2	0,05	48	293	6,207	1,591E-02	12894	16404	0,587	1,504E-03	296	652	716	1,504E-03
1	2	0,05	49	298	6,326	1,621E-02	13126	16636	0,601	1,541E-03	296	271	401	1,541E-03
1	2	0,05	49	303	6,326	1,621E-02	13357	16867	0,601	1,541E-03	296	271	401	1,541E-03
1	2	0,05	49	303	6,326	1,621E-02	13357	16867	0,601	1,541E-03	296	271	401	1,541E-03
1	2	0,05	50	313	6,444	1,651E-02	13819	17329	0,616	1,578E-03	296	103	314	1,578E-03
1	2	0,05	50	308	6,444	1,651E-02	13588	17098	0,616	1,578E-03	296	103	314	1,578E-03
1	2	0,05	50	318	6,444	1,651E-02	14050	17560	0,616	1,578E-03	296	103	314	1,578E-03
1	2	0,05	50	318	6,444	1,651E-02	14050	17560	0,616	1,578E-03	296	103	314	1,578E-03
1	2	0,05	50	318	6,444	1,651E-02	14050	17560	0,616	1,578E-03	296	103	314	1,578E-03
1	2	0,05	51	327	6,563	1,682E-02	14466	17977	0,630	1,615E-03	296	128	323	1,615E-03
1	2	0,05	50	323	6,444	1,651E-02	14282	17792	0,616	1,578E-03	296	103	314	1,578E-03
1	2	0,05	50	323	6,444	1,651E-02	14282	17792	0,616	1,578E-03	296	103	314	1,578E-03
1	2	0,05	50	327	6,444	1,651E-02	14466	17977	0,616	1,578E-03	296	103	314	1,578E-03
1	2	0,05	50	332	6,444	1,651E-02	14698	18208	0,616	1,578E-03	296	103	314	1,578E-03
1	2	0,05	51	327	6,563	1,682E-02	14466	17977	0,630	1,615E-03	296	128	323	1,615E-03
1	2	0,05	51	327	6,563	1,682E-02	14466	17977	0,630	1,615E-03	296	128	323	1,615E-03
1	2	0,05	51	327	6,563	1,682E-02	14466	17977	0,630	1,615E-03	296	128	323	1,615E-03
1	2	0,05	50	332	6,444	1,651E-02	14698	18208	0,616	1,578E-03	296	103	314	1,578E-03
1	2	0,05	50	337	6,444	1,651E-02	14929	18439	0,616	1,578E-03	296	103	314	1,578E-03
1	2	0,05	50	342	6,444	1,651E-02	15160	18670	0,616	1,578E-03	297	103	314	1,578E-03
1	2	0,05	50	337	6,444	1,651E-02	14929	18439	0,616	1,578E-03	296	103	314	1,578E-03
1	2	0,05	49	337	6,326	1,621E-02	14929	18439	0,601	1,541E-03	296	271	402	1,541E-03
1	2	0,05	50	342	6,444	1,651E-02	15160	18670	0,616	1,578E-03	297	103	314	1,578E-03
1	2	0,05	50	337	6,444	1,651E-02	14929	18439	0,616	1,578E-03	296	103	314	1,578E-03
1	2	0,05	50	337	6,444	1,651E-02	14929	18439	0,616	1,578E-03	296	103	314	1,578E-03
1	2	0,05	50	337	6,444	1,651E-02	14929	18439	0,616	1,578E-03	296	103	314	1,578E-03

