

DISEÑO PARA LA CONSTRUCCIÓN Y PROTOTIPADO DE UNA MÁQUINA
LIMPIADORA DE FILTROS PARA LA TERMINAL DE HIDROCARBUROS EN EL
PUERTO MULTIMODAL UBICADO EN BARRANCABERMEJA, SANTANDER

JORDY GOMEZ MIRANDA
DONALDO JESUS JIMENEZ SANCHEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2018

DISEÑO PARA LA CONSTRUCCIÓN Y PROTOTIPADO DE UNA MÁQUINA
LIMPIADORA DE FILTROS PARA LA TERMINAL DE HIDROCARBUROS EN EL
PUERTO MULTIMODAL UBICADO EN BARRANCABERMEJA, SANTANDER

JORDY GOMEZ MIRANDA
DONALDO JESUS JIMENEZ SANCHEZ

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico.

Director
JAVIER RUGELES PÉREZ
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2018

DEDICATORIAS

A Dios, Por estar presente día a día por medio de las oraciones de mi madre, ayudándome a levantar en los momentos de dificultad y permitiéndome lograr este objetivo.

A mis padres, por ser la pieza fundamental de mi desarrollo como persona y ser humano.

A mi novia y mejor amiga, Wendy Rincón Pérez por estar presente ayudándome en todo momento y brindándome todo su amor, cariño y paciencia.

A mis amigos que me dieron la mano en los momentos más difíciles, Rafael Molina, Favian Bandera, Luis Pineda, Donald Jiméñez, y a todas aquellas personas que me ayudaron cuando más lo necesitaba.

Jordy Gómez Miranda

DEDICATORIAS

A mis padres, por el apoyo brindado desde la distancia para culminar mis estudios.

A todas las personas que fueron testigos de este logro durante todos estos años, a los integrantes y maestro de la agrupación MUSICA Y DANZA UIS por brindar un espacio anexo a la academia que fortalece mi formación como profesional.

Donaldo Jiménez Sánchez

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director, el ingeniero Javier Rúgeles Pérez, por siempre apoyarnos y brindarnos toda su sabiduría y paciencia, para que por medio de su asesoría pudiéramos culminar con éxito nuestro proyecto de grado.

A la empresa IMSOL S.A.S por permitirnos realizar nuestro proyecto de grado, siempre ayudándonos y colaborándonos con todo lo que se nos podía presentar.

A la Universidad Industrial de Santander y a la escuela de ingeniería mecánica por convertirme en una persona que lleva los principios y valores de la institución que lo formo.

Jordy Gómez Miranda y Donaldo Jiménez Sánchez

CONTENIDO

	pág
INTRODUCCIÓN	20
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	21
2. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN	26
3. OBJETIVOS	27
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	27
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
4. GENERALIDADES	29
4.1 PRODUCCIÓN DE CRUDO EN LA ZONA.....	29
5. MARCO TEORICO.....	31
5.1 VISCOSIDAD DEL CRUDO	31
5.2 TIPOS DE VISCOSIDAD.....	31
5.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA VISCOSIDAD DEL CRUDO	32
6. DISEÑO CONCEPTUAL	34
6.1 REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE.....	34

6.2 METODOLOGÍA PREVIA PARA LA IMPLEMENTACIÓN FASE DE CALENTAMIENTO	35
6.2.1 Temperatura fase de calentamiento y propiedades físicas del crudo.....	38
6.3 CAPACIDAD DE CALENTAMIENTO REQUERIDO EN LA MAQUINA.....	44
6.3.1 Parámetros a determinar.....	44
6.3.2 Modelo matemático.....	44
6.4 PLANTEAMIENTO FASE DE CALENTAMIENTO.....	46
6.4.1 Determinación de los requerimientos de vapor.....	50
6.5 CALCULOS FASE DE CALENTAMIENTO	51
6.5.1 Temperatura mínima del aire al adquirir en el interior.....	51
6.5.2 Tamaño y forma del filtro.....	51
6.5.3 Cantidad de filtros que se requieren someter al calentamiento.....	51
6.5.4 Dimensiones propuestas del equipo.....	52
6.6 DISEÑO TERMICO	52
6.6.1 Descripción de los componentes.....	52
6.6.2 Espesor de pared.....	53
6.6.3 Dimensiones estructura exterior.....	54
6.6.4 Propiedades térmicas de la pared.....	54
6.6.5 Propiedades térmicas para el filtro y crudo de estudio.....	56
6.6.6 Capacidad térmica del aire interior.....	58
6.6.7 Cálculo de los coeficientes de transferencia de calor.....	59
6.6.8 Capacidad de calentamiento requerida.....	66
6.7 MODELAMIENTO FASE DE CALENTAMIENTO EMPLEANDO SIMULINK	70
6.8 PLANTEAMIENTO Y CALCULOS FASE DE LIMPIEZA	72

6.8.1	Requerimientos de vapor para la limpieza del filtro en el perfil.	73
6.8.2	Requerimiento de vapor para hacer girar el filtro.....	80
7.	DISEÑO MECANICO Y CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO	91
7.1	DISEÑO DE LA ESTRUCTURA.....	91
7.2	DISEÑO DE AGARRE DEL FILTRO Y SISTEMA DE GIRO.....	98
7.3	DISEÑO DE LAS TUBERÍAS DE LIMPIEZA Y PROPULSIÓN	104
7.3.1	Diseño tubería calentamiento-limpieza.....	105
7.3.2	Diseño tubería de inyección.	106
7.4	ENSAMBLAJE FINAL.....	106
7.5	DESCRIPCION GENERAL DEL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO	109
7.6	CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO	113
7.6.1	Estructura del prototipo.	114
7.6.2	Construcción del agarre, soporte para el filtro y tubería.	115
7.7	COSTOS DE CONSTRUCCIÓN MAQUINA Y PROTOTIPO	118
8.	CONCLUSIONES.....	122
	BIBLIOGRAFIA.....	124
	ANEXOS.....	125

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Recursos de petróleo en el mundo	21
Figura 2. Clasificación de los crudos según su densidad y gravedad API	22
Figura 3. Línea de tubería en el puerto multimodal Barrancabermeja.	23
Figura 4. Filtro de la fase de descargue.....	24
Figura 5. Diseño y medidas del filtro unidades en pulgadas.....	25
Figura 6. Localización de pozos en Barrancabermeja	30
Figura 7. Calculadora virtual O&GProTololBoxPVT	38
Figura 8. Comportamiento Temperatura vs Viscosidad crudo 8° API	39
Figura 9. Temperatura vs Calor específico	42
Figura 10. Temperatura vs Calor específico crudo 8° API	43
Figura 11. Esquema de calores	45
Figura 12. Posición de los filtros en el interior de la máquina	53
Figura 13. Influencia del aire en el coeficiente de condensación de vapor a 230°F (Datos de Othmer)	60
Figura 14: Perfiles de temperaturas en un intercambiador	71
Figura 15. Modelo en simulink del calentamiento	71
Figura 16. Comportamiento temperatura en el calentamiento	72
Figura 17. Tubería principal, secundarias y terciarias.....	73
Figura 18. Patrón de chorro de tobera	74
Figura 19. Configuración de las toberas	75
Figura 20. Diagrama entalpía vs entropía	86
Figura 21. Diagrama de velocidades	88
Figura 22. Vista isométrica base de la maquina	92
Figura 23. Vista Inferior de la base	93

Figura 24. Alturas recomendadas para trabajar de pie	94
Figura 25. Pata de la maquina	94
Figura 26. Ensamblaje de las patas.....	95
Figura 27. Recipiente de recolección y embudo	95
Figura 28. Ensamblaje de la recolección	96
Figura 29. Puerta, Marco y Techo respectivamente	97
Figura 30. Ensamblaje de las puertas y techo	97
Figura 31. Mordaza para el filtro	99
Figura 32. Ubicación de la mordaza en el filtro (vista de sección)	99
Figura 33. Barra roscada, Buje con agarre lateral y Tubería cuadra respectivamente	100
Figura 34. Ensamblaje conjunto de agarre y filtro.....	101
Figura 35. Camisa, Barra cuadrada, Barra redonda y Rueda Pelton.....	102
Figura 36. Ensamblaje carrusel	102
Figura 37. Ensamblaje agarre del filtro y carrusel.....	103
Figura 38. Ensamblaje de los módulos de estructura y agarre de los filtros (vista frontal).....	103
Figura 39. Ensamblaje de los módulos (vista isométrica)	104
Figura 40. Tubería principal (verde), tubería secundaria tipo A y tubería secundaria tipo B.....	105
Figura 41. Tubería de inyección para la rueda Pelton	106
Figura 42. Ensamblaje maquina (vista isométrica)	107
Figura 43. Ensamblaje maquina (vista frontal).....	107
Figura 44: Ensamblaje maquina (vista posterior).....	108
Figura 45. Válvula reductora de presión	109
Figura 46. Equipo descargado	110
Figura 47. Ubicación del pasador	110
Figura 48. Montaje de los filtros	111
Figura 49. Fijación del carrusel.....	112
Figura 50. Dispositivo temporizador.....	113

Figura 51. Tanque de aceite	114
Figura 52. Ensamble embudo, recipiente y soporte.....	115
Figura 53. Agarre filtro	116
Figura 54. Montaje carrusel	116
Figura 55. Carrusel y sistema de agarre.....	117
Figura 56. Ensamblaje tubería central y tapiz.....	117
Figura 57. Ensamblaje tubería-carrusel, manifold de inyección y tubería de propulsión	118

LISTA DE TABLAS

pág

Tabla 1. Dimensiones filtro	24
Tabla 2. Tipos de crudo según su gravedad API	30
Tabla 3. Requerimientos del cliente.....	34
Tabla 4. Correlaciones propiedades del crudo.....	36
Tabla 5. Viscosidades aproximadas de los productos comunes a temperatura ambiente de 21°C	39
Tabla 6. Propiedades térmicas de los materiales a temperatura ambiente	55
Tabla 7. Diámetros estandarizados	80
Tabla 8. Planteamiento ecuaciones del sistema de giro	82
Tabla 9. Problemas a resolver con el diseño de la estructura	92
Tabla 10. Problemas a resolver con el diseño del agarre del filtro.....	98
Tabla 11. Análisis de costo del prototipo	119
Tabla 12. Análisis de costo de la máquina.....	120

LISTA DE ANEXOS

“Estos anexos se encuentran en documento adjunto”

Anexo A CATALOGO CALDERA FULTON VMP.

Anexo B CARTA PSICROMÉTRICA.

Anexo C TABLAS DE PROPIEDADES.

Anexo D CATÁLOGO DE TOBERAS LECHLER.

Anexo E DIAGRAMA DE MOLLIER.

Anexo F CATÁLOGO TÉCNICO GRUPO ALMSEA, PARA ACCESORIOS DE TUBERÍA.

Anexo G TUBERÍAS.

Anexo H MANUAL DE INSTALACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA LIMPIADORA DE FILTROS.

Anexo I IMÁGENES DEL PROTOTIPO TERMINADO.

Anexo J PLANOS DE DISEÑO.

LISTA DE ECUACIONES

pág

Ecuación 1. Correlación De Ghetto et al.....	37
Ecuación 2. Correlación del calor específico para crudo	42
Ecuación 3. Flujo de calor del vapor	45
Ecuación 4. Primera ley de la termodinámica en todo el sistema	46
Ecuación 5. Balance másico del aire interior	47
Ecuación 6. Ecuación diferencial comportamiento del calentamiento.....	47
Ecuación 7. Capacidad calorífica del aire	47
Ecuación 8. Ecuación diferencial para la capacidad calorífica del aire	48
Ecuación 9. Ecuación diferencial capacidad calorífica del conjunto filtro-crudo	48
Ecuación 10. Ecuación diferencial Capacidad calorífica paredes de la estructura	48
Ecuación 11. Rata de calor	49
Ecuación 12. Factor de calentamiento.....	49
Ecuación 13. Máximo flujo de calor requerido	49
Ecuación 14. Flujo de vapor requerido	50
Ecuación 15. Flujo de vapor condición isotérmica	50
Ecuación 16. Flujo de calor requerido para mantener el sistema estable.....	50
Ecuación 19. Flujo de calor por unidad de área.....	61
Ecuación 20. Coeficiente de difusión de vapor	62
Ecuación 21. Diferencia media logarítmica de la presión parcial del aire	64
Ecuación 22. Coeficiente de transferencia de calor por convección (aire y película de condensado)	64
Ecuación 23. Coeficiente de transferencia de calor entre (pared y aire exterior)...	65
Ecuación 24. Coeficiente de transferencia de calor entre (aire interior y pared)....	65

RESUMEN

TITULO: DISEÑO PARA LA CONSTRUCCIÓN Y PROTOTIPADO DE UNA MÁQUINA LIMPIADORA DE FILTROS PARA LA TERMINAL DE HIDROCARBUROS EN EL PUERTO MULTIMODAL UBICADO EN BARRANCABERMEJA, SANTANDER*¹

AUTORES: DONALDO JESUS JIMENEZ SANCHEZ, JORDY GOMEZ MIRANDA**²

PALABRAS CLAVE: Crudo, Vapor saturado, Viscosidad, Limpieza

DESCRIPCIÓN: Este proyecto consiste en el diseño y construcción de un prototipo que tiene como objetivo limpiar por completo cinco filtros crudo y residuos, mediante dos fases; Calentamiento y limpieza, reduciendo el tiempo de trabajo con respecto a la forma en que se bien trabajando. El diseño de la maquina se desarrolla con materiales comerciales como el acero para facilitar el proceso de fabricación, posteriormente se muestra evidencia del proceso de ensamblaje y construcción del prototipo desarrollado.

Para cumplir con el objetivo de disminuir el tiempo, se calienta la cámara transfiriéndole calor al filtro mediante el uso de vapor durante treinta minutos haciendo que la viscosidad del crudo descienda. Para ello se aplica un modelo de ecuaciones diferenciales termodinámicas con el propósito de evaluar los requerimientos de vapor en el sistema, teniendo en cuenta el comportamiento térmico del sistema y considerando cada componente del sistema por un elemento hipotético de conductividad térmica. La segunda fase del proceso se realiza determinando la presión, velocidad y caudal necesario para vencer la fuerza de resistencia que opone el crudo para ser removido, con respecto a lo anterior se dimensiona las tuberías y se regula el suministro de vapor al requerido por el sistema.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Ing. Javier Rúgeles Pérez, Ingeniero Mecánico.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN FOR THE CONSTRUCTION AND PROTOTYPING OF A CLEANING MACHINE OF FILTERS FOR THE HYDROCARBON TERMINAL IN THE MULTIMODAL PORT LOCATED IN BARRANCABERMEJA, SANTANDER*³

AUTHORS: DONALDO JESUS JIMENEZ SANCHEZ, JORDY GOMEZ MIRANDA**⁴

KEYWORDS: Crude, Saturated steam, Viscosity, Cleaning

DESCRIPTION: This project consists of the design and construction of a prototype that aims to completely clean five raw filters and waste, through two phases; Heating and cleaning, reducing the working time with respect to the way you are working well. The design of the machine is developed with commercial materials such as steel to facilitate the manufacturing process, later it shows evidence of the process of assembly and construction of the developed prototype.

To achieve the objective of decreasing the time, the chamber is heated by transferring heat to the filter by using steam for thirty minutes causing the viscosity of the oil to fall. A thermodynamic differential equation model is applied for the purpose of evaluating the steam requirements in the system, taking into account the thermal behavior of the system and considering each component of the system for a hypothetical element of thermal conductivity. The second phase of the process is done by determining the pressure, speed and flow needed to overcome the resistance force that opposes the oil to be removed, with respect to the above, the pipes are dimensioned and the steam supply is regulated as required by the system.

³ Bachelor thesis

⁴ Faculty of Physico-Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering. Advisor: Ing. Javier Rugeres Perez, Mechanical Engineer.

INTRODUCCIÓN

El proceso actualmente de limpieza de los filtros implica un procedimiento delicado y retardos para habilitar la línea de transporte. El intercambio del fluido vía terrestre a fluvial por medio de tuberías permite el traspaso del crudo, dichas tuberías contienen internamente filtros en los cuales quedan impurezas que deben ser retiradas manualmente una vez finaliza la operación de bombeo.

Atendiendo a las consideraciones anteriores se busca conservar el uso del vapor como fuente principal para limpiar los filtros; dando así un aprovechamiento óptimo del mismo contemplando nuevas fases para remover la cantidad de impurezas adheridas a los filtros. Se plantea una fase de calentamiento para reducir la viscosidad del crudo y facilitar la expulsión de residuos, posteriormente una fase de limpieza que implementa inyección de vapor con el fin de hacer girar el filtro paralelamente a esta operación se sigue aplicando fluido en la superficie, dando paso a que se despeje el mallado y se obtenga como resultado un filtro limpio.

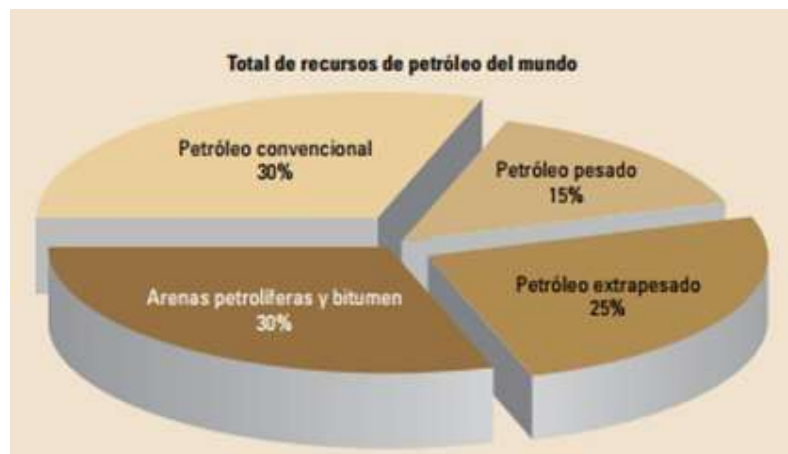
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente en el mercado internacional del petróleo, los crudos ligeros son los más cotizados debido a su derivación de productos de alto consumo, como lo son: los combustibles gasolina y diésel, que a diferencia de los crudos pesados y extra-pesados cuentan con un valor menor en su comercialización en el mercado.

Los crudos pesados y extra-pesados poseen algunas características que aumentan los costos en su extracción y refinado, aquellas son: viscosidad alta, contenidos elevados de azufre, metales y asfáltenos en mayor proporción; lo anterior mencionado fue el motivo por el cual la industria petrolera en principio rechazaba estos tipos de crudo.

Los yacimientos de crudo ligero se agotan (ver figura 1) y el mundo aún depende de las energías fósiles, es por esto, que los recursos y la tecnología están enfocados en la extracción y transporte de crudos pesados y extra pesados (ver figura 2).