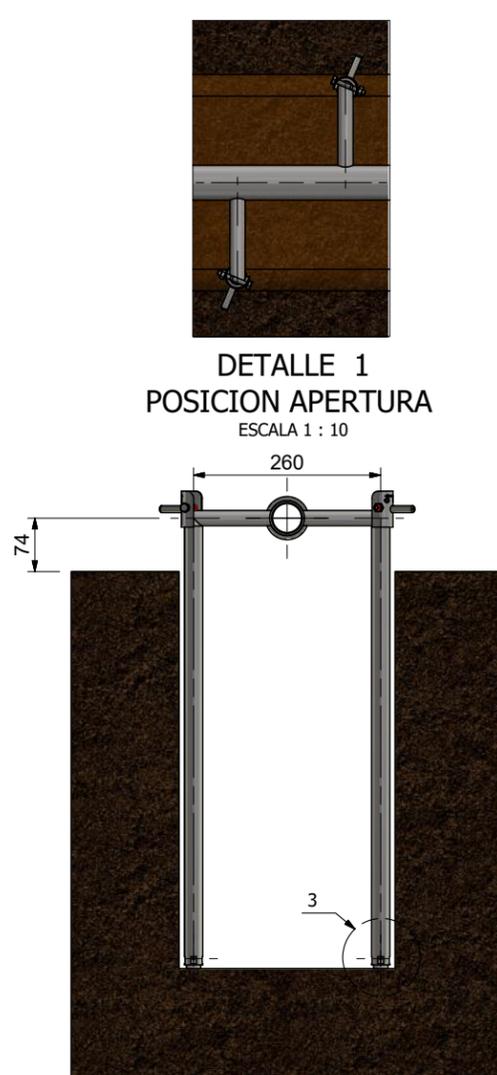
1	2	0,05	50	337	6,444	1,651E-02	14929	18439	0,616	1,578E-03	296	103	314	1,578E-03
1	2	0,05	49	342	6,326	1,621E-02	15160	18670	0,601	1,541E-03	297	271	402	1,541E-03
1	2	0,05	48	342	6,207	1,591E-02	15160	18670	0,587	1,504E-03	297	652	717	1,504E-03
1	2	0,05	47	342	6,089	1,560E-02	15160	18670	0,573	1,467E-03	297	799	852	1,467E-03
1	2	0,05	49	342	6,326	1,621E-02	15160	18670	0,601	1,541E-03	297	271	402	1,541E-03
1	2	0,05	48	337	6,207	1,591E-02	14929	18439	0,587	1,504E-03	296	652	717	1,504E-03
1	2	0,05	47	337	6,089	1,560E-02	14929	18439	0,573	1,467E-03	296	799	852	1,467E-03
1	2	0,05	47	332	6,089	1,560E-02	14698	18208	0,573	1,467E-03	296	799	852	1,467E-03
1	2	0,05	47	332	6,089	1,560E-02	14698	18208	0,573	1,467E-03	296	799	852	1,467E-03
1	2	0,05	47	327	6,089	1,560E-02	14466	17977	0,573	1,467E-03	296	799	852	1,467E-03
1	2	0,05	47	332	6,089	1,560E-02	14698	18208	0,573	1,467E-03	296	799	852	1,467E-03
1	2	0,05	46	323	5,970	1,530E-02	14282	17792	0,558	1,430E-03	296	1266	1301	1,430E-03
1	2	0,05	46	323	5,970	1,530E-02	14282	17792	0,558	1,430E-03	296	1266	1301	1,430E-03
1	2	0,05	45	313	5,852	1,500E-02	13819	17329	0,544	1,393E-03	296	1080	1120	1,393E-03
1	2	0,05	45	313	5,852	1,500E-02	13819	17329	0,544	1,393E-03	296	1080	1120	1,393E-03
1	2	0,05	44	303	5,733	1,469E-02	13357	16867	0,529	1,356E-03	296	1424	1455	1,356E-03
1	2	0,05	44	298	5,733	1,469E-02	13126	16636	0,529	1,356E-03	296	1424	1455	1,356E-03
1	2	0,05	42	298	5,496	1,408E-02	13126	16636	0,500	1,282E-03	296	685	746	1,282E-03
1	2	0,05	42	283	5,496	1,408E-02	12432	15942	0,500	1,282E-03	296	685	746	1,282E-03
1	2	0,05	41	279	5,378	1,378E-02	12247	15757	0,486	1,245E-03	295	3526	3538	1,245E-03
1	2	0,05	40	269	5,259	1,348E-02	11785	15295	0,472	1,208E-03	295	1940	1962	1,208E-03
1	2	0,05	33	196	4,430	1,135E-02	8409	11919	0,371	9,495E-04	294	2093	2114	9,495E-04
1	2	0,05	24	108	3,363	8,618E-03	4340	7850	0,241	6,166E-04	293	1485	1514	6,166E-04
1	2	0,05	22	83	3,126	8,011E-03	3184	6694	0,212	5,426E-04	292	1208	1243	5,426E-04
1	2	0,05	16	83	2,415	6,189E-03	3184	6694	0,125	3,207E-04	292	0	292	3,207E-04
1	2	0,05	14	83	2,178	5,582E-03	3184	6694	0,096	2,467E-04	292	0	292	2,467E-04
1	2	0,05	8	88	1,467	3,760E-03	3415	6925	0,010	2,476E-05	292	730	786	2,476E-05
1	2	0,05	6	83	1,230	3,152E-03	3184	6694	0,000	0,000E+00	292	296	416	0,000E+00

10.7 Anexo G - Planos

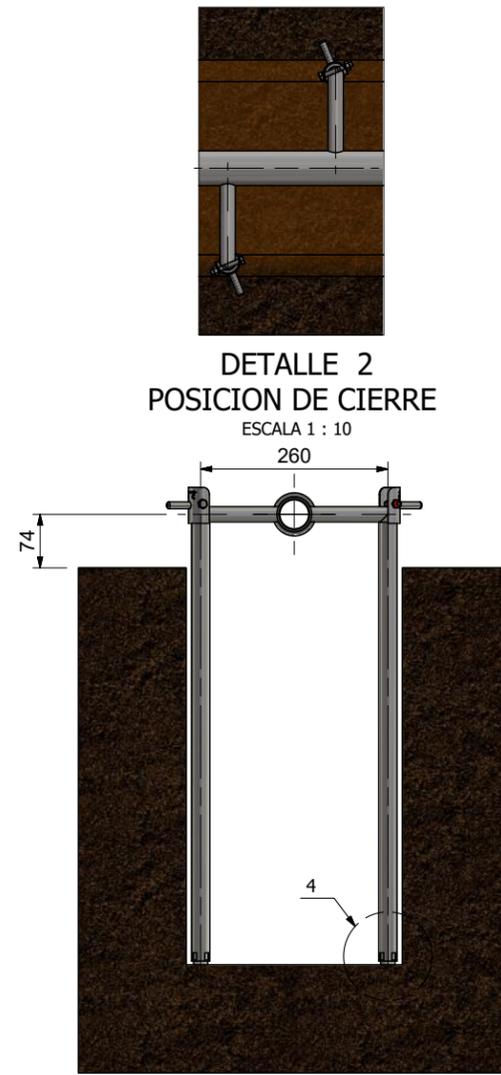
Planos diseño seleccionado “Alternativa 3” (Rastrillo en acero inoxidable con casquillo)