Figura 1. Recursos de petróleo en el mundo



Fuente: http://www.slb.com/-/media/Files/resources/oilfield_review/defining-series-spanish/Defining_HeavyOil_Jan_2016.pdf?la=en&hash=912B1C72A05DF87A386259981E9B701B4194D76F

Figura 2. Clasificación de los crudos según su densidad y gravedad API

Aceite Crudo	Densidad (g/cm³)	Gravedad API
Extrapesado	>1.0	10
Pesado	1.0 - 0.92	10.0 - 22.3
Mediano	0.92 - 0.87	22.3 - 31.1
Ligero	0.87 - 0.83	31.1 - 39
Superligero	< 0.83	> 39

Fuente:<http://www.biodisol.com/cambio-climatico/que-es-el-petroleo-tipos-de-petroleo-hidrocarburos-west-texas-intermediate-petroleo-brent-blend- clasificacion-del-crudo/>

El puerto multimodal ubicado en Barrancabermeja-Santander, se encuentra en un punto estratégico para la logística de transporte en el país sobre las aguas del río Magdalena y conectando el Caribe con el interior del país. Este puerto cuenta con dos principales terminales; el primer terminal, es el de transporte de mercancía, es decir, los contenedores; el segundo terminal, es el transporte de hidrocarburos.

Ahora bien, la problemática que se plantea en este proyecto, se ubica principalmente en el terminal de hidrocarburos, el cual posee líneas de tuberías que sirven para la distribución del crudo pesado y extra-pesado, y que generalmente se enmarcan en el rango de API 14 – 8, el crudo arriba al terminal, desde camiones cisterna, para luego ser embarcados en buques o barcazas que, posteriormente serán trasladados por vía fluvial (ver figura 3). Las tuberías cuentan con una serie de filtros que cumplen la función de retener residuos agregados al crudo u elementos provenientes de su transporte. Actualmente, una sola línea de tuberías contiene 18 filtros en la fase de descargue, 12 filtros en la fase de precalentamiento y 9 filtros en la fase de bombeo.

Figura 3. Línea de tubería en el puerto multimodal Barrancabermeja.



Fuente: <https://www.impalaterminals.com/our-global-network/latin-america/colombia/>

Después de realizar la operación de llenado de los buques, la compañía encargada del mantenimiento de las tuberías, desarrolla la operación de limpieza de los filtros. En la actualidad, dicha labor se lleva a cabo de forma manual, produciendo consecuencias desfavorables para la salud del operario encargado.

Además, debido a la alta viscosidad del crudo, es necesario el uso de vapor de agua para remover los residuos de crudo y así efectuar la limpieza del filtro, consecuentemente, la manipulación del vapor bajo estas condiciones genera un alto riesgo de accidentalidad para los operarios. Cuando se ejecuta la limpieza, la empresa se ve en la obligación de doblar el turno de sus trabajadores de 8 a 16 horas, y aumentar el personal, todo ello con el objetivo de cumplir eficaz y eficientemente la limpieza de los filtros, para de esta manera poder reactivar las líneas para un nuevo bombeo.

Los filtros están fabricados de acero inoxidable y cuentan con cuatro dimensiones: diámetro, altura mayor, altura menor y agujeros de la malla, (ver tabla 1) todas estas cuentan con un gran tamaño que atrasa, demora y vuelve más complejo la operación de limpieza.

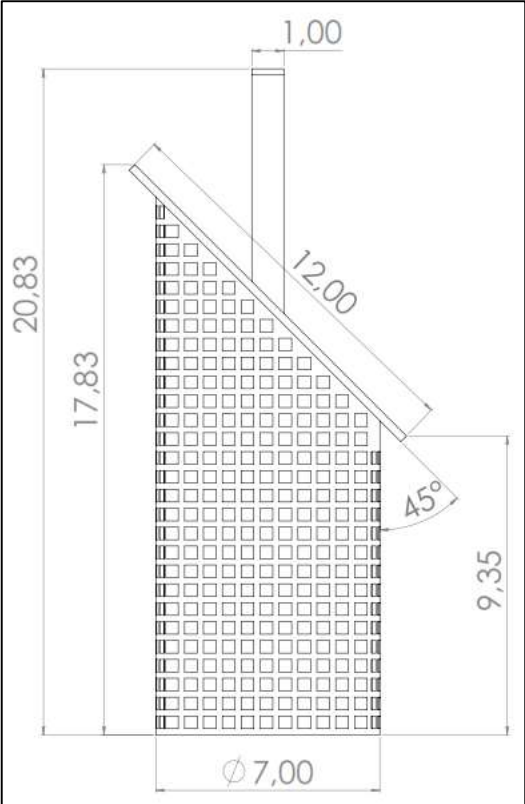
Tabla 1. Dimensiones filtro

DIMENSIONES DEL FILTRO	
Diámetro	7 [in]
Altura mayor	18 [in]
Altura menor	10 [in]
Malla	Cuadrados de 10*10 [mm]

Figura 4. Filtro de la fase de descargue



Figura 5. Diseño y medidas del filtro unidades en pulgadas



2. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Actualmente, en la terminal de transporte de hidrocarburos del puerto multimodal ubicado en Barrancabermeja-Santander, los filtros, son limpiados uno a uno, calentándose con vapor de agua para disminuir la viscosidad de los residuos de crudo y sólidos adheridos, y así poder retirarlos con un cepillo.

Se reitera, que el proceso de limpieza se realiza manualmente, es decir, que está dirigido por operarios que, en ocasiones, en aras de cumplir con la operación, se les dobla el horario de trabajo de 8 a 16 horas para que puedan cumplir con la labor de limpieza de los 35 filtros y volver a habilitar las respectivas líneas de tubería para el transporte de crudo.

En consecuencia, se formula una idea de diseño para la futura elaboración de una máquina que desempeñe las labores de limpieza en los filtros, por donde recurrentemente se transporta el crudo pesado y extra-pesado, ahora bien, se espera que la estructura de la máquina permita llevar a cabo de forma simultánea la limpieza de varios filtros, además, se busca que con la implementación de dicha máquina, se aproveche de forma exitosa el vapor, para de esa manera disminuir el tiempo requerido y la mano de obra en la operación, lo que genera reducción en los costos de la misma.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir a la construcción y divulgación de conocimientos como propósito de la formación de ingenieros mecánicos de la Universidad Industrial de Santander mediante el desarrollo de una máquina limpiadora de filtros para optimizar tiempos de lavado y mantenimiento en la terminal de transporte de hidrocarburos del puerto multimodal ubicada en Barrancabermeja-Santander.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar el diseño de una máquina que limpie filtros (contienen residuos de crudo pesado) y optimice los tiempos de operación. Deben cumplir con las siguientes especificaciones y características:

- ✓ Capacidad de filtros de: 5 unidades.
 - ✓ Tiempo de operación por lote: 1-1:30 hora
 - ✓ Máquina transportable para facilitar las operaciones en campo abierto.
 - ✓ Material estructural resistente a temperaturas mayores de 100 °C
 - ✓ Toberas para fase de calentamiento: 4 - 6
 - ✓ Toberas para suministrar vapor a presión a los filtros: 5
 - ✓ Garantizar la seguridad de los operarios.
 - ✓ Diseñar los planos de la máquina utilizando la herramienta de computo CAD.
-
- Elaborar un manual de funcionamiento para el debido uso de la máquina el cual incluya:
 - ✓ Breve descripción del sistema de la máquina y su finalidad.
 - ✓ Requisitos previos necesarios para el uso de la máquina.
 - ✓ Sección de instalación y configuración.

- ✓ Guía sobre cómo utilizar las funciones básicas.
- ✓ Sección de solución de problemas que detalle los posibles errores o problemas que pueden surgir junto a sus soluciones.

4. GENERALIDADES

4.1 PRODUCCIÓN DE CRUDO EN LA ZONA

Según información de la empresa petrolera ECOPETROL S.A, sustenta que, por medio de diferentes métodos para la sustracción del crudo, como: la inyección de agua o perforación con arenas en los pozos ubicados en el centro de Barrancabermeja. Existen pozos como el de la Cira Infantas, considerado el campo petrolero más antiguo de Colombia (ver figura 6), que en el año 2017 registró una producción de 45 mil barriles diarios, siendo su máxima producción en 1939 cuando se extrajeron 60 mil barriles diarios de petróleo⁵

Todos los petróleos no son semejantes, en su etapa natural se le conoce como crudo. La variedad de componentes químicos (orgánicos e inorgánicos) en cantidades diversas presentes en los crudos, son los factores que determinan las características de transporte como la densidad, viscosidad, etc.

En estos pozos se extraen crudos livianos de 33 °API a 30 °API pesados y extra-pesados como el 8° API (ver Tabla 2).

⁵ ECOPETROL S.A. Boletines de prensa: Boletines 2017. [En línea]. Bogotá D.C.: (Recuperado en 5 mayo 2018.) Disponible en <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/sala-de-prensa/boletines-de-prensa/boletines-2017/boletines-2017/campo-la-cira-infantas-produce-40-mil-barriles>

Figura 6. Localización de pozos en Barrancabermeja



Fuente: <http://inteligenciapetrolera.com.co/inicio/pozo-coyote-1-ecopetrol-anuncia-nuevo-hallazgo-petroleo-santander/>

Tabla 2. Tipos de crudo según su gravedad API

TIPOS DE CRUDO SEGÚN GRAVEDAD API		
Crudo	Escala API	Características
Ligero	30° a 40°	Fácil transporte y extracción. Permite obtener la mayor cantidad de combustible posible en forma de diésel, queroseno y gasolina
Mediano	22° a 29.9°	Fácil transporte y extracción. Se obtiene combustible, polímeros y parafinas
Pesado	10° a 21.9°	Fácil transporte y difícil extracción. Ideal para obtener parafinas, polímeros, aceites y combustibles.
Extra pesados	Menos 10°	Difícil transporte y difícil extracción. Sirve para la obtención de aceites, parafinas, polímeros y betunes.

Fuente: <http://www.venelogia.com/archivos/9589/>

5. MARCO TEORICO

La viscosidad es la propiedad física más importante en las fases de producción, transporte, refinación del crudo y recobro del petróleo. Cada una de estas operaciones se afecta negativamente al presentar rangos muy altos de esta propiedad.

5.1 VISCOSIDAD DEL CRUDO

En el proceso de limpieza de los filtros, la particularidad del crudo a remover es que su viscosidad es muy elevada, ya que esta define la resistencia a fluir y la adhesión del crudo al metal del filtro⁶. Por tal motivo, se debe estudiar el método adecuado para llevar a cabo la reducción o disminución de la viscosidad del crudo, para facilitar su desprendimiento.

Para el estudio del crudo se debe tener en cuenta su viscosidad principalmente, dado que cuantifica la resistencia interna de los líquidos al flujo y se mide en Saybolt (SSU), en poise y centiPoise o grados Engler.

5.2 TIPOS DE VISCOSIDAD

➤ Viscosidad dinámica o absoluta: Cuando un fluido comienza un movimiento se produce una fuerza de corte que depende de la viscosidad, corresponde a la cantidad de fuerza requerida para hacer mover una superficie plana de (1 cm^2) con una velocidad de (1 cm/s) con respecto a otra superficie que se encuentra

⁶ DA SILVA, Angel. La comunidad petrolera: viscosidad del petróleo [En línea].2009. (Recuperado en 5 mayo 2018.) Disponible en <https://www.lacomunidadpetrolera.com/2009/01/viscosidad-del-petroleo.html>

estática, en su interior presentan el líquido investigado con (1 cm) de espesor. El resultado se da en unidades de centiPoise⁷.

➤ Viscosidad cinemática: resultado entre la división de la viscosidad dinámica y la densidad del fluido a las mismas condiciones de temperatura. Trabaja con unidades de (m²/s) o (Stoke) en el sistema internacional⁸.

➤ Viscosidad relativa: representa la relación que existe entre la viscosidad dinámica del fluido en estudio con respecto a la viscosidad del agua a condiciones de 20 [°C]⁹.

5.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA VISCOSIDAD DEL CRUDO

La viscosidad es una propiedad termodinámica de las sustancias que se ve afectada por la temperatura, la presión, entre otras.

➤ Efecto de la temperatura: El propósito de aumentar la temperatura del crudo es disminuir su viscosidad, mediante el incremento de la velocidad de las moléculas, logrando disminuir su fuerza de cohesión y la resistencia molecular interna al desplazamiento¹⁰.

➤ Efecto de la presión: Todo crudo antes de ser extraído del yacimiento presenta una posición estancada con determinada viscosidad y cierta cantidad de gas presente en su solución. En la fase de producción desde el pozo, el gas contenido en el crudo comienza a liberarse debido a la diferencia entre la presión estática y la

⁷ Ibíd.

⁸ Ibíd.

⁹ Ibíd.

¹⁰ Ibíd.

presión de flujo, esta variación provoca que la viscosidad del crudo aumente a medida que se alcanza la superficie¹¹.

La empresa en la actualidad realiza la limpieza de los filtros inyectando vapor de agua suministrado por una caldera Fulton VMP (ver anexo A).

Se conserva la implementación del vapor en la operación, y se selecciona el factor de temperatura para reducir la viscosidad como el más apropiado para el diseño de la máquina.

¹¹ *Ibíd.*

6. DISEÑO CONCEPTUAL

La solución a la problemática planteada se basa en cumplir con los requerimientos del cliente presentadas, utilizando metodologías de desarrollo capaces de ser aplicadas en el entorno real con el fin de la obtención de un diseño accesible a su posterior construcción.

6.1 REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE

A continuación, se especifican los requerimientos y especificaciones propuestos por el cliente para la implementación del producto (ver tabla 3):

Tabla 3. Requerimientos del cliente

Requerimientos	Especificaciones
Duración total de la operación menor de 2 horas	Material resistente a altas temperaturas
Cantidad de filtros a limpiar mayor a 2 unidades	Fácil manejo y montaje
Mantenimiento accesible a la maquina	Costo asequible

Como etapa previa al diseño teórico del producto, se proyecta la manera de operación de la maquina la cual consistirá en dos fases que se describirán a continuación con los respectivos modelos matemáticos que justifiquen la implantación de las etapas:

- Fase de calentamiento: Consistirá en suministrar vapor al interior de la maquina por medio de una tubería central que reparta equitativamente el flujo másico de vapor a todos los filtros, este proceso se llevará a cabo en un tiempo de treinta minutos; posteriormente se justifica el valor de este.
- Fase de limpieza: consistirá en inyectar vapor en un perfil del filtro con alta velocidad con el objetivo de desprender la capa que quede adherida al filtro después del calentamiento. Se especifica una duración de treinta minutos en esta fase para completar la hora y aproximadamente treinta minutos para que el operario lleve a cabo la descarga de los filtros.

6.2 METODOLOGÍA PREVIA PARA LA IMPLEMENTACIÓN FASE DE CALENTAMIENTO

Los crudos muertos que se encuentran en Colombia y el mundo son de propiedades físicas variables, dependiendo de su zona geográfica, la presión en el yacimiento y demás factores que alteran su estado natural. Esta diferenciación origina un estudio de laboratorio para el conocimiento detallado de las características de un crudo en específico, ahora bien, acceder a un laboratorio para llevar a cabo determinadas pruebas resulta una labor larga y un poco compleja sin conocimientos previos, no obstante algunos investigadores con intereses en el ámbito del petróleo dirigen sus estudios a la experimentación con el propósito de descubrir nuevas analogías que proyecten un valor aproximado al esperado de un análisis de laboratorio de las propiedades del crudo.

Por su parte las correlaciones se clasifican según el rango de grado API que abarcan, mostradas en la siguiente tabla.

Tabla 4. Correlaciones propiedades del crudo

Correlación	Y_o	g_g	μ_o [cP]	T [°F]	P [psia]
Al-Marhoun 1985 (Saudi Arabian Oil)	14.3– 44.6	0.752– 1.367	-----	75-240	----- -
De Ghetto et al. (Heavy and Extra- Heavy Oils)	6-22.3	0.623- 1.517	2.4- 354.6	131.4- 250.7	1038.49- 7411.45
Glaso (North Sea Oil)	22.3- 48.1	0.65- 1.276	0.119- 106.6	80-280	400-4000
Hanafy et al. (Egyptian Oil)	14.3- 44.6	0.752- 1.367	0.13-71	107-327	----- -
Khan et al. (Saudi Arabian Oil)	----- -	-----	-----	75-240	14.7-5015
Ng and Egbogah	5-58		-----	70-295	----- -
Petrosky and Farshad (Gulf of Mexico Oil)	16.3- 45	0.578- 0.851	-----	114-288	1700- 10692
Stading (California Oil)	16.5- 63.8	0.5-1.5	-----	60-260	----- -
Vasquez and Beggs (Generally Applicable)	15.3- 59.5	0.511- 1.351	-----	-----	140.7- 9514.7
Velarde et al. (Reduced Variable Approach)	----- -	-----	-----	-----	----- -

Fuente: http://www.fekete.com/SAN/TheoryAndEquations/HarmonyTheoryEquations/Content/HTML_Files/Reference_Material/Calculations_and_Correlations/Oil_Correlations.htm

Con respecto a la anterior tabla, se opta por la correlación *De Ghetto et al.* donde en su experimentación resulta una ecuación donde relaciona las siguientes propiedades: viscosidad, temperatura y gravedad API.

De lo anterior se concluye como el postulado más acertado para aplicar con crudos pesados y extra pesados, el objetivo de la implementación del postulado consiste en decretar la temperatura a la cual se calentará la maquina en su primera fase y obtener un escurrimiento parcial del crudo alojado en los filtros por gravedad.

Basados en el artículo “NEW MODELS TO PREDICT THE VISCOSITY OF EXTRA-HEAVY OIL IN COLOMBIAN FIELDS” de *Mauricio Pertuz-Parra et al*¹². Se puede encontrar un error del 4,69% en los resultados al utilizar el postulado presentado por *De Ghetto et al.*:

$$\log(\mu_{od} + 1) = 2.06492 - 0.0179 \cdot \gamma_{API} - 0.70226 \cdot \log(T)$$

Ecuación 1. Correlación De Ghetto et al.

Dónde:

μ_{od} : Viscosidad de crudo muero [cPoise]

γ_{API} : Gravedad API

T: Temperatura [°F]

¹² PERTUZ, Mauricio, *et al.* Nuevos modelos para el cálculo de la viscosidad de crudos extrapesados en campos colombianos. SciELOColombia [online], junio 2014 [citado 5 mayo 2018]. Disponible en http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-53832014000100002.