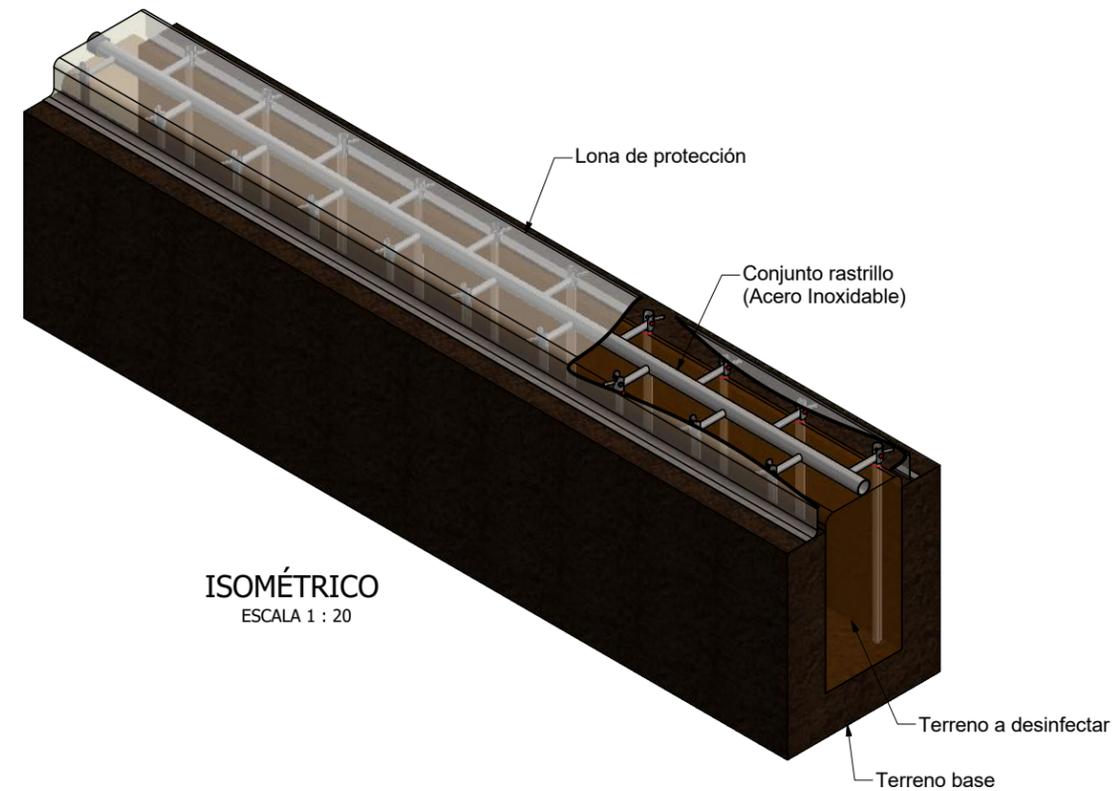
SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 10



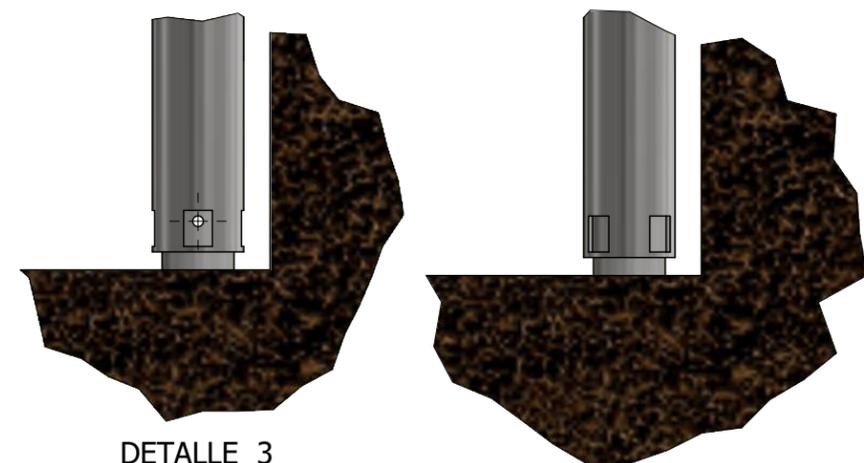
DETALLE 1
POSICION APERTURA
ESCALA 1 : 10