6.2.1 Temperatura fase de calentamiento y propiedades físicas del crudo.

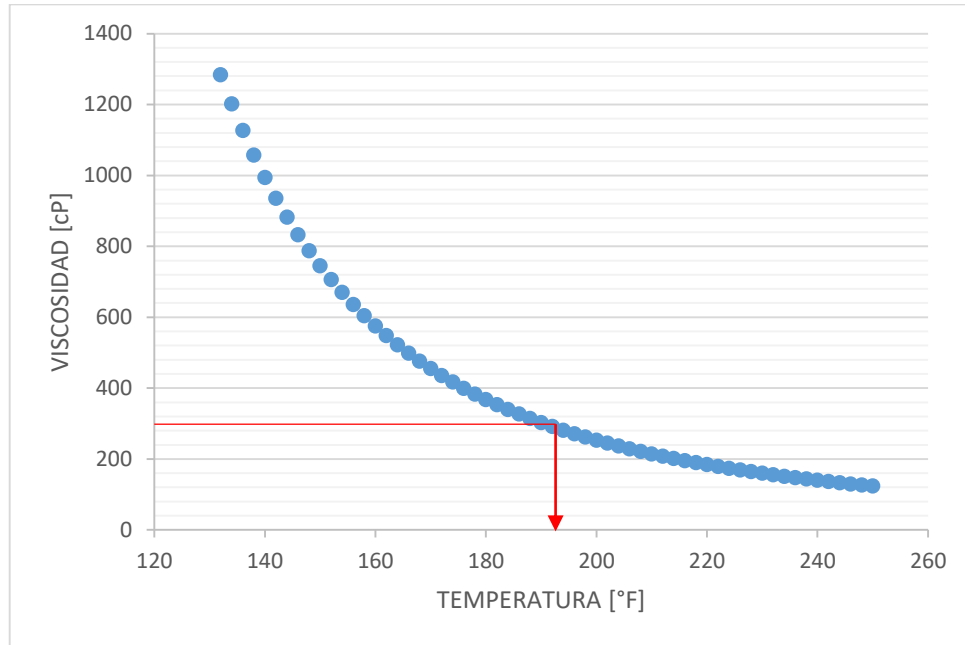
Con el propósito de dar solución a la ecuación De Ghetto et al. se empleó un aplicativo virtual O&GProTololBoxPVT, la cual brinda el cálculo de diversas propiedades de los crudos, apoyado en los diferentes postulados previamente enseñados. El procedimiento empleado en la herramienta virtual radicó en determinar el comportamiento de la viscosidad del crudo con gravedad API de ocho al variar su temperatura en un rango establecido entre 55 [°C] a 121 [°C]. así mismo emplear un juicio ingenieril conforme el resultado del comportamiento para definir la temperatura del calentamiento (ver figuras 7 y 8).

Figura 7. Calculadora virtual O&GProTololBoxPVT

Bubble Point Pressure (P_b)	Gas Volume Factor (B_g)	Pure Water Density (ρ_{pw})
Solution Gas Oil Relation (R_s)	Gas Density (ρ_g)	Water Viscosity (μ_w)
Saturated Oil Volume Factor (B_{ob})	Gas Pseudoreduced Temperature (T_{pr})	Solution Gas Water Relation (R_{sw})
Saturated Oil Compressibility (c_{os})	Wet Gas Volume Factor (B_{wg})	Saturated Water Volume Factor (B_{wb})
Undersaturated Oil Compressibility (c_{oa})	Gas Pseudoreduced Pressure (P_{pr})	Saturated Water Isothermal Compressibility (c_{wb})
Dead Oil Viscosity (μ_{od})	Hydrocarbon Gas Specific Gravity (γ_{gHC})	Undersaturated Water Isothermal Compressibility (c_{wa})
Saturated Oil Viscosity (μ_{ob})	Mixture Gas Pseudocritical Pressure (P_{pcM})	Water Density (ρ_w)
Undersaturated Oil Viscosity (μ_{oa})	Hydrocarbon Gas Pseudocritical Pressure (P_{pCHC})	Undersaturated Water Volume Factor (B_{wa})
Oil Interfacial Tension (σ_{go})	Gas Compressibility (Z factor)	Vapor Pressure (P_v)
Undersaturated Oil Volume Factor (B_{oa})	Hydrocarbon Gas Pseudocritical Temperature (T_{pCHC})	Water Interfacial Tension (σ_{gw})
Saturated Oil Density (ρ_{ob})	Gas Isothermal Compressibility (c_g)	
Undersaturated Oil Density (ρ_{oa})		

Fuente:<http://fluidpvttoolbox.com/production/calculadora.php#collapseDeadOilViscosity>

Figura 8. Comportamiento Temperatura vs Viscosidad crudo 8° API



Asimismo, al obtener la gráfica que representa el comportamiento del crudo según su temperatura, se considera la tabla 5 como criterio de selección del valor de la viscosidad que se debe alcanzar en el crudo al final del calentamiento para su fácil desprendimiento. Se selecciona el rango del producto SAE 20 Aceite motor, que presenta una adecuada fluidez.

Tabla 5. Viscosidades aproximadas de los productos comunes a temperatura ambiente de 21°C

Material	Viscosidad en centiPoise
Aire	0,01
Metano	0,5
Agua	1
Leche	3

Glicol etileno	15
Vino	25
SAE 10 Aceite de motor	85 a 140
SAE 20 Aceite de motor	140 a 420
SAE 30 Aceite de motor	420 a 650
SAE 40 Aceite de motor	650 a 900
Aceite castrol	1000
Miel karo	5000
Miel	10000
Chocolate	25000
Salsa de tomate mostaza	50000
Manteca de cacahuete	70000
Crema	100000
Manteca de cacahuete	250000
compuestos de asfalto	500000
Polímeros fundidos	1000000
Compuestos de caucho	5000000

Fuente: <http://www.atpplleal.com/Pujat/file/VISCOSIDAD.pdf>

El valor promedio correspondiente al rango del producto SAE 20 se asume aritméticamente de 280 [cP], posteriormente con este criterio de viscosidad se identifica en la gráfica viscosidad vs temperatura (ver figura 9) el valor más cercano para proceder en la lectura de la temperatura.

El valor de lectura de la temperatura se corrobora con la ecuación 1. de donde se obtiene.

$$\mu_{od} = 272,575 \text{ [cP]} \longrightarrow T = 196 \text{ [}^\circ\text{F]}$$

Se concluye que la fase de calentamiento termina cuando se haya alcanzado en el crudo una temperatura de 91 [°C]

A partir del anterior resultado, se puede determinar la velocidad de calentamiento requerida para cumplir con el tiempo especificado:

$$\dot{T}_a = \frac{T_{\max} - T_e}{\delta t} = 126 \text{ [}^\circ\text{C/h]}$$

Donde:

T_{\max} = Temperatura máxima del aire en el interior= 91 [°C]

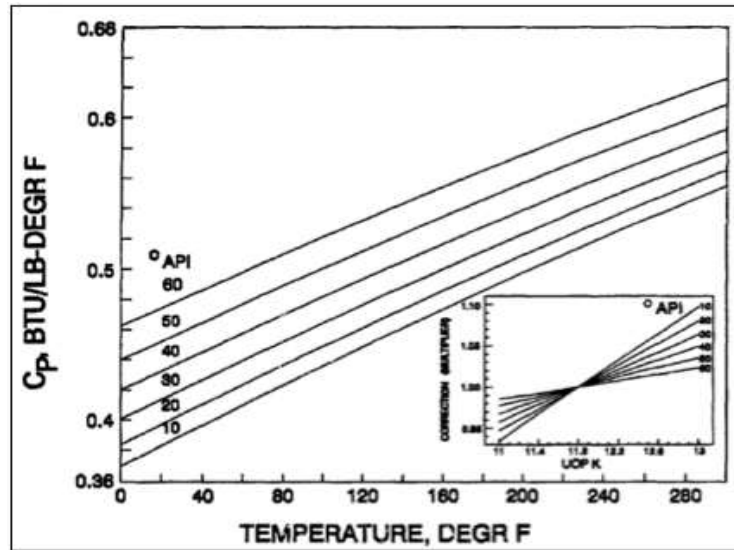
T_e = Temperatura ambiente 28 [°C]

δt = tiempo máximo de calentamiento, 0,5[h]

A continuación, conocida la temperatura promedio de la fase de calentamiento (aproximadamente 60 °C) se procede a determinar la propiedad de calor específico para el crudo, El procedimiento para el cálculo se basó de un documento de libre acceso perteneciente a *John M. Campbell Consulting (JMCC)*. Basados en datos empíricos realizados por los investigadores de la *JMCC* construyeron el grafico mostrado (ver figura 9), donde se representa el cambio del calor específico para diferentes rangos de gravedad API del crudo al variar la temperatura¹³.

¹³ WRIGHT, Wes. *Tip of the month: simple equations to approximate changes to the properties of crude oil with changing temperature*. [En línea]. 2016. (Recuperado en 5 mayo 2018.) Disponible en <http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2014/04/simple-equations-to-approximate-changes-to-the-properties-of-crude-oil-with-changing-temperature/>

Figura 9. Temperatura vs Calor específico



Fuente: <http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2014/04/simple-equations-to-approximate-changes-to-the-properties-of-crude-oil-with-changing-temperature/>

Posteriormente desarrollan una ecuación para determinar la variación de la capacidad de calor como una función de la gravedad API y la temperatura. La expresión matemática deriva de una regresión aplicada a los datos extraídos de la gráfica (Temperatura vs Calor específico), para obtener el algoritmo que se presenta como ecuación¹⁴:

$$C_p = (-1.39 \times 10^{-6} * T + 1.847 \times 10^{-3}) * \text{°API} + (6.312 \times 10^{-4}) * T + 0.352$$

Ecuación 2. Correlación del calor específico para crudo

Donde:

$C_p = \text{Btu}/ (\text{lbm} * \text{°F})$

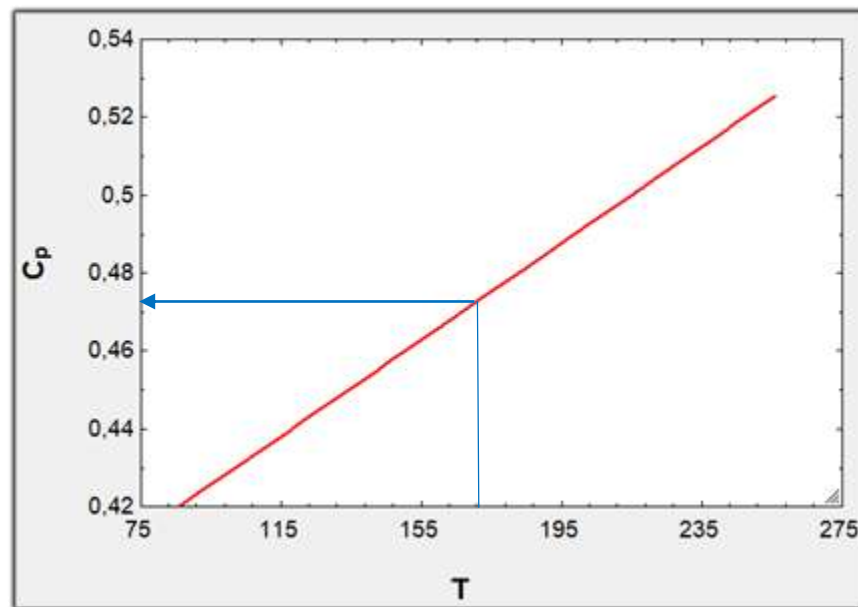
$T = \text{°F}$

¹⁴ Ibíd.

°API = Gravedad API del petróleo

En relación a lo mencionado se procede a determinar el comportamiento del calor específico para el crudo con gravedad API 8 utilizando la ecuación 2 con una variación de la temperatura en el rango comprendido entre 30 [°C] a 124 [°C]. El resultado se muestra por medio de un gráfico (ver figura 10).

Figura 10. Temperatura vs Calor específico crudo 8° API



De esta manera se determina el valor de la propiedad para emplear en cálculos posteriores, en base al promedio aritmético de los resultados para el calor específico correspondientes al rango de la temperatura.

$$C_p = 0,47157 \text{ [Btu/ lbm * °F]} \approx 1973,0488 \text{ [J/Kg * °C]}$$

6.3 CAPACIDAD DE CALENTAMIENTO REQUERIDO EN LA MAQUINA

6.3.1 Parámetros a determinar.

En este caso contamos con una caldera con capacidad hasta 1000 [KCAL/HR] en la salida, lo cual nos permitirá hacer frente a cualquier posible demanda, ya que se tendrá en cuenta los regímenes de calentamiento establecidos, el volumen de producción proyectado y las características físicas del sistema de distribución de vapor.

La capacidad de una caldera se expresa generalmente de dos formas:

- Mediante la evaporación real en una hora desde las condiciones de agua de alimentación hasta las condiciones de vapor producido.
- Por medio de la salida o entrega de la caldera, Q_t , en unidades de flujo de calor.

6.3.2 Modelo matemático.

El comportamiento térmico del sistema se modela utilizando el análisis de capacidad térmica concentrada. Cada componente del sistema se reemplaza por un elemento hipotético de conductividad térmica infinita y capacidad térmica.

-En el sistema de calentamiento para este caso, los filtros se localizan en el interior de la máquina.

-El calor que entra a la máquina, entrega calor y humedad al aire interior calentándolo y saturándolo simultáneamente. El aire a su vez, transmite calor por convección a los filtros y a las paredes del cilindro.

-El flujo de calor Q entregado por el vapor se establece como constante y es igual a:

$$\dot{Q}_t = \dot{V} \cdot [i_v - i_w]$$

Ecuación 3. Flujo de calor del vapor

Dónde:

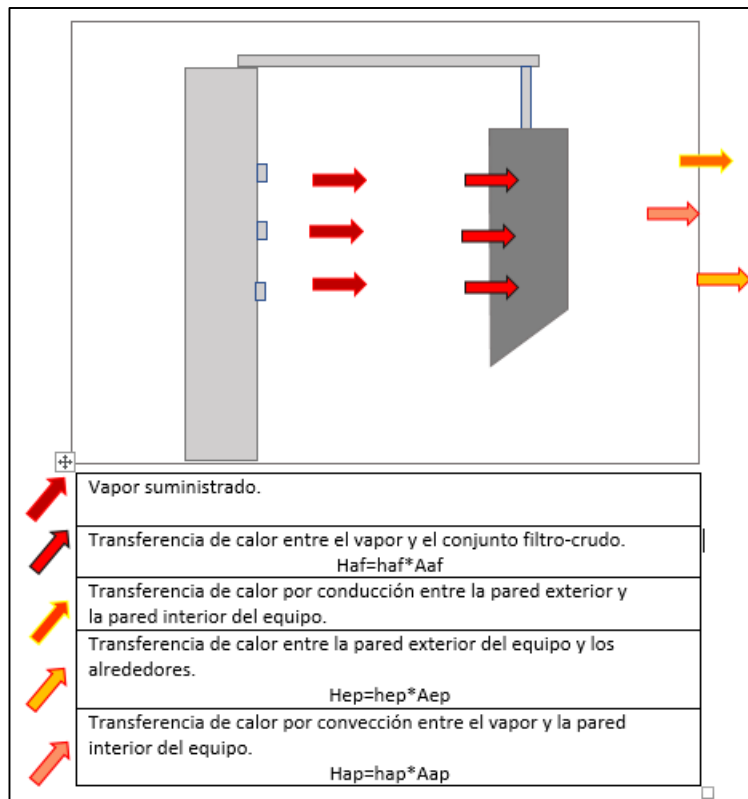
\dot{V} =flujo de calor que entra al sistema, [Kg/h]

i_w = Entalpía del vapor evaluada a las condiciones de entrada, [KJ/Kg]

i_v = Entalpía del condensado evaluada a la temperatura media de operación, [KJ/Kg]

A continuación, se representa el esquema del comportamiento dentro de la máquina por efectos de la transferencia de calor (ver figura 11).

Figura 11. Esquema de calores



Consideraciones.

-Antes de comenzar la fase de calentamiento el sistema se encuentra en estado estable. La temperatura es uniforme en todo el sistema e igual a la temperatura del ambiente.

-Durante la fase de calentamiento a temperatura máxima el sistema alcanza de nuevo otro estado estable manteniendo la temperatura. El calor suministrado al interior de la maquina es igual al calor perdido por convección exterior.

6.4 PLANTEAMIENTO FASE DE CALENTAMIENTO

El esquema (ver figura 11) define cada componente del sistema del modelo utilizado, para ilustrar el comportamiento térmico del sistema de calentamiento de los filtros. Aplicando la primera ley de la termodinámica a cada elemento del modelo, obtenemos la siguiente expresión;

$$\dot{V} \cdot l_v = m_a \cdot \left[C_y \cdot \frac{dT_a}{dt} + l_{va} \cdot \frac{dw_{abs}}{dt} \right] + H_{af} \cdot [T_a - T_f] + H_{ap} \cdot [T_a - T_p]$$

Ecuación 4. Primera ley de la termodinámica en todo el sistema

Dónde:

m_a : Masa del aire seco al interior, [Kg]

C_y : Calor específico del aire húmedo interior, [KJ/Kg-K]

W_{abs} : Humedad absoluta del aire interior, [Kg de vapor/Kg de aire seco]

l_{va} : Entalpía del vapor de agua contenido en el aire interior, [KJ/Kg]

H_{af} : Coeficiente de transferencia de calor entre el aire y el filtro, [KJ/Kg]

H_{ap} : Coeficiente de transferencia de calor entre el aire y la pared del cilindro, [KJ/Kg]

T_a : Temperatura del aire interior, [°C]

T_p : Temperatura de la pared del cilindro, [°C]

T_f : Temperatura del filtro, [°C]

Se considera un balance másico en el aire, representado en la siguiente ecuación:

$$\dot{V} = m_a \cdot \frac{dw_{abs}}{dt}$$

Ecuación 5. Balance másico del aire interior

Combinando las ecuaciones 4 y 5 obtenemos:

$$\dot{Q}_{cal} = m_a \cdot \left[C_y + l_{va} \cdot \frac{dw_{abs}}{dT_a} \right] \cdot \frac{dT_a}{dt} + H_{af} \cdot [T_a - T_f] + H_{ap} \cdot [T_a - T_p]$$

Ecuación 6. Ecuación diferencial comportamiento del calentamiento

Dónde:

Q_{cal} : Flujo de calor entregado por el vapor durante la fase de calentamiento, [KW]

El factor que afecta la razón de cambio de la temperatura T_a evaluado como un valor promedio puede emplearse para definir la capacidad calorífica del aire:

$$C_a = m_a \cdot \left[C_y + l_{va} \cdot \frac{\delta w_{abs}}{\delta T_a} \right]$$

Ecuación 7. Capacidad calorífica del aire

Obteniendo:

$$C_a \cdot \frac{dT_a}{dt} = \dot{Q}_{cal} - H_{ac} \cdot (T_a - T_f) - H_{ap} \cdot (T_a - T_p)$$

Ecuación 8. Ecuación diferencial para la capacidad calorífica del aire

Carga de Filtro-crudo: La razón de cambio de la energía sensible en el concreto es igual al calor transmitido por convección desde el aire interior hacia las paredes del filtro-crudo.

$$C_c \cdot \frac{dT_f}{dt} = H_{ac} \cdot (T_a - T_f)$$

Ecuación 9. Ecuación diferencial capacidad calorífica del conjunto filtro-crudo

Dónde:

C_c = capacidad térmica aparente del filtro-crudo.