DETALLE 2
POSICION DE CIERRE
ESCALA 1 : 10

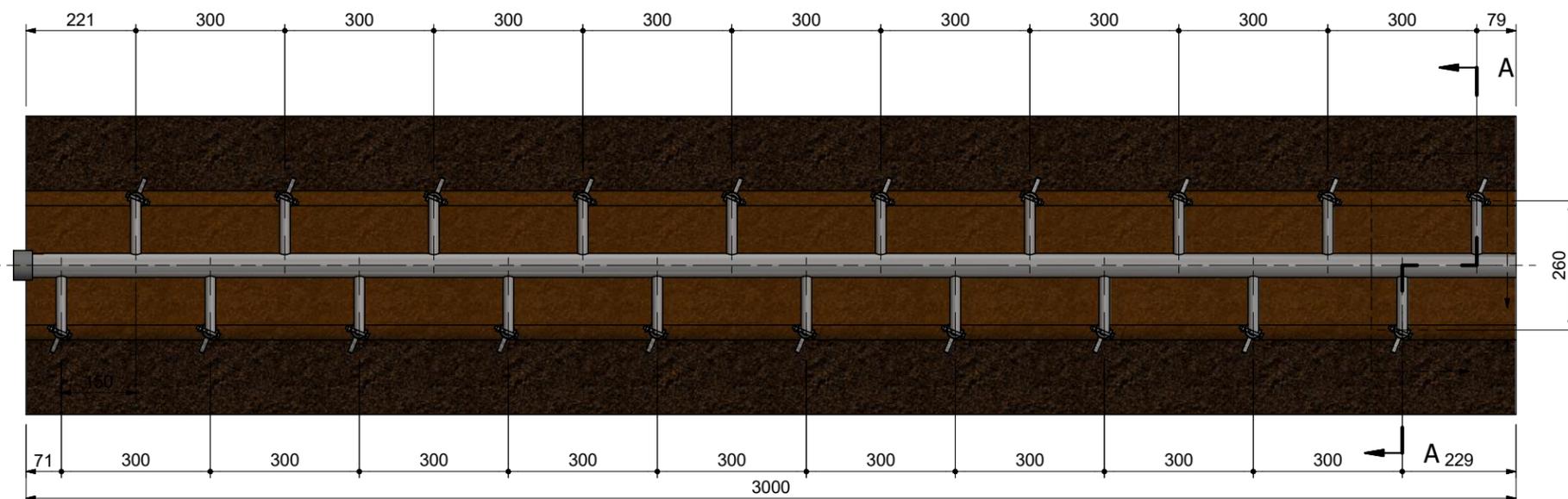


ISOMÉTRICO
ESCALA 1 : 20



DETALLE 3
ESCALA 1 : 2

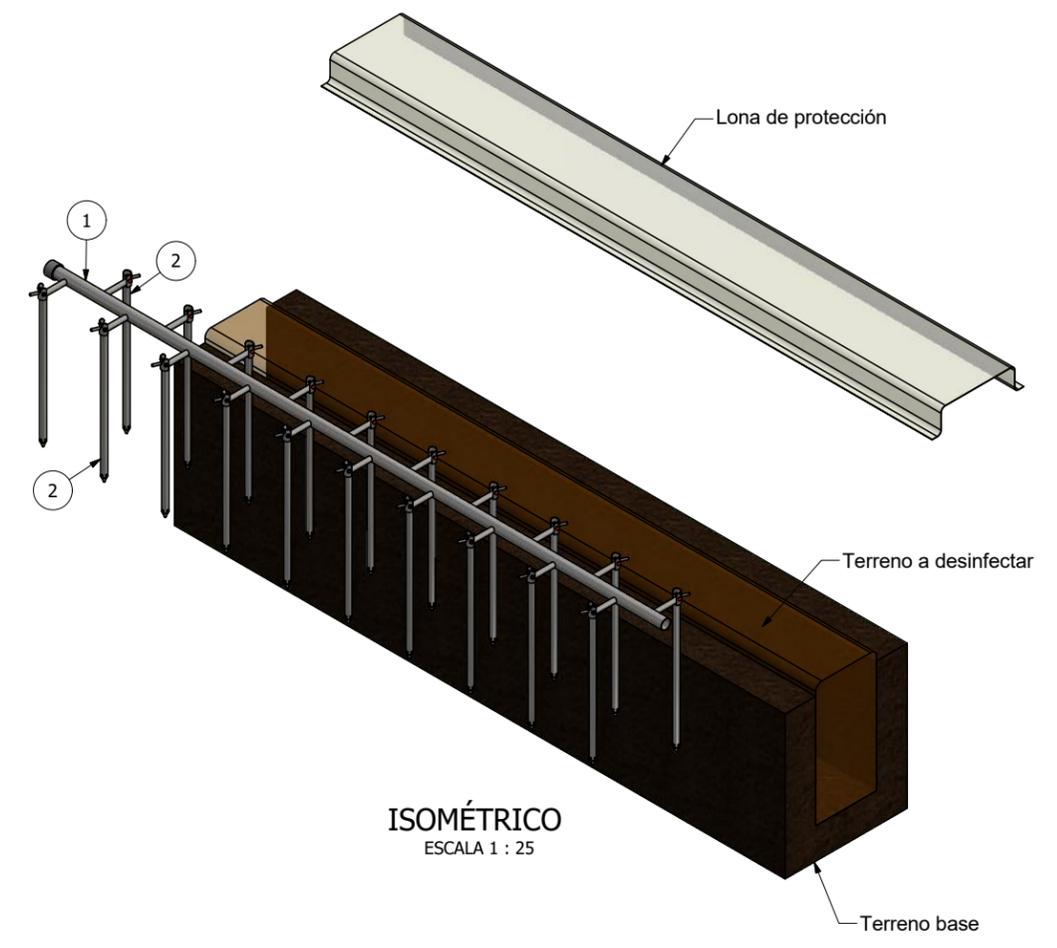
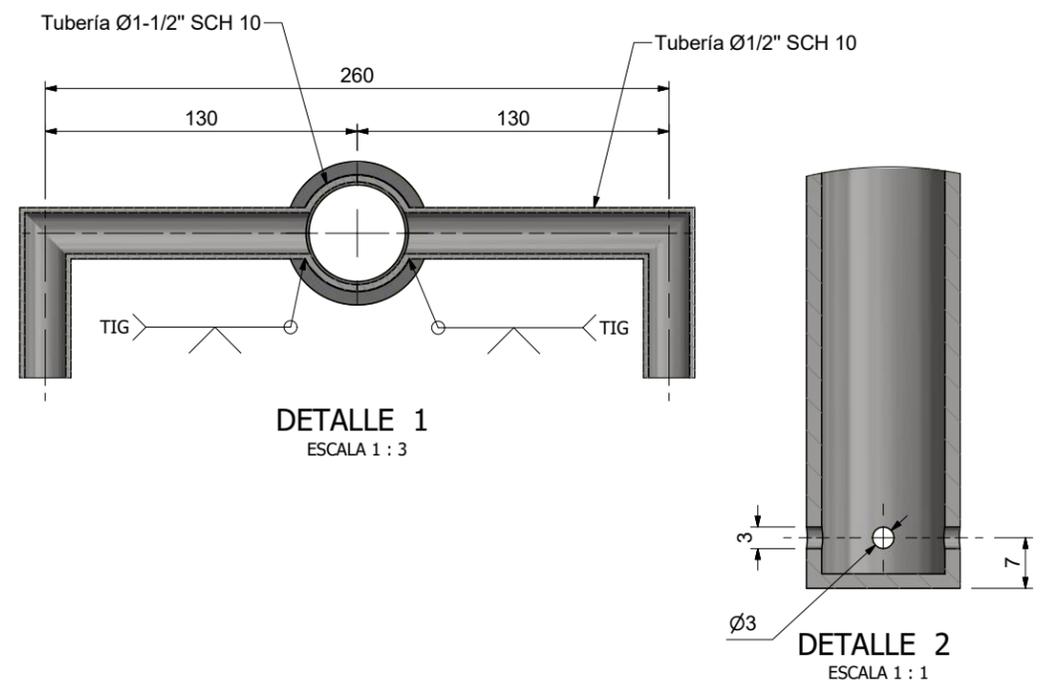
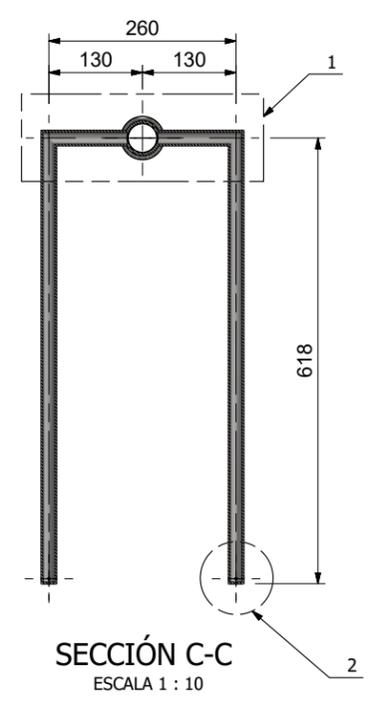
DETALLE 4
ESCALA 1 : 2