Pared de la maquina: La razón de cambio de la energía sensible de las paredes, es igual a la diferencia del calor por convección desde el aire interior y el calor perdido por convección al exterior.

$$C_p \cdot \frac{\delta_{T_p}}{\delta_t} = H_{ap} \cdot [T_a - T_p] - H_{ep} \cdot [T_p - T_e]$$

Ecuación 10. Ecuación diferencial Capacidad calorífica paredes de la estructura

Dónde:

C_p : capacidad térmica de la pared, [KJ/Kg]

H_{ep} : Coeficiente de transferencia de calor entre la pared y el aire exterior, [W/K]

Te: Temperatura exterior, [°C]

Factor de calentamiento: Al estimar, mediante la rata de calor, \dot{Q}_{iso} , necesaria para mantener condiciones de estado estable durante el periodo isotérmico a la temperatura máxima de aire de aire interior, T_{amax} , obtenemos:

$$\dot{Q}_{iso} = H_{ap} \cdot \left[\frac{H_{ep}}{H_{ap} + H_{ep}} \right] \cdot (T_{amax} - T_e)$$

Ecuación 11. Rata de calor

Definiendo el factor de calentamiento, FC, como la razón de los flujos entregados durante los periodos de calentamiento e isotérmico respectivamente:

$$FC = \frac{Q_{cal}}{\dot{Q}_{iso}}$$

Ecuación 12. Factor de calentamiento

Se obtiene:

$$\dot{Q}_{cal} = \left[\left(\frac{H_{ap} \cdot H_{ep}}{H_{ap} + H_{ep}} \right) \cdot (T_{amax} - T_e) \right] \cdot FC$$

Ecuación 13. Máximo flujo de calor requerido

6.4.1 Determinación de los requerimientos de vapor.

Evaluado el factor de calentamiento para un régimen de aumento de temperatura específico, el flujo de vapor requerido para alcanzar la temperatura máxima en el tiempo establecido se estima mediante la expresión:

$$\dot{V}_{\text{cal}} = \frac{FC \cdot \dot{Q}_{\text{iso}}}{lv - lw}$$

Ecuación 14. Flujo de vapor requerido

El flujo de vapor para mantener las condiciones de periodo isotérmico viene dado por:

$$\dot{V}_{\text{iso}} = \frac{\dot{Q}_{\text{iso}}}{lv - lw}$$

Ecuación 15. Flujo de vapor condición isotérmica

$$\dot{Q}_{\text{iso}} = \frac{Ta_{\text{max}} - Te}{\frac{1}{Hap} + Rp + Hep}$$

Ecuación 16. Flujo de calor requerido para mantener el sistema estable

Dónde:

Rp: Resistencia térmica de pared, [K/W]

6.5 CALCULOS FASE DE CALENTAMIENTO

El diseño de la maquina está orientado hacia los cálculos de espesor de pared, determinación de la capacidad de calentamiento y dimensión interna de la zona de calentamiento. En esta sección se muestran los cálculos térmicos, aplicados al diseño de la máquina, además de la descripción de sus componentes.

Para definir las características más convenientes para la máquina, se tienen en cuenta algunos factores:

- Temperatura mínima del aire interior a alcanzar en la fase de calentamiento.
- Tamaño y forma del filtro.
- Número de filtros.
- Dimensiones propuestas para el equipo.

6.5.1 Temperatura mínima del aire al adquirir en el interior.

Esta temperatura será la mínima que el aire debe alcanzar para así efectuar el proceso de limpieza adecuada, su valor debe ser superior a 91 °C, ya que a esta temperatura se reduce la viscosidad del crudo al punto requerido.

6.5.2 Tamaño y forma del filtro.

El filtro tiene una forma de cilindro truncado hueco cuyas dimensiones son 7 [in] de diámetro, altura mayor de 18 [in] y altura menor de 10 [in].

6.5.3 Cantidad de filtros que se requieren someter al calentamiento.

El número de filtros es de cinco en cada proceso de calentamiento y limpieza, aunque en la teoría se emplea uno solo para determinar la evolución del proceso.

6.5.4 Dimensiones propuestas del equipo.

El diseño se plantea una altura de 60 [in], diámetro externo de 45 [in], apoyada en cuatro patas para dar estabilidad en terrenos abiertos. La pared se construirá con lámina de acero de 6 mm de espesor, calibre 1/4 [in]

6.6 DISEÑO TERMICO

En esta sección se relaciona los parámetros térmicos que se consideran para el dimensionamiento de la máquina, además se presenta la configuración a emplear para la ubicación del filtro en el interior del equipo y así plantear los diferentes procesos térmicos que se presentan en el desarrollo de la operación.

6.6.1 Descripción de los componentes.

La posición de los filtros se planteó de forma vertical para así garantizar el flujo uniforme de vapor alrededor de ellos.

La máquina se diseña de tal forma que sea fácil y cómodo para el operario el manejo de los filtros, la distribución del vapor se realiza por medio de tubería rígida, ubicada a una distancia máxima de 20 [cm] alejada del filtro, donde se aprovecha el área proyectada por las toberas para aplicar el calentamiento y limpieza sobre un perfil del filtro. (ver figura 12).

La solución numérica de las ecuaciones anteriormente planteadas para la fase de calentamiento, inicia con la especificación de las dimensiones obtenidas con el diseño del equipo (capítulo 7).

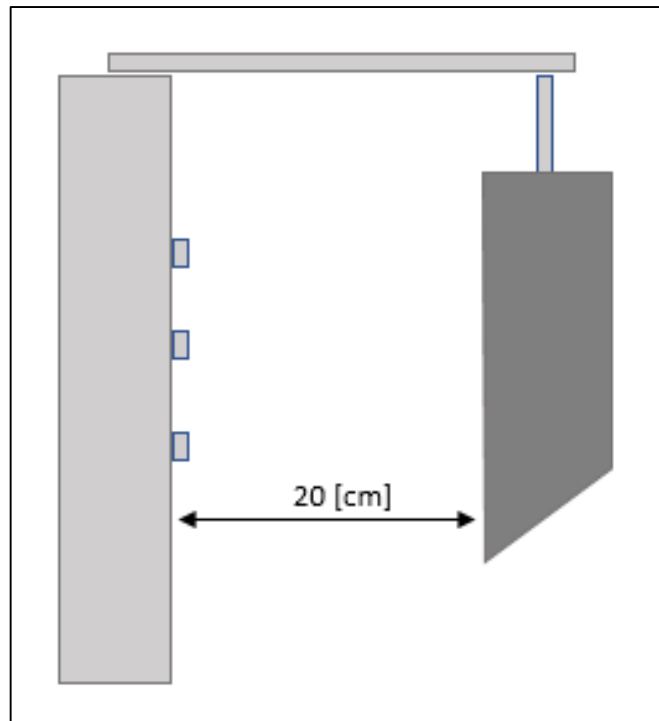
Volumen del aire en el interior de la cámara, V_a es igual a:

$$V_a=0,7558 [m^3]$$

El área de transferencia del aire hacia las paredes de la estructura, está dada por el área de un cilindro.

$$A_{ap} = 2,052 \text{ [m}^2\text{]}$$

Figura 12. Posición de los filtros en el interior de la máquina



6.6.2 Espesor de pared.

En el espesor de pared se tiene en cuenta la transferencia de calor por conducciones desde el interior al exterior teniendo como un factor importante el material el cual es acero al carbono además de analizar si es necesario aplicar un aislante térmico para cumplir con el tiempo de cuarenta y cinco minutos máximo que debe durar el calentamiento.

6.6.3 Dimensiones estructura exterior.

Con el espesor de la pared, las siguientes dimensiones quedan definidas: diámetro exterior, diámetro interior y altura de la cámara. Con base en los datos anteriores, se procede al cálculo del volumen total y el área de la superficie exterior.

$$V_t = 2,672 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$A_{ep} = 2,673 \text{ [m}^2\text{]}$$

6.6.4 Propiedades térmicas de la pared.

Se determina el volumen de pared mediante la diferencia entre el volumen total, V_t , y el volumen interior, V_a .

$$V_p = 0,01595 \text{ [m}^3\text{]}$$

Con base en los datos de volumen, área y espesor de la pared, anexando el dato de la densidad del acero suministrado por la tabla 6, se calcula el valor de la densidad y calor específico para la pared:

$$\rho_p = \frac{\rho_{\text{acero}} \cdot A_{ap} \cdot ep}{V_p} = 7492 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

$$C_p = \frac{\rho_{\text{acero}} \cdot A_{ap} \cdot ep \cdot C_{p_{\text{acero}}}}{\rho_p \cdot V_p} = 0,502 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

Posteriormente se determina el valor de la capacidad calorífica del material de la pared.

$$C_p = \rho_p \cdot V_p \cdot C_p = 63,49 \text{ [KJ/K]}$$

Tabla 6. Propiedades térmicas de los materiales a temperatura ambiente

Material	Densidad, Kg/m ³	Calor específico, KJ/kg-K	Conductividad térmica, W/m-K
Acero al carbono	7960	0,502	16,3
Aluminio	2800	896	205
Cobre	8900	0,385	385
Lana de vidrio	200	0,656	0,041
Crudo	1011	1,973	
Aire	1,223	1063	0,024

Fuentes: Serway. Physics for Scientists and Engineers Sears, Z & Y. física Universitaria. Autores.

La Resistencia térmica de la pared se define como la relación entre el espesor y la conductividad térmica del acero inoxidable.

$$r_p = \frac{ep}{K_{\text{acero}}} = 0,3681 \text{ [m}^2\text{*K/KW]}$$

De manera inversa se puede utilizar la ecuación para determinar la conductividad térmica promedio de pared, K_p , se da mediante la división del espesor por la resistencia térmica de la pared.

$$K_{pared} = \frac{e_p}{r_p} = 0,0163 [\text{KW}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$$

Posteriormente se requiere conocer la capacidad que tiene la pared para difuminar la temperatura en su interior, la cual se expresa en la propiedad de difusividad térmica:

$$\alpha = \frac{K_{pared}}{\rho_p \cdot C_p} = 0,000004334 [\text{m}^2/\text{s}]$$

6.6.5 Propiedades térmicas para el filtro y crudo de estudio.

Partiendo de las dimensiones establecidas para el filtro, así mismo el espesor del crudo. Se determina el volumen del filtro V_{filtro} y su área de superficie, de igual manera para el crudo se calcula su volumen del crudo V_c y área de superficie. (Capítulo 7)

$$V_{crudo} = A_{crudo} \cdot \text{espesor} = 0,02523 [\text{m}^3]$$

$$V_{filtro} = 0,0005562 [\text{m}^3]$$

$$A_{filtro} = 0,4332 [\text{m}^2]$$

$$A_{crudo} = 0,5046 [\text{m}^2]$$

De la tabla 6 se identifica los valores para la densidad y calor específico para el material del filtro y el crudo, luego se estima un valor promedio de densidad y calor específico para el conjunto conformado filtro-crudo; considerando el espesor del conjunto filtro-crudo como una capa de 5 [cm].

$$\rho_f = \frac{\rho_{\text{filtro}} \cdot V_{\text{filtro}} + \rho_{\text{crudo}} \cdot A_{\text{crudo}} \cdot \text{espesor}}{V_{\text{filtro}} + V_{\text{crudo}}} = 1136 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

$$C_f = \frac{\rho_{\text{filtro}} \cdot V_{\text{filtro}} \cdot C_{p_{\text{filtro}}} + \rho_{\text{crudo}} \cdot V_{\text{crudo}} \cdot C_{p_{\text{crudo}}}}{\rho_f \cdot [V_{\text{filtro}} + V_{\text{crudo}}]} = 1,788 \text{ [KJ/K]}$$

Para la conductividad térmica del conjunto, se toma el valor especificado para el material del filtro el cual es acero:

$$K_{\text{filtro}} = 0,016 \text{ [KW /m-K]}$$

La difusividad térmica del conjunto filtro-crudo se calcula:

$$\alpha_{\text{filtro}} = \frac{K_f}{\rho_f \cdot C_f} = 0,000008002 \text{ [m}^2\text{/s]}$$

6.6.6 Capacidad térmica del aire interior.

La capacidad térmica del aire alojado en el interior de la máquina, se plantea su comportamiento con base a la ecuación 7, se procede a determinar el valor de cada una de las constantes para posteriormente ser remplazados.

Por consiguiente, se determina de la carta psicrométrica el valor para el calor húmedo C_y del aire y el cambio de humedad absoluta, (ver anexo B); considerando su temperatura a 91 [°C] y en condición de saturación.

$$C_y = 4,07 \text{ [KJ/Kg-K]}$$

$$\Delta W_{abs} = W_{abs2} - W_{abs1} = 1,57 \text{ [kg vapor/kg aire seco]}$$

Donde:

$$W_{abs1}: \text{humedad absoluta a } 28 \text{ [°C]} = 0,02412 \text{ [kg vapor/kg aire seco]}$$

$$W_{abs2}: \text{humedad absoluta a } 91 \text{ [°C]} = 1,594 \text{ [kg vapor/kg aire seco]}$$

La masa del aire viene dada por la siguiente expresión.

$$m_a = \rho_a \cdot (V_a - 5 \cdot V_{filtro}) = 0,7318 \text{ [Kg de aire seco]}$$

La densidad del aire se obtiene de la tabla de propiedades del aire a 1 [atm] de presión (ver anexo C)

$$\rho_a = 0,9718 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

Asimismo, el calor latente de vaporización l_{va} , y la presión parcial de vapor contenido en el aire se determinan considerando su temperatura a 91 [°C], cuyo valor se obtiene las tablas de propiedades del agua saturada (ver anexo C).

$$l_{va} = 2659,6 \text{ [KJ/Kg}\cdot\text{K]}$$

$$P_{va} = 0,7128 \text{ [atm]}$$

Finalmente, con todas las variables definidas se procede al cálculo para la capacidad térmica del aire alojado en el interior, cuyo resultado se muestra a continuación:

$$C_a = 51,39 \text{ [KJ/K]}$$

6.6.7 Cálculo de los coeficientes de transferencia de calor.

En la fase de calentamiento si la temperatura de la superficie de la pared de la máquina es inferior a la temperatura de saturación del vapor contenido en el aire, la condensación del vapor se produce sobre estas superficies.

Debido a la capacidad térmica del aire, el aumento inicial de su temperatura es rápido y se presenta desde el comienzo del calentamiento, periodo durante el cual, la condensación dirige la transferencia de calor desde el aire interior hacia las paredes de la máquina.

La condensación sobre una superficie se puede producir de dos formas, utilizando los términos de goteo y película. Se considera la teoría de película, debido que el estudio de forma de gota se presenta solo en condiciones especiales y no se tiene en cuenta.

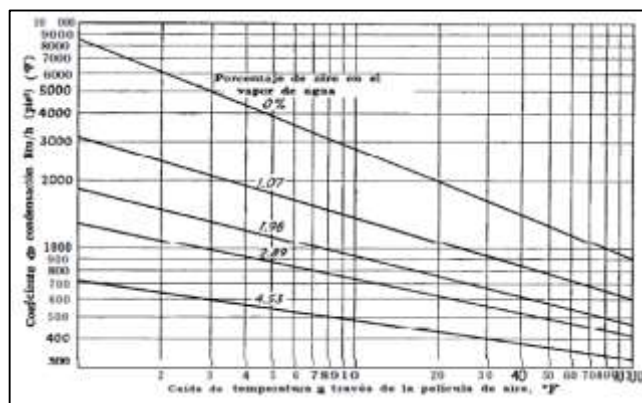
Cuando se mezcla el vapor de agua con el aire y la temperatura de pared se encuentra por debajo del punto de rocío, se crea una película de condensado en la pared de la máquina. Según los datos de Othmer¹⁵ (ver figura 13) se genera una película de aire y vapor alrededor de la película de condensado, la presión parcial

¹⁵ KERN J, Donald. Procesos de transferencia de calor: condensación de vapores simples. México: CECSA, 1999. P.356.

en la pared corresponde al condensado frío, P_w , y la presión del vapor en la película del aire se sitúa entre, la presión de condensado P_w y presión del vapor P_{va} .

El paso de un componente a través de otro se llama difusión o transferencia de masa. En un sistema de difusión la razón a la que el vapor se condensa no depende absolutamente del mecanismo de condensación de Nusselt sino de las leyes que gobiernan la difusión¹⁶.

Figura 13. Influencia del aire en el coeficiente de condensación de vapor a 230°F (Datos de Othmer)



Fuente: KERN J, Donald. Procesos de transferencia de calor: condensación de vapores simples. México: CECSA, 1999. P.356.

Para determinar el valor numérico de los coeficientes de transferencia se considera que el sistema está en estado estable a la temperatura final de calentamiento, el flujo de calor (Q_{iso}) en el interior de la pared es igual al flujo de calor que la pared conduce y entrega por convección al exterior:

¹⁶ Ibíd.

$$h_{aw} \cdot (T_a - T_w) + K_f \cdot M_v \cdot i_{va} \cdot (P_v - P_w) = \frac{T_w - T_e}{r_p + \frac{1}{h_{pe}}}$$

Ecuación 17. Flujo de calor por unidad de área

Donde:

\dot{q} : Flujo de calor por unidad de área transferido al exterior, [KW/m²]

h_{aw} : Coeficiente de transferencia de calor a través de la película de aire, [KW/m²*K]

h_{ep} : Coeficiente de transferencia de calor entre la pared y el exterior, [KW/m²*K]

r_p : Resistencia térmica de la pared, [m² * K/KW]

K_f : Coeficiente de difusión de vapor a través de la película de aire, [mol/s*m²*atm]

M_v : Masa molecular de vapor de agua, [Kg/KJ]

i_{va} : Entalpia de vaporización, [KJ/Kg]

T_a : temperatura del aire interior, [°C]

T_w : Temperatura de condensado, [°C]

T_e : Temperatura del exterior, [°C]

P_v : Presión parcial del vapor en el aire, [atm].

P_w : Presión parcial del vapor en el condensado, [atm].

Por medio de correlaciones de transferencia de masa y calor, se presenta la analogía de la difusión de Chilton y Colburn¹⁷, donde expresan que la transferencia de calor y la razón de difusión no se presentan independientemente. Al utilizar los resultados de esta analogía para la condensación de vapor de agua en presencia del aire, se pueden relacionar los coeficientes de transferencia de calor y de difusión a través de la película de aire mediante la expresión:

¹⁷ Ibíd.

$$k_f = \frac{1}{C \cdot M_m} \cdot \left[C \cdot \rho \cdot \frac{K_d}{K} \right]^{[2 / 3]} \cdot \frac{h_{aw}}{pgf}$$

Ecuación 18. Coeficiente de difusión de vapor

Previamente se determinan los valores medios de las propiedades térmicas de la película de aire como: densidad, calor específico, conductividad térmica, peso molecular, difusividad, a través de la cual se presenta difusión de vapor y transferencia de calor, se calculan teniendo en cuenta los datos ya mencionados para las siguientes propiedades: (humedad absoluta, calor específico del aire interior y densidad del aire):

-Densidad:

$$\rho = \rho_a \cdot [1 + W_{abs}] = 2,521 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

-Calor específico:

$$C = \frac{c_y}{1 + W_{abs}} = 1,569 \text{ [KJ/Kg-K]}$$

De la tabla 6, se determinan los valores para la conductividad térmica del aire y el vapor:

$$K_a = 0.000023 \text{ [KW/m-K]}$$

$$K_v = 0.0000331 \text{ [KW/m-K]}$$

-conductividad térmica:

$$K = \frac{k_a + W_{abs} \cdot k_v}{1 + W_{abs}} = 0,00002921 \text{ [KJ/kg-K]}$$

Peso molecular del aire y el vapor

$$M_a = 29 \text{ [Kg/mol]}$$

$$M_v = 18 \text{ [Kg/mol]}$$

-Peso molecular:

$$M_m = \frac{M_a + w_{abs} \cdot M_v}{1 + w_{abs}} = 22,24 \text{ [Kg/mol]}$$

Volúmenes atómicos del aire y el vapor¹⁸.

$$V_a = 20,1 \text{ [m}^3\text{/kg átomo]}$$

$$V_v = 12,7 \text{ [m}^3\text{/ kg átomo]}$$

-Difusividad del aire:

$$K_d = 1,1 \times 10^{-7} \cdot [T_a + 273]^{1,75} \cdot \left[\frac{\left(\frac{1}{M_a} + \frac{1}{M_v} \right)^{0,5}}{P \cdot (V_a^{1/3} + V_v^{1/3})^2} \right] = 0.00001961 \text{ [m}^2\text{/s]}$$

¹⁸ SHERWPPD, T.K. Mass transfer. New York. Mc Graw-Hill. 1975

-Diferencia media logarítmica de la presión parcial del aire a través de la película de aire:

$$P_{gf} = \frac{P_{va} - P_w}{2,3 \cdot \log^* \left(\frac{P - P_w}{P - P_{va}} \right)}$$

Ecuación 19. Diferencia media logarítmica de la presión parcial del aire

Donde:

$P = 2$ [atm]

El coeficiente, h_{aw} , se determina utilizando la ecuación simplificada para la convección libre de un cilindro hueco vertical de diámetro igual a 45 in y aire a presión atmosférica¹⁹.

$$h_{aw} = 0,0015182 \cdot [T_a - T_w]^{0,25}$$

Ecuación 20. Coeficiente de transferencia de calor por convección (aire y película de condensado)

El coeficiente de transferencia de calor entre la pared interior y el aire interior recibirá la nomenclatura de h_{ap} , de igual manera el coeficiente de transferencia de calor entre la pared y el aire exterior se denotará h_{ep} . Las cuales se determina bajo condiciones de operación estable, y su comportamiento se expresa de la siguiente manera:

¹⁹ Kothandaraman, C.P. heat and mass transfer: data book. 3 ed. New Delhi. Wiley Eastern. 1977.

$$h_{ep} = 0,005938 \cdot \dot{q}^{0,2}$$

Ecuación 21. Coeficiente de transferencia de calor entre (pared y aire exterior)

$$h_{ap} = \frac{1}{\frac{T_a - T_e}{\dot{q}} - \left[r_p + \frac{1}{h_{ep}} \right]}$$

Ecuación 22. Coeficiente de transferencia de calor entre (aire interior y pared)

Seguidamente la temperatura del aire se fija igual a la temperatura máxima, T_{max} . Esto se hace por dos motivos:

-En primer lugar, porque se deben obtener valores representativos de los coeficientes involucrados durante el calentamiento, (Transitorio), y el periodo isotérmico a máxima temperatura, (estable).

-El otro motivo es debido a que la razón de transferencia de calor en estado transitorio se evalúa con una aproximación, considerando la conducción estable a través de un potencial de temperatura alto.

Posteriormente de calcular el parámetro K_f junto con la temperatura exterior, T_e , y la resistencia de la pared T_p , se determinan los valores, T_w y P_w del condensado, obtenidos de la ecuación 19, 20 y 21. La única variable a calcular es la temperatura de condensado T_w . Para dar solución al sistema de ecuaciones descrito se efectúa un proceso iterativo de cálculo:

$$T_w = 66,42 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$P_w = 0,702 \text{ [atm]}$$

Seguidamente al proceso iterativo, los valores obtenidos se convierten en punto de partida para los siguientes resultados:

$$h_{aw} = 0,003381 \text{ [KW/m}^2\text{-K]}$$

$$P_{gf} = 1,294 \text{ [atm]}$$

$$K_f = 0,0001436 \text{ [mol/m}^2\text{-atm-s]}$$

$$\dot{q} = 0,1573 \text{ [KW/m}^2\text{]}$$

$$h_{ap} = 0,0064 \text{ [KW/m}^2\text{-K]}$$

$$h_{ep} = 0,004102 \text{ [KW/m}^2\text{-K]}$$

Se asume el mismo valor de h_{ap} para el coeficiente de transferencia de calor del conjunto filtro-crudo, h_{af} .

$$h_{af} = 0,0064 \text{ [KW/m}^2\text{-K]}$$

Calculados los coeficientes de transferencia de calor por unidad de área, calculamos los coeficientes H_{ap} , H_{ep} y H_{ac} , Para poder determinar el flujo de calor requerido:

$$H_{af} = h_{af} \cdot A_{af} = 0,006002 \text{ [KJ/K]}$$

$$H_{ap} = h_{ap} \cdot A_{ap} = 0,01313 \text{ [KJ/K]}$$

$$H_{ep} = h_{ep} \cdot A_{ap} = 0,01097 \text{ [KJ/K]}$$

6.6.8 Capacidad de calentamiento requerida.

La capacidad de la caldera que suministrara en la maquina limpiadora de filtros se establece mediante la evaluación del flujo de calor, \dot{Q}_{cal} , requerido para adelantar el calentamiento a la máxima velocidad de aumento en la temperatura al interior.

$$Q_{cal} = FC \cdot \dot{Q}_{iso}$$

El flujo de calor, \dot{Q}_{iso} que debe ser suministrado a la máquina para mantener condiciones estables, cuando se logre la temperatura del interior máxima, descartando la resistencia térmica de la pared:

$$\dot{Q}_{iso} = \left[\frac{H_{ap} \cdot H_{ep}}{H_{ap} + H_{ep}} \right] \cdot [T_{a_{max}} - T_e] = 0,3765 \text{ [KW]}$$

La temperatura llegara hasta el límite superior establecido de 91 [°C] partiendo desde la temperatura ambiente considerada a 28 [°C] en un lapso de tiempo de media hora, por consiguiente, la velocidad de calentamiento es 126 [°C/h].

$$t_{cal} = 0,5 \text{ h}$$

Con el tiempo establecido se determina el factor de calentamiento, FC, inicialmente calculando los siguientes parámetros adimensionales:

$$\alpha = \frac{C_{ac}}{C_p} = 0,8367$$

Donde:

$$C_{ac} = C_a + C_f \cdot \frac{DT_f}{dT_a} = 53,12$$

$$\beta = \frac{H_{ap}}{H_{ep}} = 1,197$$

$$\gamma = \frac{\alpha}{\beta} = 0,699$$

$$\phi = 1 + \alpha + \beta = 3,0337$$

En consideración se presenta tres condiciones para seleccionar la función adecuada que relaciones todos los parámetros adimensionales anteriormente mencionados.

$$\left[\frac{\phi}{2} \right]^2 - \gamma = \text{condicion}$$

Condición > 0

Condición = 0

Condición < 0

$$\left[\frac{\phi}{2} \right]^2 - \gamma = \text{condicion} = 1,6018$$

A continuación, se presenta a relación para $G(Jcal)$, siendo esta función de $Jcal$ la cual representa el tiempo de forma adimensional.

$$G(Jcal) = \frac{e^{-(\sigma+\omega)*Jcal}}{2 * w} * ((\sigma + \omega) * e^{2*w*Jcal} - (\sigma - \omega))$$

Donde:

$$\sigma = \frac{\phi}{2} = 1,5168$$

$$\omega = \sqrt{\left[\frac{\phi}{2}\right]^2 - \gamma} = 1,26566$$

$$J_{cal} = t_{cal} \cdot \frac{H_{ap}}{C_{ac}} = 0,717 \text{ [h]}$$

Luego de remplazar se obtiene:

$$G(J_{cal}) = 0,8341 \quad 0,9046$$

Posteriormente se determina el factor de calentamiento FC, con la siguiente ecuación:

$$FC = \frac{1}{1 - G_{J_{cal}}} = 10,48$$

Respecto al factor de calentamiento se procede al cálculo del flujo de calor máximo requerido que se suministrara en la máquina:

$$\dot{Q}_{cal} = FC \cdot \dot{Q}_{iso} = 3,946 \text{ [KW]}$$

6.7 MODELAMIENTO FASE DE CALENTAMIENTO EMPLEANDO SIMULINK

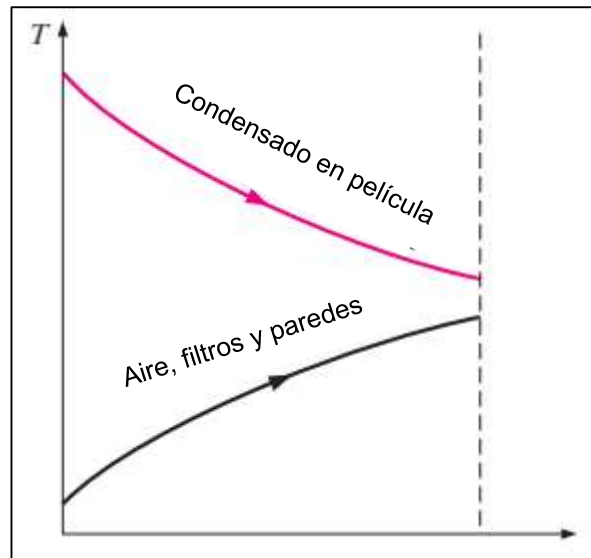
Los resultados del modelo matemático empleado para los cálculos de requerimientos de vapor, se corroboran analíticamente simulando las ecuaciones diferenciales 8, 9 y 10, que rigen el proceso de calentamiento, en el software *SIMULINK* donde se evidencia el comportamiento de las temperaturas considerando un estado transitorio. (ver figura 15 y 16)

Para la elaboración del modelo se tiene presente los datos de Q_{cal} , coeficientes de transferencia y capacidades calóricas. Parámetros responsables de la elevación de las temperaturas del sistema.

La transferencia de calor del vapor con el aire presenta la siguiente condición: el vapor entrega calor al aire, a los filtros y a las paredes del equipo en dos fases: condensándose a 157 °C y simultáneamente por enfriamiento del líquido en la película. (ver figura 14).

El proceso de calentamiento termina cuando el crudo alcance los 91 [°C], y se da comienzo al proceso de limpieza. Sin embargo, se debe tener presente que cuando el aire interior alcance la temperatura de saturación del vapor de 157 °C en el interior de la cámara de calentamiento solo queda vapor. Por esta razón en el modelo de simulink se implementa este valor como límite para la temperatura del aire. (ver figura 14).

Figura 14: Perfiles de temperaturas en un intercambiador



Fuente: Transferencia de calor de Yunus Cengel Capítulo 11

Figura 15. Modelo en simulink del calentamiento

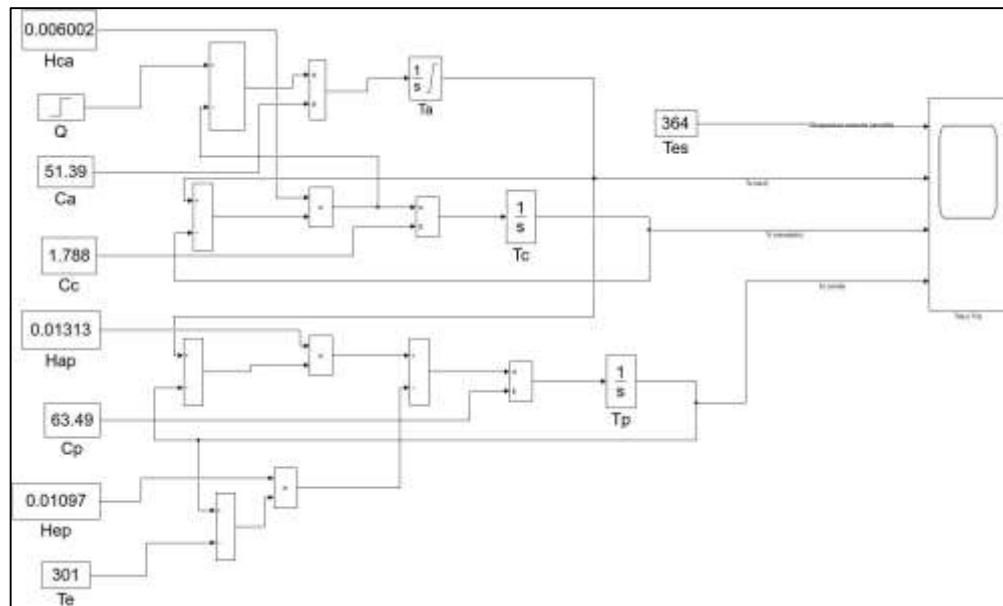


Figura 16. Comportamiento temperatura en el calentamiento



6.8 PLANTEAMIENTO Y CALCULOS FASE DE LIMPIEZA

Se plantea utilizar la misma tubería empleada en la fase de calentamiento para llevar a cabo la fase de limpieza, teniendo presente que las condiciones de flujo másico y presión cambiaran.

Los cálculos están basados en determinar el flujo de vapor necesario para desprender la capa adherida al filtro después del calentamiento. Simultáneamente el filtro se hará girar utilizando el principio de turbinas de acción y así completar la limpieza total del filtro.

Para empezar con el planteamiento la fase de limpieza se divide en dos componentes:

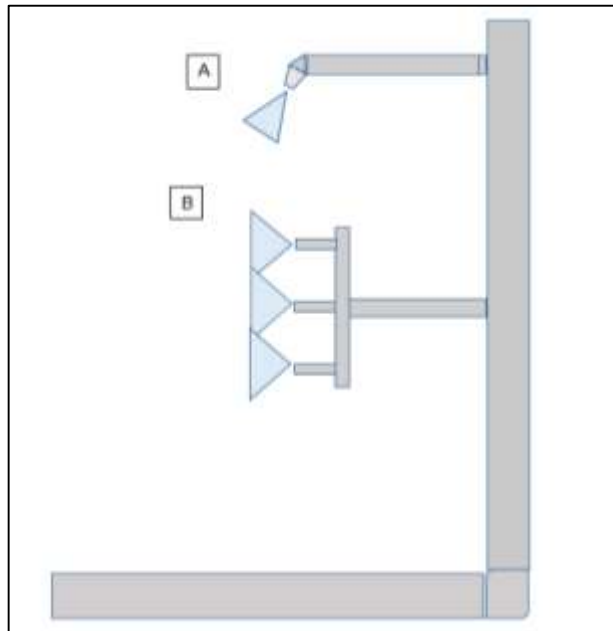
- Requerimientos de vapor para la limpieza del filtro en el perfil.
- Requerimiento de vapor para la inyección aplicada al rodete.

6.8.1 Requerimientos de vapor para la limpieza del filtro en el perfil.

En esta sección se describe la metodología empleada en la determinación de los diámetros de tubería y la cantidad de vapor requerida para llevar a cabo esta operación. Por consiguientes se proyecta la configuración de tuberías que realizaran la limpieza en un perfil del filtro (ver figura 17).

En efecto, el vapor es suministrado desde la caldera por una tubería central de mayor diámetro, adicionalmente de esta línea principal se desprenden dos ramales: primer ramal que efectuará la limpieza en la base del filtro (tipo A), segundo ramal que realizará la limpieza en todo el perfil del filtro (tipo B).

Figura 17. Tubería principal, secundarias y terciarias



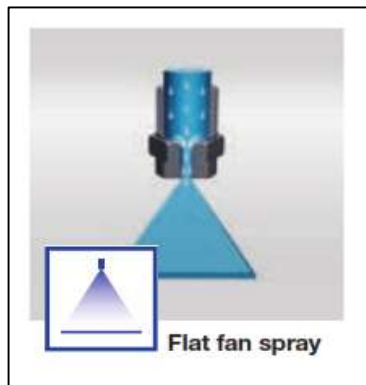
Por otro lado, definido el esquema de las tuberías los cálculos parten con el principal objetivo de este proyecto que es limpiar el filtro.

Específicamente la extensión del perfil a limpiar se refiere a la altura mayor que presenta el filtro, 18 [in]. considerando que el filtro estará girando, las toberas impactan una línea para de este modo garantizar la limpieza en sus 360°. Por consiguiente, se consultó en el catálogo de Lechler²⁰ (ver anexo D) toberas que operen con vapor y su proyección de chorro forme una línea (ver figura 18).

Con respecto al bosquejo de la tubería (figura 17) se instala tres boquillas de chorro plano en la tubería tipo B y una boquilla el tipo A, teniendo en cuenta el espaciamiento de las toberas para que solapen los chorros y cubran por completo la altura del filtro.

Para obtener la cobertura de la superficie, el fabricante de las toberas recomienda alinear los accesorios de modo que las aperturas de pulverización se solapen entre 1/3 y 1/4. En relación a lo anterior las toberas deben estar paralelas al filtro (ver figura 19).

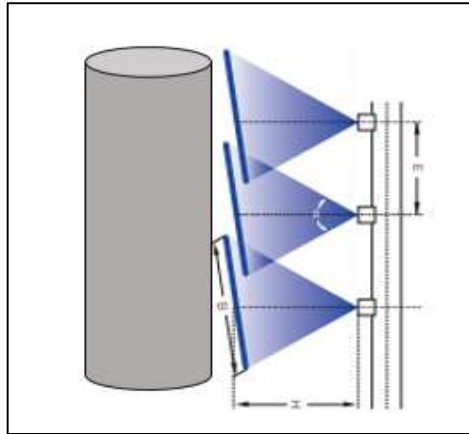
Figura 18. Patrón de chorro de tobera



Fuente: Lechler catalogue 112

²⁰ LECHLER GMBH. *Precision Spray Nozzles and Accessories*. Edición 112, 2017. 185p.

Figura 19. Configuración de las toberas



Fuente: Lechler catalogue 112

Para asegurar el solapamiento el procedimiento se basa en calcular la distancia de separación (E), para que la pulverización se solape sobre 1/3.

Partiendo de los siguientes datos:

X: distancia entre la tobera y el filtro = 120 [mm]

Θ : Angulo de pulverización de la tobera. = 70°

B: Longitud de pulverización.