VISTA 1
ESCALA 1 : 12.5

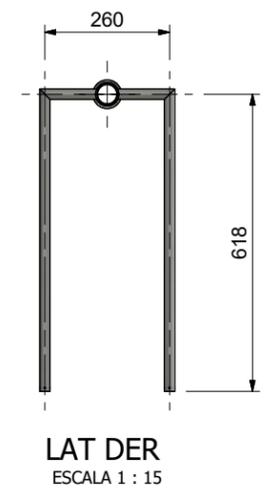
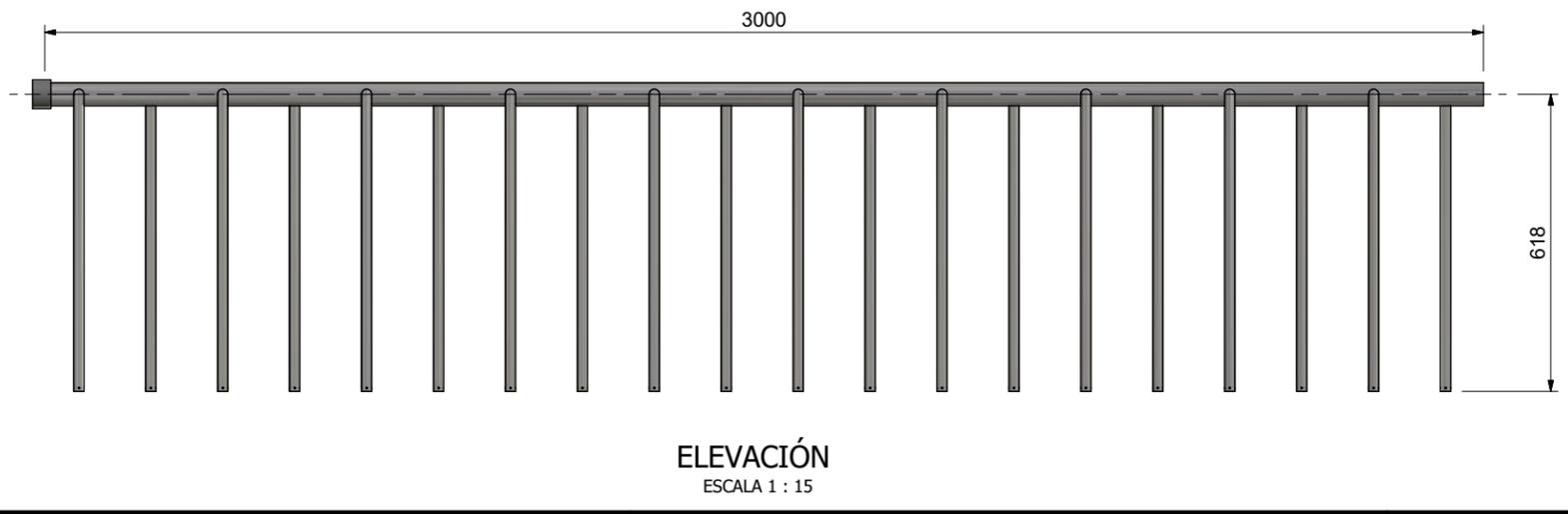
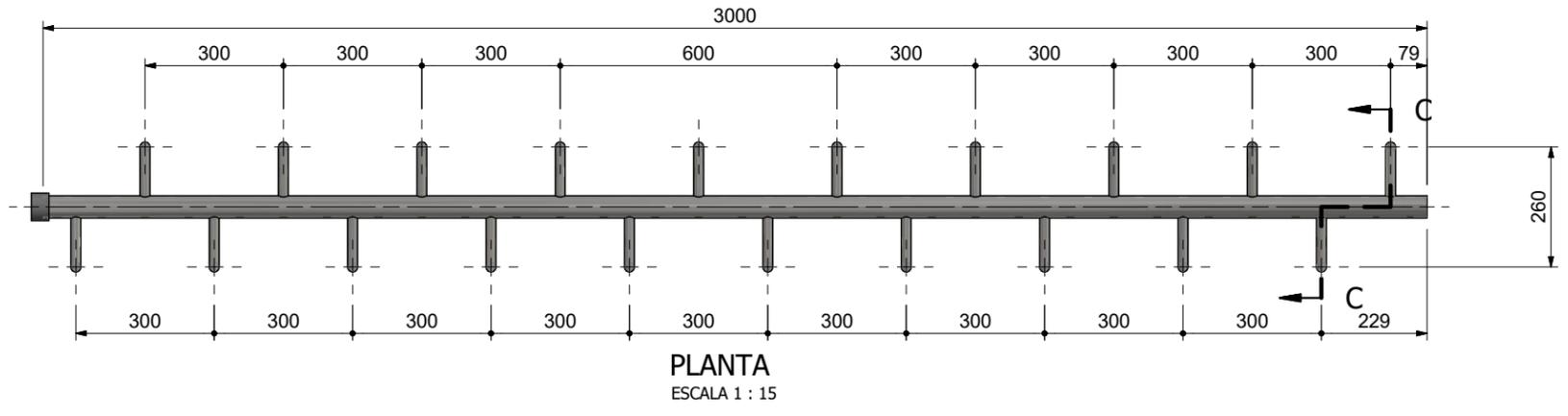
REV	DESCRIPCIÓN	ELABORÓ	REVISÓ	APROBÓ	APROBÓ TM	FECHA
1	EMITIDO PARA REVISIÓN					1/06/2021
 						
PROYECTO DESINFECCIÓN DE SUELOS DISEÑO DE DETALLE MONTAJE RASTRILLO ACERO INOXIDABLE INYECTORES CON CASQUILLO						
EJECUTÓ:	W.REYES	Firma:	Código:			
REVISÓ:	H.JIMENEZ	Firma:	Alternativa 3			
APROBÓ:	D.PARDO	Firma:	Fecha:	30/05/2021	Escala:	INDICADAS
APROBÓ:	M.SIERRA	Firma:	Rev:	1	Hoja:	1 de 3

LISTA DE MATERIALES						
ÍTEM	CANT	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	L(mm)	ANCHO	P/U(Kg) P/ST(Kg)
1	1	CONJUNTO RASTRILLO	INOX - 304			24,58 24,58
2	20	CONJUNTO CASQUILLO	INOX - 304			0,64 12,76



NOTAS:

1. Todas las dimensiones están dadas en milímetros a menos que se indique lo contrario.
2. El rastrillo será fabricado con tuberías de acero inoxidable ASTM A312 tipo 304.
3. Los casquillos tienen una rotación de 45° para la apertura y cierre del paso de vapor del sistema.