$B=2 \cdot x \cdot \tan(\Theta/2) = 168$ [mm]

El valor de B se multiplica por el número de toberas empleadas en la línea, para así saber que distancia abarcan sin solaparse.

$L=3 \cdot B=504$ [mm]

Realizando la semejanza con la altura del filtro de 431,8 [mm], nos indica que va a cubrir toda su área, para una mejor configuración y seguridad de la limpieza, se considera el solapado.

$S=(3B/2-H_{\text{filtro}}/2) = 36,1$ [mm]

Donde:

H_{filtro}: altura del filtro = 431,8 mm

S= longitud de solapamiento entre chorros

Finalmente se determina la separación entre toberas (E) para la instalación en el tramo B para cumplir con la limpieza de todo el filtro:

$$E=(B-S) =131,9 \text{ [mm]}$$

Se selecciona una tobera tipo 679.495 de acero inoxidable, presión de trabajo de 5 [bar] y flujo másico requerido de 48,50 [kg/h] con un diámetro de conexión de 14,8 [mm]. Salida de chorro plano para vapor saturado, diámetro de salida de vapor de 4,3 [mm] con un ángulo de pulverización de 70°, chorro potente, montaje fácilmente intercambiable, sencilla orientación del chorro²¹.

Con referencia al diámetro de salida de la tobera, se determina la velocidad de salida del vapor que impactará la superficie, la fuerza que producirá la velocidad de salida se compara con la fuerza de oposición que ejerce la viscosidad del crudo a ser retirado.

Pariendo de:

$$\rho=2,666 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

$\dot{m} = 0,01347 \text{ [Kg/s]}$, cantidad de vapor requerido por la tobera

D =0,0043 [m], diámetro de salida de la tobera

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = 0,005052 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

²¹ Ibíd. p.6.7.

$$\text{Area} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 = 0,00001452 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\dot{V} = \text{Area} \cdot \text{Vel}_{\text{out}}$$

$$\text{Vel}_{\text{out}} = 347,9 \text{ [m/s]}$$

$$\text{Vel}_{\text{out}} \cdot \text{Area} = V_{\text{imp}} \cdot A_{\phi}$$

Donde:

$$A_{\phi} = 0,01 \cdot 0,01 = 0,0001 \text{ [m}^2\text{]} \text{ \u00e1rea de agujero de la malla}$$

$$F_{\text{imp}} = \dot{m} \cdot V_{\text{imp}} = 0,6804 \text{ [N]}$$

Paso siguiente de determinar la fuerza de impacto producida por el chorro, se procede a determinar la fuerza de oposici\u00f3n a ser removido por parte del crudo en dos segundos de contacto directo con el vapor, implementando un an\u00e1lisis de flujo laminar para el crudo considerando el di\u00e1metro hidr\u00e1ulico en el \u00e1rea del mallado mediante las siguientes relaciones.

$$D_H = 4 \cdot \frac{A_{\phi}}{\text{perimetro}}$$

$$\dot{V} = \text{Vel} \cdot A_{\phi}$$

$$\dot{V} = \frac{\text{Vol}}{\delta t}$$

$$\dot{V} = A_{\phi} \cdot \frac{L}{\delta t}$$

$$hf = f \cdot \frac{L}{D_H} \cdot \frac{\text{Vel}^2}{2 \cdot g}$$

$$\frac{\delta P}{\gamma_{\text{crudo}}} = hf$$

Donde se obtiene:

$$D_H = 0,01 \text{ [m]}$$

$$hf = 0,01542 \text{ [m]}$$

$$\text{Vel} = 0,0015 \text{ [m/s]}$$

$$\gamma = 26,15 \text{ [N/m}^3\text{]}$$

$$\delta P = 0,4023 \text{ [Pa]}$$

La fuerza de oposición al movimiento por parte del crudo es:

$$F_{\text{requerida}} = \delta P \cdot A_{\phi} = 0,00004032 \text{ [N]}$$

Realizando la interpretación de los valores de la fuerza requerida y la fuerza de impacto, se concluye que, la velocidad de salida en la tobera desprenderá satisfactoriamente la capa de crudo restante después de la fase calentamiento.

Por otra parte, se procede en determinar el diámetro de la tubería donde se ensamblan las toberas del tramo B.

Donde:

Velrecomendada=30 [m/s]

$$\dot{m}_{3tobera} = \dot{m} \cdot 3 = 0,04041 \text{ [Kg/s]}$$

$$\dot{V}_{3tobera} = \frac{\dot{m}_{3tobera}}{\rho} = 0,01516 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

$$\dot{V}_{3tobera} = \text{Area}_{\text{tramoB}} \cdot \text{Vel}_{\text{recomendada}}$$

$$\text{Area}_{\text{tramoB}} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{tramoB}}^2$$

Se obtiene un diámetro de 25,36 [mm], paso siguiente se estandariza el valor del diámetro en tubería comercial para facilitar la construcción (ver anexo G)

Basado en la metodología anterior para el tramo de tubería de la sección B, se determina de la misma manera el diámetro para la sección A. obteniendo como resultado un diámetro de 14,64 [mm], de igual manera se estandariza a tubería comercial (ver tabla 7).

Tabla 7. Diámetros estandarizados

Sección	Diámetro estándar
A	1/2 [in]
B	1 [in]

6.8.2 Requerimiento de vapor para hacer girar el filtro.

Para comenzar esta sección se selecciona el principio de movimiento empleado por las turbinas de vapor, como el mecanismo adecuado para conseguir el objetivo de hacer girar el conjunto filtro-crudo y completar su limpieza. De igual manera seguir aprovechando el vapor como única fuente de energía en toda la operación de la máquina.

Por ellos se hace necesario determinar los momentos de inercia de los sólidos que se opondrán al movimiento (ver figuras 33 y 34).

Los valores para la masa de los objetos son proporcionados por el diseño de *Solidworks*.

$$M_T = M_{\text{filtro}} + M_{\text{CRUDO}} = 5,47 \text{ [Kg]}$$

Donde:

M_{filtro}: Masa del filtro sin crudo = 4,45 [Kg]

M_{crudo}: Masa de la capa de crudo = 1,02 [Kg]

M_T: Masa conjunto filtro-crudo

Se determina el momento de inercia para el conjunto,

Dónde:

$$R_{EX} = 0,1389 \text{ [m]}$$

$$R_{IN} = 0,0889 \text{ [m]}$$

$$I_{CONJUNTO} = 1 / 2 \cdot M_T \cdot [R_{EX}^2 - R_{IN}^2] = 0,03115 \text{ [Kg} \cdot \text{m}^2]$$

Inercia para la rueda (ver figura 35), donde:

$$M_{Rueda} = 5,16 \text{ [Kg]}$$

$$R_{Rueda} = 0,06 \text{ [m]}$$

$$I_{RUEDA} = 1 / 2 \cdot M_{RUEDA} \cdot R_{RUEDA}^2 = 0,009288 \text{ [Kg} \cdot \text{m}^2]$$

Por último, se realiza la sumatoria de las inercias, con el fin de obtener un total para los cálculos posteriores

$$I_T = I_{CONJUNTO} + I_{RUEDA} = 0,04044 \text{ [Kg} \cdot \text{m}^2]$$

Terminado el proceso de determinar la inercia del sistema, se procede en el cálculo del torque requerido para el movimiento. La velocidad de giro del sistema se selecciona a criterio de los autores con el fin de llevar a cabo una limpieza más efectiva, considerando 2 vueltas del sistema en un minuto. Los cálculos empleados, se describen en la siguiente tabla.

Tabla 8. Planteamiento ecuaciones del sistema de giro

Calculo	Ecuación	Resultado
Revoluciones por minuto	2	2 [RPM]
Velocidad angular	$\Omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{\text{RPM}}{60}$	0,2094 [rad/s]
Momento angular	$L = I_T \cdot \Omega$	0,00847 [Kg/s]
Tiempo de espera para lograr Velocidad cte.	$t = \frac{\pi}{2 \cdot \Omega}$	7,5 [s]
Aceleración angular	$\alpha = \frac{\Omega}{t}$	0,02793 [rad/s ²]
Torque del sistema	$\text{Torque} = I_T \cdot \alpha$	0,001129 [N*m]
Potencia	$\text{POTENCIA} = \text{Torque} \cdot \Omega$	0,000237 [Watt]

Definidos los datos anteriores, se procede al análisis de la rueda Pelton, descrita por CENGEL como “el fluido se envía por una tobera aceleradora de modo que la mayor parte de su energía mecánica se convierte en energética cinética. El chorro a alta velocidad choca con los alabes en forma de cubeta llamados cucharas o cangilones o paletas que transfieren la energía a el eje de la turbina”²².

Se propone encontrar el flujo másico de vapor para una rueda, partiendo del torque hallado por la inercia de los sólidos.

Consideraciones previas:

²² ÇENGEL, Yunus A; CIMBALA, Jhon M. MECANICA DE FLUIDOS FUNDAMENTOS Y APLICACIONES: Turbomaquinaria. McGraw-Hill. p. 783. ISBN 970-10-5612-4

$\rho_{\text{vapor}} = 1,128 \text{ [Kg/m}^3\text{]} \text{ a } 2 \text{ [bar]}$

$R_{\text{pelton}} = 0,09351 \text{ [m]}$ obtenido del diseño en Solidworks contando los alabes

$\beta_2 = 160^\circ$ obtenido del libro de mecánica de fluidos ÇENGEL

$$V_{\text{tan}} = \Omega \cdot R_{\text{PELTON}} = 0,01958 \text{ [m/s]}$$

$$U = V_{\text{tan}}$$

$$U = \frac{V_1}{2}$$

Con las anteriores consideraciones, reemplaza en la ecuación del torque, para determinar el flujo volumétrico de vapor.

$$\text{Torque} = \rho_{\text{VAPOR}} \cdot \dot{V}_{\text{VAPOR}} \cdot R_{\text{PELTON}} \cdot [V_1 - U] \cdot [1 - \cos(\text{BETHA}_2)]$$

$$\dot{V}_{\text{VAPOR}} = 0,03296 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

Obtenido el flujo volumétrico y la densidad del vapor se puede determinar el flujo másico de vapor requerido para hacer girar la rueda 2 [RPM] y vencer el torque.

$$\dot{M}_{\text{VAPOR}} = \dot{V}_{\text{VAPOR}} \cdot \rho_{\text{VAPOR}} = 0,03719 \text{ [Kg/s]}$$

El valor anterior se multiplica por las cinco ruedas que se debe suministrar vapor, y así comparar con la capacidad de producción de la caldera, para determinar si está en el rango de operación, y proceder con los demás cálculos.

$$\dot{M}_{5\text{FILTRO}} = 5 \cdot \dot{M}_{\text{VAPOR}} = 0,1859 \text{ [Kg/s]}$$

$$\dot{M}_{\text{CALDERA}} = 0,5656 \text{ [Kg/s]}$$

De acuerdo con el flujo másico para un solo filtro, el vapor es suministrado por medio de una tubería la cual presenta una tobera que realiza la inyección en la rueda. El paso de vapor por la tobera presenta una serie de cálculos y consideraciones que se expresan a continuación.

El análisis termodinámico en la tobera presenta tres estados para el vapor (ver figura 20). Se considera una eficiencia de la tobera de 0,9.

Estado 1. Consideraciones

$$P_1 = 600 \text{ [KPa]}$$

$$x_1 = 1$$

$$h_1 = h \left[\text{'Steam'} ; P = P_1 ; x = x_1 \right] = 2757 \text{ [KJ/Kg]}$$

Estado 2. Consideraciones

$$P_2 = 0,577 \cdot P_1 = 346,2 \text{ [KPa]}$$

$$x_2 = 0,97$$

$$h_2 = h \left[\text{'Steam'} ; P = P_2 ; x = 0,97 \right] = 2667 \text{ [KJ/Kg]}$$

$$v_2 = v \left[\text{'Steam'} ; P = P_2 ; x = x_2 \right] = 0,5141 \text{ [m}^3\text{/Kg]}$$

$$vel_2 = \sqrt{2 \cdot [h_1 - h_2] \cdot 1000} = 422,6 \text{ [m/s]}$$

Estado 3 teórico. Consideraciones

$$P_3 = 200 \text{ [KPa]}$$

$$x_3 = 0,93$$

$$h_3 = h \left[\text{'Steam'} ; P = P_3 ; x = x_3 \right] = 2552 \text{ [KJ/Kg]}$$

Estado 3' real. Consideraciones

$$P'_3 = P_3 = 200 \text{ [KPa]}$$

$$efi = \frac{h_1 - h'_3}{h_1 - h_3}$$

$$h'_3 = h'_{f3} + x'_3 \cdot h'_{fg3} = 2583 \text{ [KJ/Kg]}$$

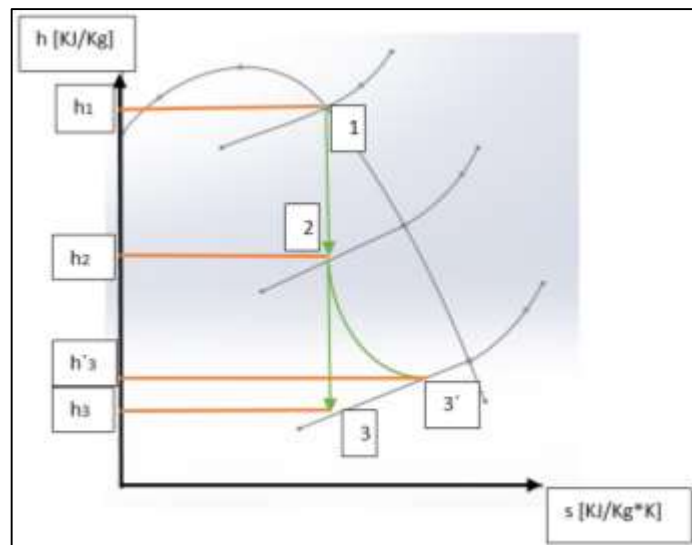
$$h'_{f3} = 504,71$$

$$h'_{fg3} = 2201,6$$

$$v'_3 = v \left[\text{'Steam'} ; P = P'_3 ; x = x'_3 \right] = 0,8369 \text{ [m}^3\text{/Kg]}$$

$$vel'_3 = \sqrt{2 \cdot [h_1 - h'_3] \cdot 1000} = 589,3 \text{ [m/s]}$$

Figura 20. Diagrama entalpia vs entropía



Los datos para las calidades del estado 2 y 3 son extraídos del diagrama de Mollier (ver anexo E).

Con respecto a los anteriores datos, se procede en determinar el diámetro de salida de la tobera.

$$\dot{M}_{\text{VAPOR}} = \frac{A_3 \cdot \text{vel}'_3}{v'_3}$$

$$A_3 = \frac{\pi}{4} \cdot D_3^2$$

Se obtiene:

$D_3 = 8,2$ [mm], realizando una estandarización en tubería comercial, se selecciona un diámetro $\frac{1}{4}$ [in] para salida de la tobera.

Determinación del diámetro en la entrada de la tobera:

$$\dot{V}_{\text{VAPOR}} = A_1 \cdot \text{VEL}_{\text{RECOMENDADA}}$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4} \cdot D_1^2$$

$$\text{VEL}_{\text{RECOMENDADA}} = 25$$

Diámetro en la entrada de la tobera de 40,9 [mm], aplicación de estandarización comercial se selecciona un diámetro de 1,5 [in]

El diámetro de la tubería principal que repartirá vapor a los cinco inyectores se determina a continuación:

$$\dot{V}_{5VAPOR} = A_{PRIN} \cdot VEL_{RECOMENDADA;1}$$

$$A_{PRIN} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{PRIN}^2$$

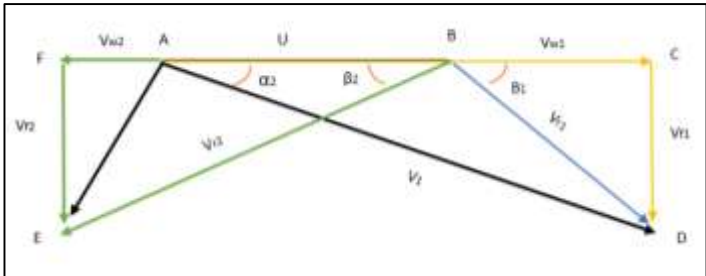
$$VEL_{RECOMENDADA;1} = 30$$

De lo anterior arroja un diámetro de 83,64 [mm], se procede en estandarizar a tubería comercia con un valor de 3,5 [in]

Como complemento del método, todos los cálculos de la tobera se compararán con el torque requerido por el conjunto filtro-crudo y verificar si la configuración cumple con el objetivo de hacer girar el sistema utilizando vapor como fuente de energía.

Con respecto a la velocidad de salida de la tobera de 589,3 [m/s], se realiza un diagrama de velocidades (ver figura 21) para las paletas de la rueda con el propósito de encontrar el torque que la velocidad absoluta produce a la rueda. Se implementa el análisis del diagrama de velocidades considerando un ángulo de inyección de la tobera de 20° y la eficiencia de las paletas del 90%.

Figura 21. Diagrama de velocidades



Se plantea la siguiente metodología para llegar al valor del torque.

$$\dot{V}_{w1} = \text{vel}'_3 \cdot \cos [\alpha_1]$$

$$\dot{V}_{f1} = \text{vel}'_3 \cdot \sin [\alpha_1]$$

$$BC = V_{w1} - U$$

$$\tan [\beta_1] = \frac{V_{f1}}{V_{w1}}$$

$$V_{r1} = \sqrt{BC^2 + V_{f1}^2}$$

$$\beta_2 = \beta_1$$

$$R = \frac{V_{r2}}{V_{r1}}$$

$$\cos [\beta_2] = \frac{U + V_{w2}}{V_{r2}}$$

$$\sin [\beta_2] = \frac{V_{f2}}{V_{r2}}$$

$$\text{Velo}_2 = \sqrt{V_{f2}^2 + V_{w2}^2}$$

$$\dot{F}_{\text{Tangencial}} = \dot{M}_{\text{VAPOR}} \cdot [V_{w1} + V_{w2}]$$

$$\text{TORQUE}_2 = F_{\text{Tangencial}} \cdot R_{\text{PELTON}}$$

Donde:

$$\alpha_1 = 20^\circ$$

$$V_{el3} = 589,3 \text{ [m/s]}$$

$$U = 0,01958 \text{ [m/s]}$$

$$R = 0,9$$

Se realiza el procedimiento planteado y se obtiene un torque de: $TORQUE_2 = 3,658$ [N*m] y se compara con el torque calculado con la inercia del sistema $Torque = 0,001129$ [N*m].

De lo anterior se concluye, la configuración seleccionada cumple teóricamente con el objetivo de hacer girar el sistema implementando vapor.

7. DISEÑO MECANICO Y CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO

A continuación, se explicará la metodología empleada en el diseño de la maquina en CAD, teniendo presente resolver la problemática de la limpieza de los filtros y además cumplir con los requerimientos propuestos por el cliente.

Para comenzar con el desarrollo se plantearon tres subgrupos, de modo que abarcarán todos los componentes implementados para el equipo, los cuales se describirán en detalle:

- Diseño de la estructura.
- Diseño de agarre del filtro y sistema de giro.
- Diseño de las tuberías de limpieza y propulsión.

Todos los componentes estructurales y tuberías se implementó la estandarización con respecto a medidas comerciales, para facilitar el proceso de adquisición de los materiales, así mismo disminuir reprocesos de manufactura para evitar sobrecostos en la posterior fabricación.

7.1 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

Como punto de partida para esta sección se plantearon las siguientes características que debe satisfacer el diseño de este componente y su respectiva solución tomada a criterio de los autores (ver tabla 9).

Tabla 9. Problemas a resolver con el diseño de la estructura

Capacidad de filtros	Contemplando la forma cilíndrica del filtro, se plantea una configuración en la ubicación dentro de la máquina de manera circular, donde cada filtro esta distanciado del otro 72 grados y así abarcar los 360 grados en 5 filtros
Material de la estructura	Como requerimiento de los cálculos el material de la estructura deberá soportar temperatura por encima de los 91 [°C]. se plantea utilizar acero inoxidable en todos sus componentes.
Recolección de residuos provenientes de la limpieza	En el proceso de limpieza de los filtros, se requiere recolectar los residuos desprendidos del mismo. Se opta por hacer pasar los residuos por medio de una malla y posteriormente con la implementación de un embudo se dirija los fluidos a un recipiente.

El punto de partida del diseño de la estructura es la base, debido que se requiere un diámetro grande para lograr la instalación de los filtros de manera circular (ver imágenes 22 y 23).

Figura 22. Vista isométrica base de la maquina

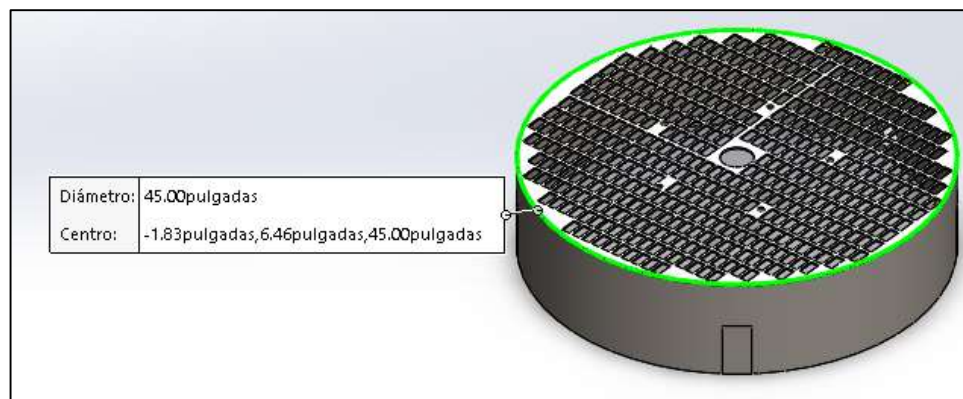


Figura 23. Vista Inferior de la base



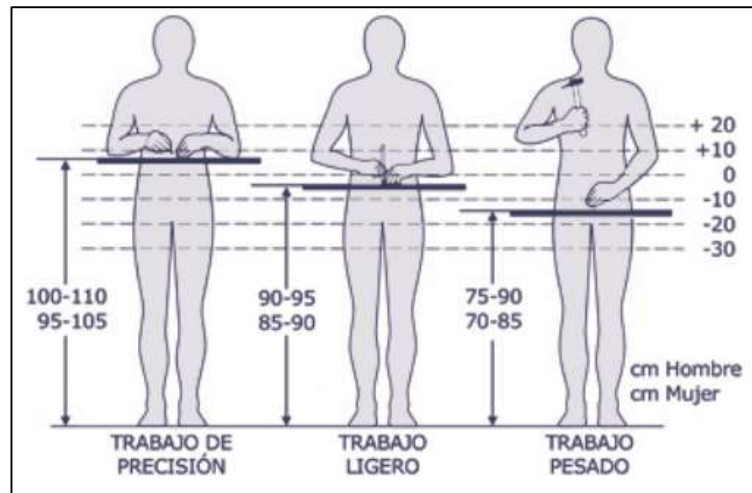
Por otro lado, se procede al diseño y ensamble de las patas de soporte para la base, la cual permitirá una altura de trabajo adecuada para el operario.

Por consiguiente la altura de la maquina se basó en el documento (ERGOMETAL. Manual de ergonomía para maquinas del sector metal). Donde se especifican recomendaciones de alturas de trabajo y expresa que “A la hora de definir la altura óptima para trabajar se tiene que tener en cuenta que esta depende del tipo de tarea que se realice. Cuanto más baja es la altura del plano de trabajo, más debe inclinarse la espalda al trabajar y la tarea resulta más penosa”²³.

La manera de relacionar la ergonomía para el operario se determinó por medio del montaje de los filtros en la máquina, donde se catalogó como trabajo de precisión.

²³ OLTRA PASTOR, Alfonso; PAGÁN CASTAÑO, Pablo y SENDRA PEREZ, Rafael. ERGOMETAL. Manual de ergonomía para maquinas del sector metal. Valencia: La grafica ISG. p. 33-34. ISBN 978-8495448-17-0

Figura 24. Alturas recomendadas para trabajar de pie



Fuente: <https://www.uniondemutuas.es/wp-content/uploads/2016/08/Manual-ergometal.pdf>

Seguidamente el diseño de las patas soporte, se implementó una especie de zapata para permitir la adecuación a terrenos abiertos.

Figura 25. Pata de la maquina

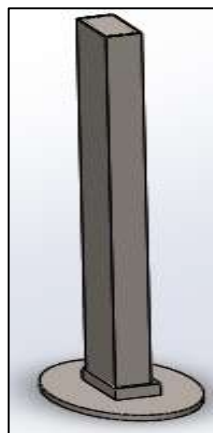
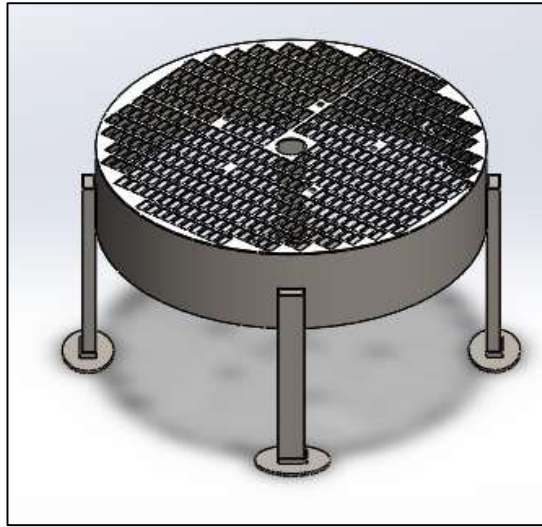


Figura 26. Ensamblaje de las patas



se diseña un componente en forma de embudo, para dirigir los residuos que se esperan remover de la limpieza al recipiente recolector, donde la empresa le dará su disposición final.

Figura 27. Recipiente de recolección y embudo

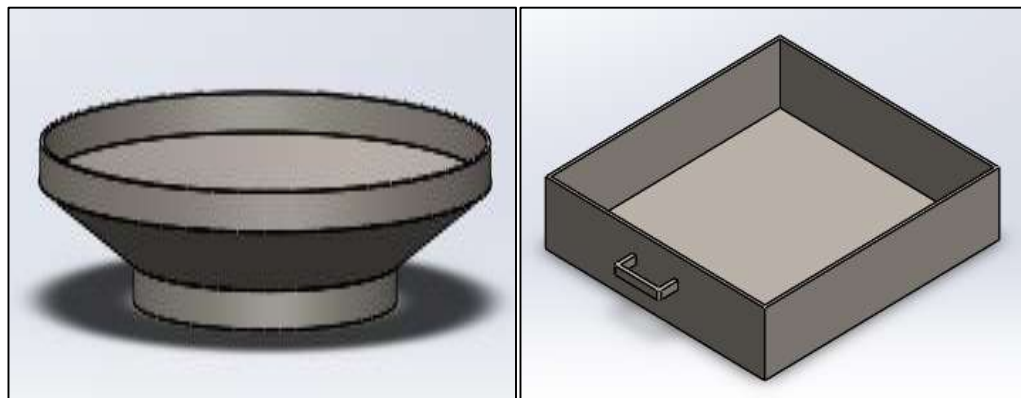
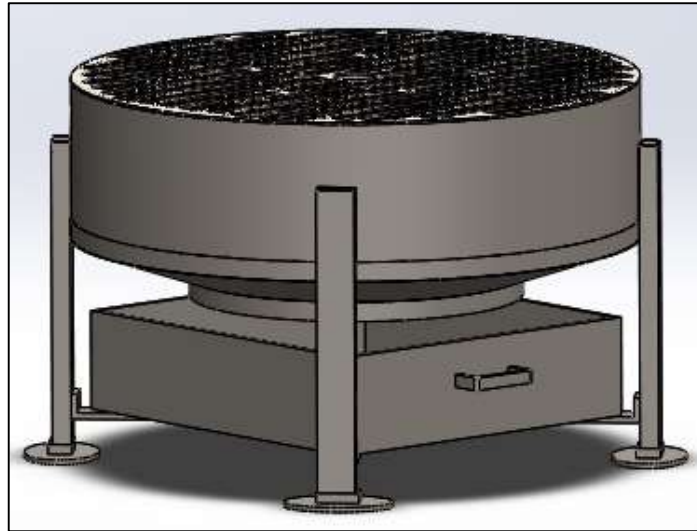


Figura 28. Ensamblaje de la recolección



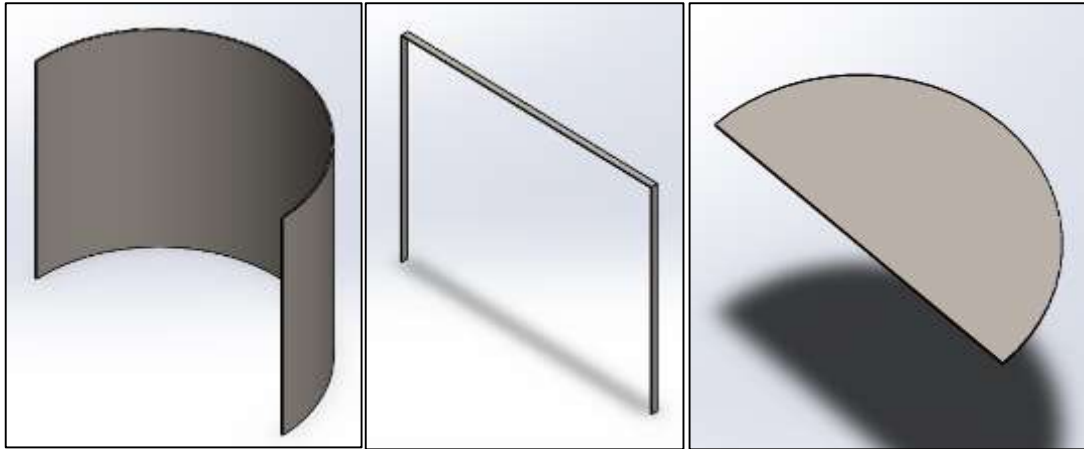
Avanzando en el diseño de la estructura, se procede con el esquema de las puertas y techo de la máquina, estos componentes tienen un papel principal, debido que alojarán toda la zona donde se llevará a cabo la limpieza de los filtros.

Las puertas se diseñaron con forma curva para dar a la máquina una vista de cilindro y así evitar concentradores de calor en las esquinas cuando se trata de una configuración cuadrada. Su montaje se realiza por medio de un marco que es acoplado a la base de la máquina.

Con la ubicación de las puertas se determina la cara frontal que va a tener la máquina. Además, al diseño de las puertas se le ensambla el techo, para dejar toda la estructura completa.

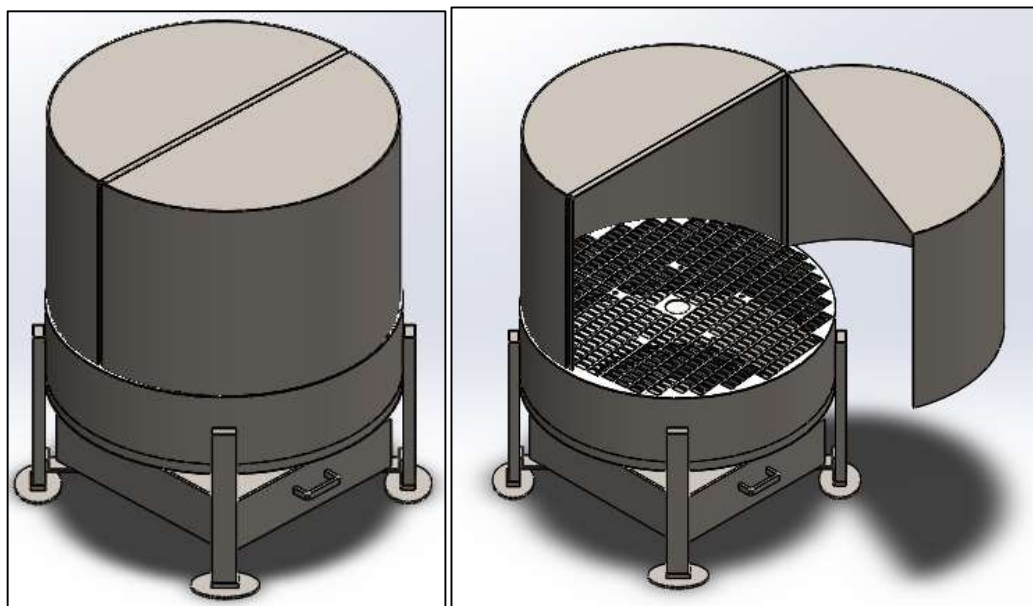
Nota: Todos los componentes pertenecientes al diseño de la estructura son ensamblados por medio de soldadura.

Figura 29. Puerta, Marco y Techo respectivamente



En el ensamble de las puertas se dejó una lateral fija y la otra se pivotea mediante bisagras para permitir el acceso al interior y posterior montaje de los filtros.

Figura 30. Ensamblaje de las puertas y techo



7.2 DISEÑO DE AGARRE DEL FILTRO Y SISTEMA DE GIRO

La sección de diseño del agarre del filtro al igual que la de estructura, presenta unas características (ver tabla 10) que deben ser resueltas y así garantizar el correcto funcionamiento de la máquina.

Tabla 10. Problemas a resolver con el diseño del agarre del filtro

Sujeción del filtro	El diseño del filtro presenta un mallado por la mayoría de su superficie, esta particularidad propone un sistema de mordazas que puedan incrustarse en las ranuras, y así evitar deslizamiento del filtro.
Sentido de ubicación del filtro	La posición optada para instalar el filtro en el interior del equipo se describe de forma vertical, dejando la sección del cilindro truncado abajo. Con el propósito de realizar la limpieza de la base y los residuos caigan por gravedad en la fase de calentamiento
Configuración circular de los filtros dentro del equipo	La ubicación circular se plantea por la creación de un carrusel, donde su punto de apoyo se situara en la tubería central y permita la suspensión de los filtro.

Después del planteamiento de las características a tener en cuenta en esta fase de diseño, se procede con el diseño del sistema de mordazas para la sujeción del filtro. Donde se espera un agarre preciso y que no permita el deslizamiento del mismo

Figura 31. Mordaza para el filtro

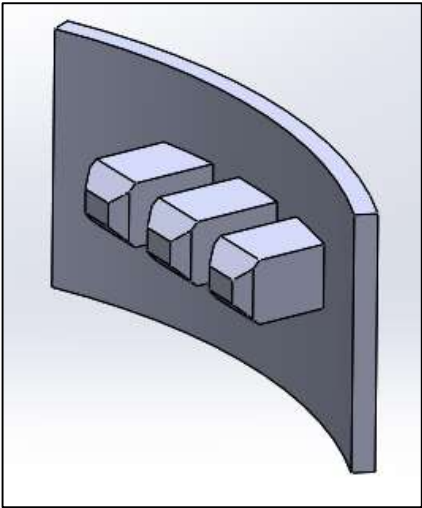
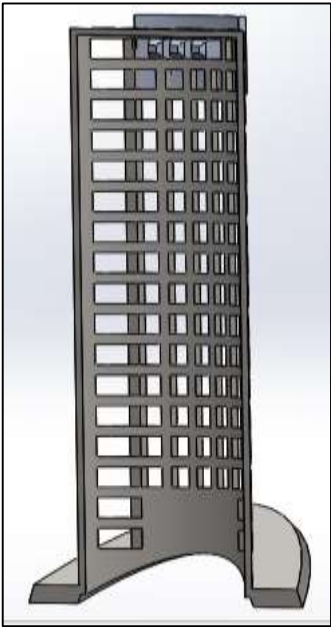


Figura 32. Ubicación de la mordaza en el filtro (vista de sección)



Por otra parte, se procede en realizar todo el conjunto para llevar acabo la sujeción del filtro, agregando las mordazas al diseño. La principal característica de este conjunto radica en la posibilidad de adaptación a diferentes diámetros de filtros.