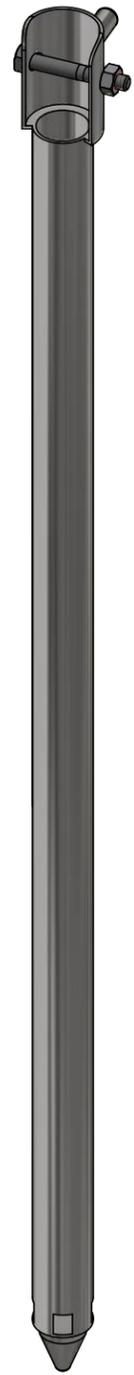
1	EMITIDO PARA REVISIÓN				1/06/2021
REV	DESCRIPCIÓN	ELABORÓ	REVISÓ	APROBÓ	APROBÓ TI
FLEXPORT					
<p align="center">PROYECTO DESINFECCIÓN DE SUELOS</p> <p align="center">DISEÑO DE DETALLE</p> <p align="center">MONTAJE RASTRILLO</p> <p align="center">ACERO INOXIDABLE INYECTORES CON CASQUILLO</p>					
EJECUTÓ:	W.REYES	Firma:	Código:		
REVISÓ:	H.JIMENEZ	Firma:	Alternativa 3		
APROBÓ:	D.PARDO	Firma:	Fecha:	Escala:	Rev. Hoja:
APROBÓ:	M.SIERRA	Firma:	30/05/2021	INDICADAS	1 2 de 3

4

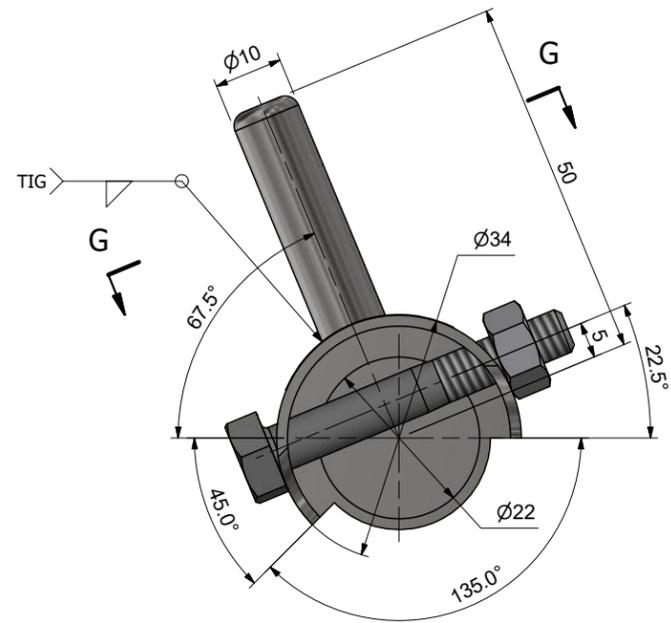
3

2

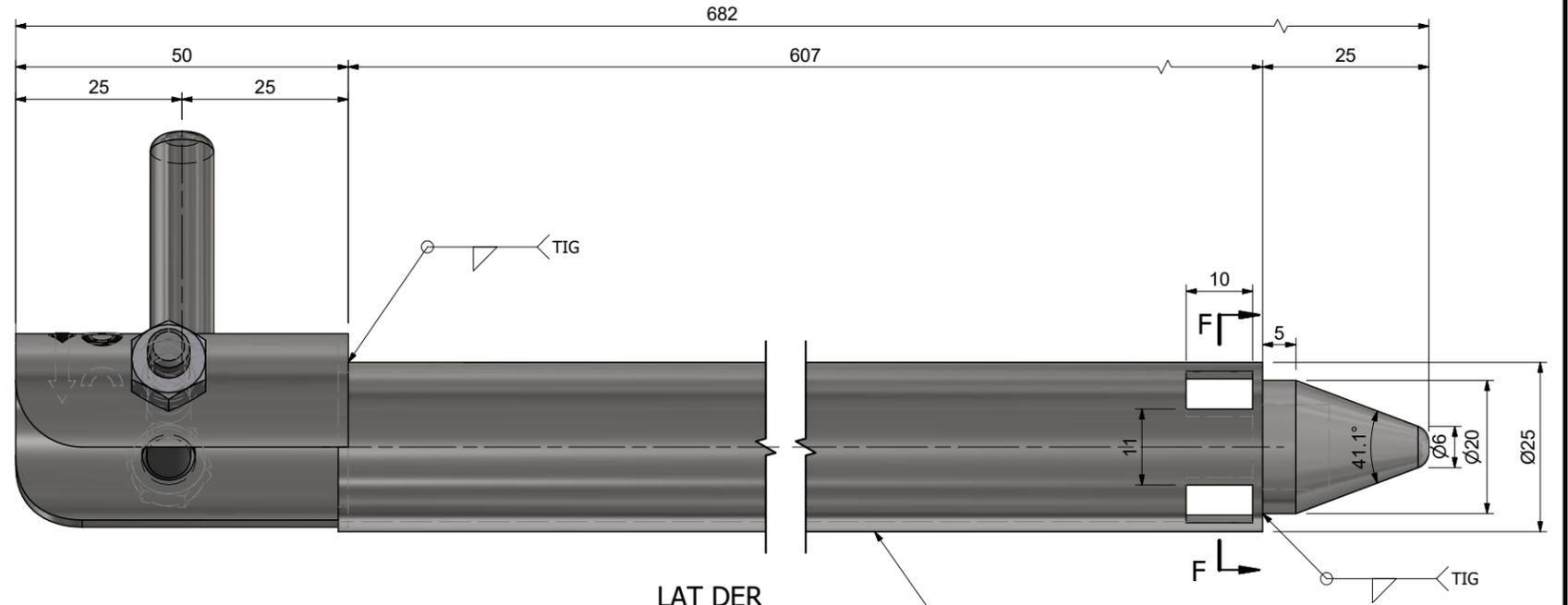
1



ISOMÉTRICO
ESCALA 1 : 3

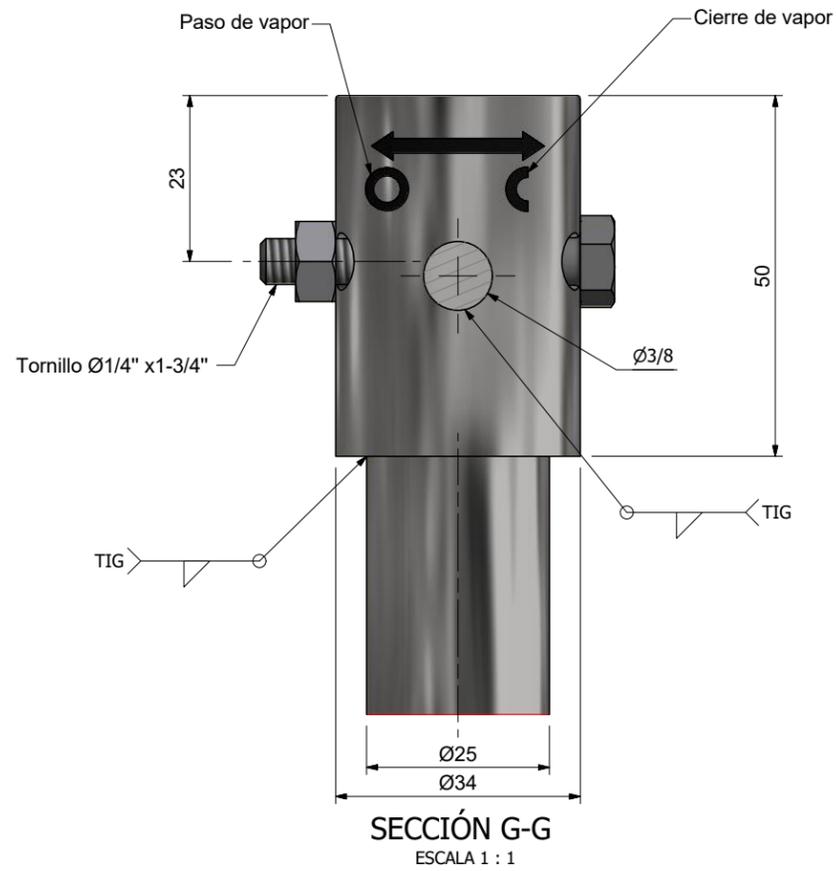


PLANTA
ESCALA 1 : 1

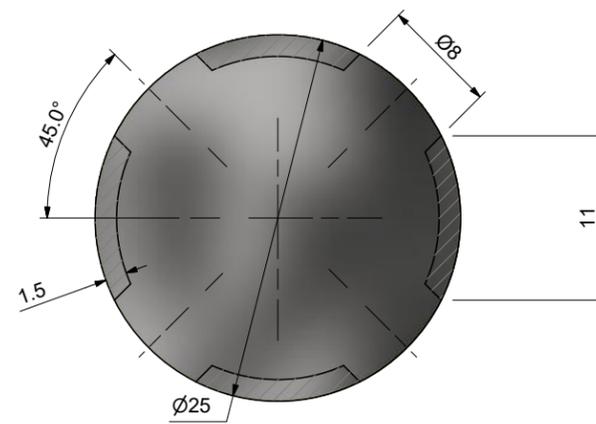


LAT DER
ESCALA 1 : 1

Tubería de ornamnetación
en acero inoxidable Ø1"
espesor 1.5 mm



SECCIÓN G-G
ESCALA 1 : 1



SECCIÓN F-F
ESCALA 2 : 1

1	EMITIDO PARA REVISIÓN					1/06/2021
REV	DESCRIPCIÓN	ELABORO	REVISÓ	APROBÓ	APROBÓ TI	FECHA

FLEXPORT

UAN
UNIVERSIDAD
ANTONIO NARIÑO

PROYECTO DESINFECCIÓN DE SUELOS

DISEÑO DE DETALLE
MONTAJE RASTRILLO
ACERO INOXIDABLE INYECTORES CON CASQUILLO

EJECUTÓ: W.REYES	Firma:	Código:	Alternativa 3			
REVISÓ: H.JIMENEZ	Firma:					
APROBÓ: D.PARDO	Firma:	Fecha:				
APROBÓ: M.SIERRA	Firma:	30/05/2021	INDICADAS	1	3 de 3	