El conjunto se plantea de manera sencilla para su posterior fabricación, del mismo modo no complicar la labor al operario a la hora del montaje de los filtros en el mecanismo de agarre. Los componentes que conforman este diseño son mencionados a continuación:

- Barra roscada
- Buje con agarre lateral
- Tubería cuadrada con agarre lateral
- Tuerca

Figura 33. Barra roscada, Buje con agarre lateral y Tubería cuadra respectivamente

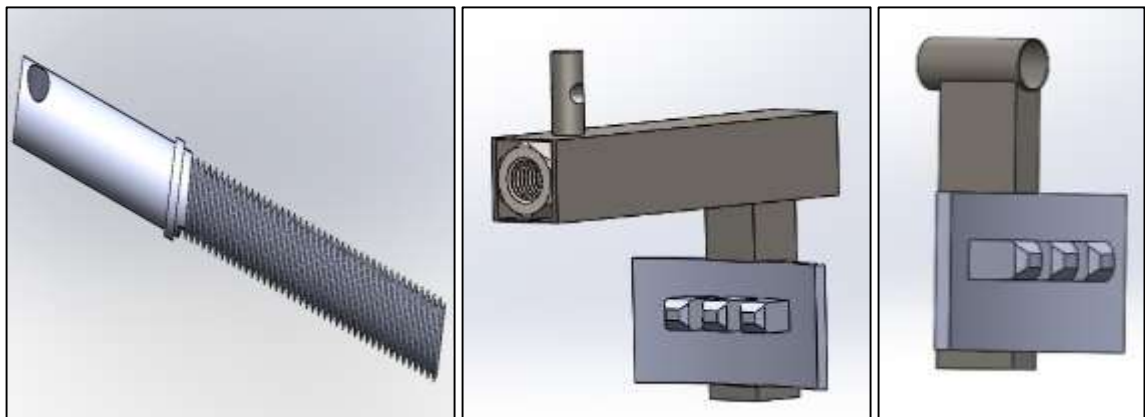
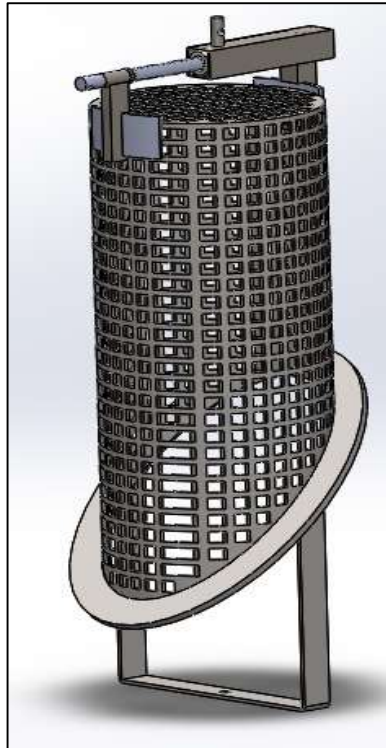


Figura 34. Ensamblaje conjunto de agarre y filtro



En relación con el sistema de fijación, se procede al diseño del carrusel, donde se posicionarán los cinco filtros con un ángulo de separación de 72 grados. A continuación, se presenta toda la estructura para su posterior ubicación de los filtros en el interior de la maquina

Los componentes pertenecientes a este conjunto se describen a continuación:

- Camisa superior de tubería central: elemento ubicado en la tubería central para dar soporte a todo el carrusel, se convierte en el componente crítico del sistema de fijación del filtro.
- Brazo de agarre: Barra cuadrada unida a la camisa, permitiendo el distanciamiento desde la tubería central.

- Barra superior de agarre: Barra redonda unida al brazo de agarre, en la junta presenta un buje de bronce, el cual permitirá la rotación del mismo. Por otro lado, en su extremo inferior se acoplará el conjunto de agarre del filtro.
- Rueda Pelton: Encargada de la rotación del filtro siendo el eje de rotación la barra redonda superior.

Figura 35. Camisa, Barra cuadrada, Barra redonda y Rueda Pelton

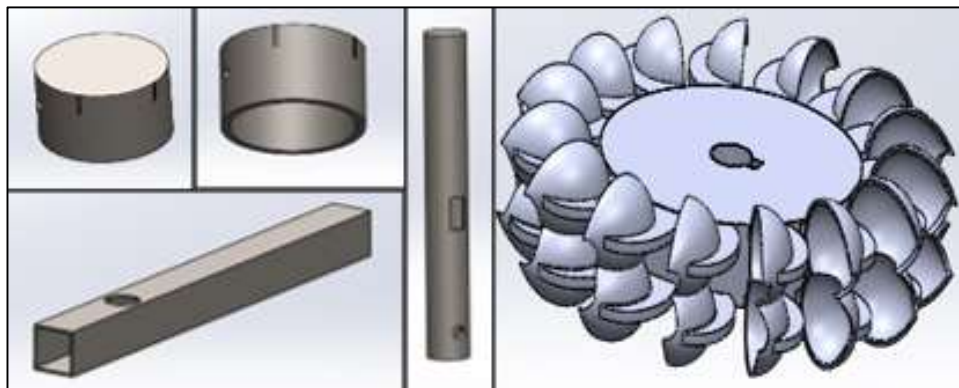


Figura 36. Ensamblaje carrusel

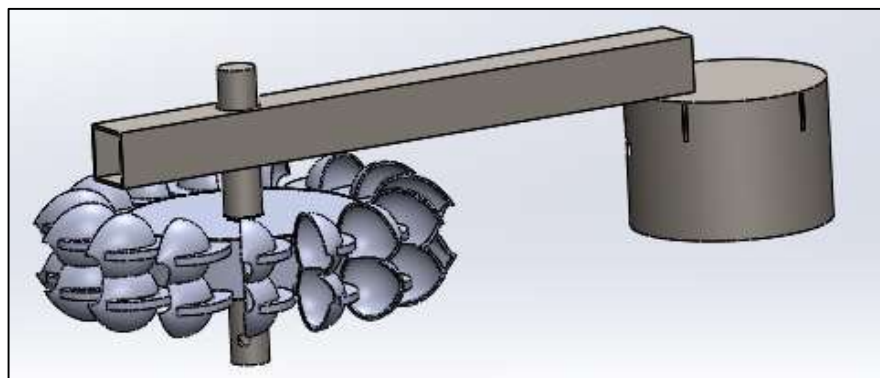


Figura 37. Ensamblaje agarre del filtro y carrusel

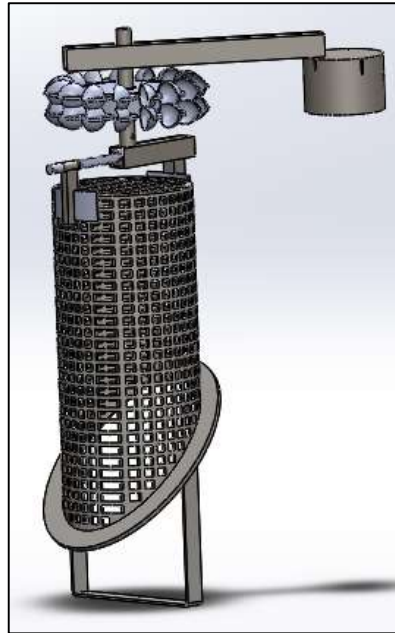


Figura 38. Ensamblaje de los módulos de estructura y agarre de los filtros (vista frontal)

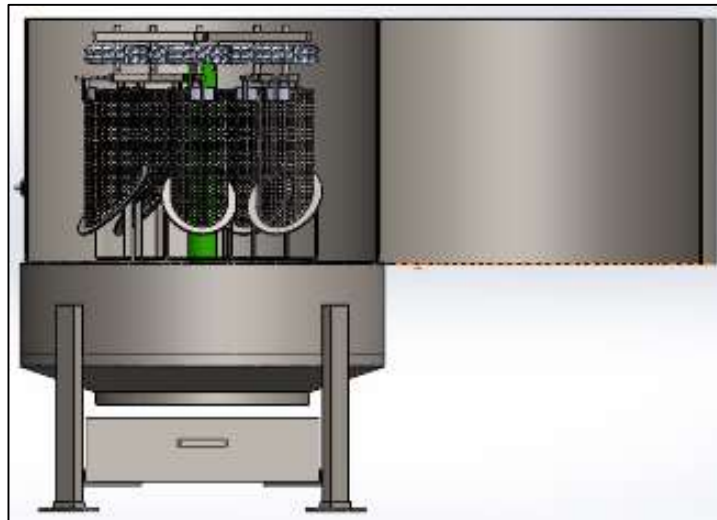
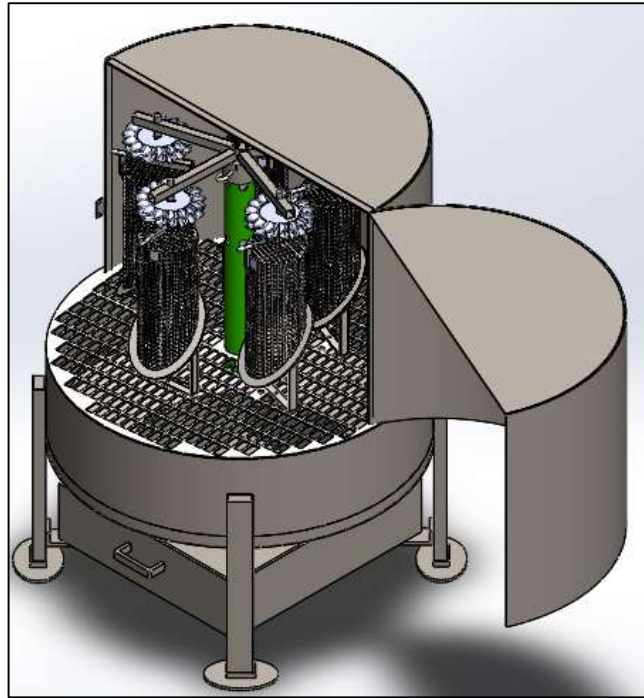


Figura 39. Ensamblaje de los módulos (vista isométrica)



7.3 DISEÑO DE LAS TUBERÍAS DE LIMPIEZA Y PROPULSIÓN

En esta sección de parte del principio mencionado en los cálculos, donde se precisa que la tubería para la fase de calentamiento se empleara también para la fase de limpieza, por consiguiente, se evita el exceso de líneas de vapor en la máquina.

Los requerimientos para este módulo de diseño provienen de los cálculos y se basan en los diámetros requeridos para las secciones de la tubería. Por esta razón no existe una estandarización para diseñar la tubería implementada dentro de un equipo, se procede al diseño con el criterio de utilizar la cantidad de accesorios posibles y tramos de tubería.

Las tuberías a diseñar son las siguientes:

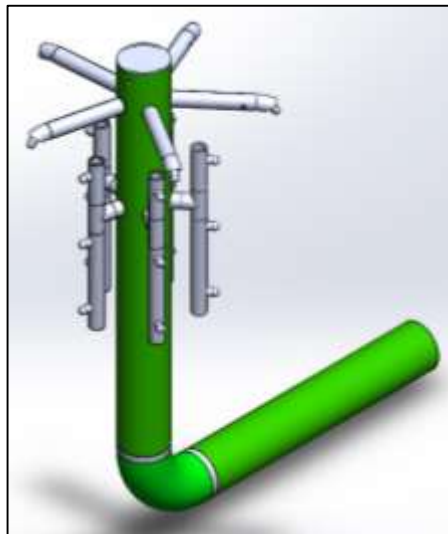
- Tubería central: Cumple con el suministro de vapor para las fases de calentamiento y limpieza del filtro.

- Tubería de propulsión: Consta del suministro de vapor a las ruedas Pelton ubicadas en cada filtro, con el fin de hacer girar los filtros y permitir la limpieza en toda su superficie.

7.3.1 Diseño tubería calentamiento-limpieza.

Se diseña la línea principal del suministro y sus ramales para ser descargados en el perfil del filtro; todos los accesorios implementados en la construcción de la tubería son estandarizados y obtenidos del catálogo técnico del grupo *ALMESA*²⁴ (ver anexo F).

Figura 40. Tubería principal (verde), tubería secundaria tipo A y tubería secundaria tipo B



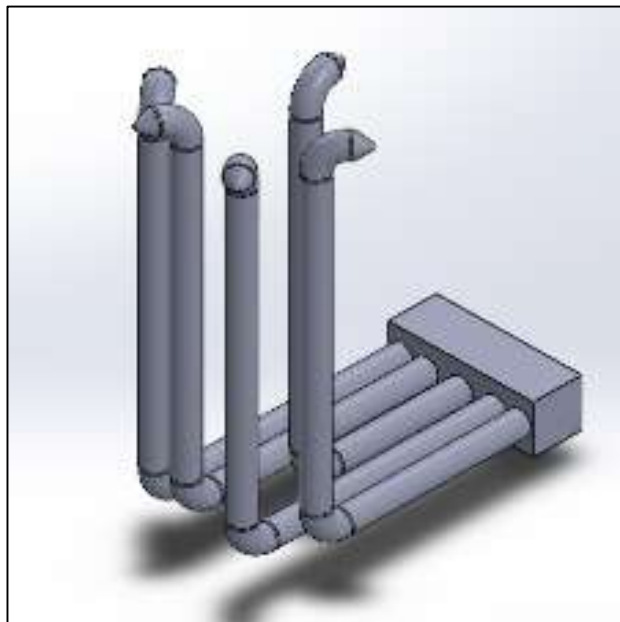
²⁴ GRUPO ALMESA. Catalogo técnico. Barcelona.: TUBOS REUNIDOS, S.A., 2015, 150p.

7.3.2 Diseño tubería de inyección.

La construcción de esta tubería se consideró según los diámetros requeridos para hacer llegar vapor y girar las ruedas Pelton de una manera precisa.

Los accesorios instalados se tomaron igualmente del catálogo técnico del grupo *ALMESA*²⁵

Figura 41. Tubería de inyección para la rueda Pelton



7.4 ENSAMBLAJE FINAL

En esta sección se mostrará el ensamblaje final con los sistemas de estructura, agarre de filtro y tuberías. Reflejando el diseño propuesto por los autores a implementar para la solución de la problemática del lavado de los filtros.

Nota: Los planos para cada uno de los componentes son mostrados en el anexo J.

²⁵ Ibíd.

Figura 42. Ensamblaje maquina (vista isométrica)

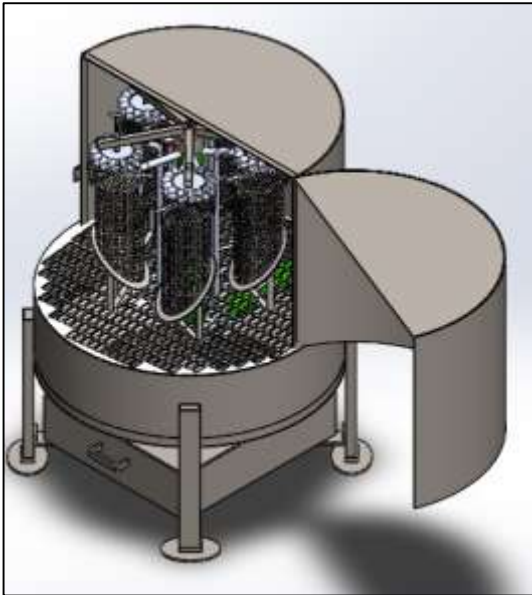


Figura 43. Ensamblaje maquina (vista frontal)

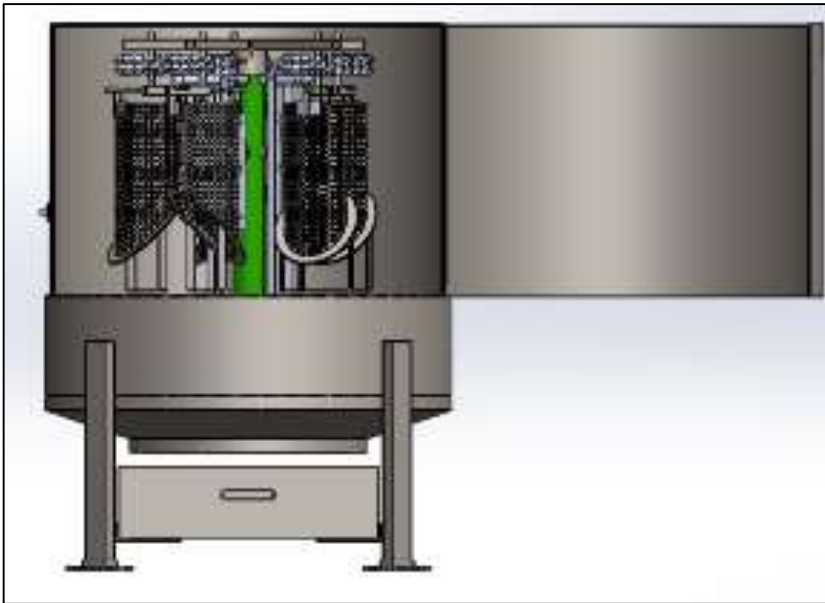
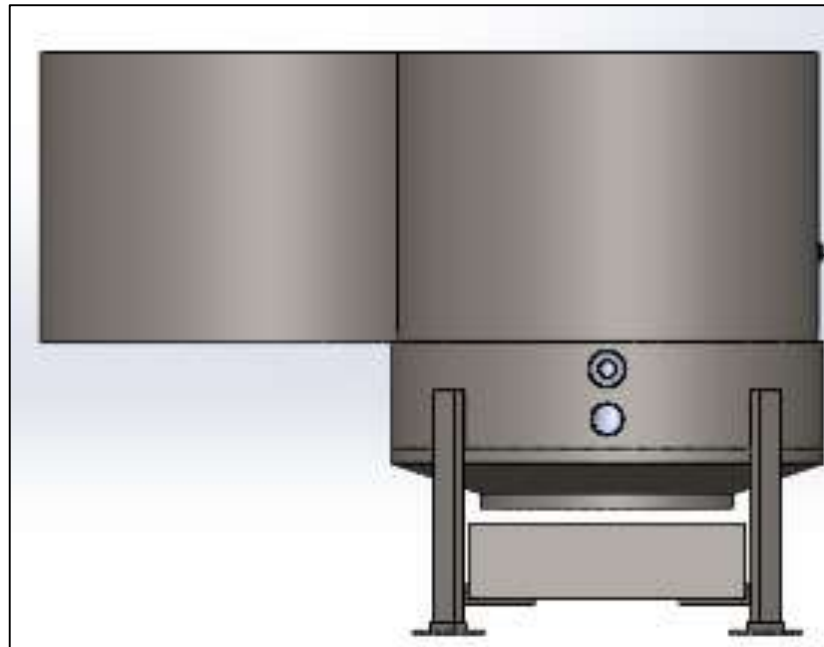


Figura 44: Ensamblaje maquina (vista posterior)



- Accesorios externos

La tubería central e inyección tendrá accesorios externos para regular la presión de sistema de 8 a 2 bar y 8-5 bar respectivamente. La válvula reductora de presión controla la presión de salida, aunque haya oscilaciones en la presión de entrada.

Se selecciona una válvula VALFONTA M2, que trabaja mediante el principio de acción directa. La presión aguas arriba empuja el conjunto eje-pistón-embolo ejerciendo el cierre de la válvula automáticamente. Una vez cerrada, hay que girar en sentido horario el tornillo de regulación. Esto produce el desplazamiento del muelle, que así mismo actúa sobre la membrana y el cierre, abriendo el paso de la válvula hasta que alcanza la presión solicitada.

A continuación, se muestran las especificaciones de la válvula reguladora de presión.

Figura 45. Válvula reductora de presión

Máxima presión de entrada admisible	25 barg
Máxima temperatura admisible	-10 a 80°C (gases y líquidos) Hasta 180°C (vapor)
Tamaños	DN15 a DN100
Material del cuerpo	PN25: Nodular (GGG40.3) PN40: Acero Carbono WCB (GSC25N) Acero inoxidable CF8M (1.4408)
Conexiones	Bridas EN PN16-PN40 Bridas ANSI 150 / 300 Roscas BSP / NPT, consultar
Material interiores	Acero Inoxidable AISI 316L
Material Membrana	EPDM -40°C a 125°C EPDM + PTFE 125°C a 180°C
Material Obturador	NBR, EPDM, PEEK, ... PTFE+GR

Fuente:<http://www.valfonta.com/ca/manuals-productes/manual%20M2-13E-ESP.pdf>

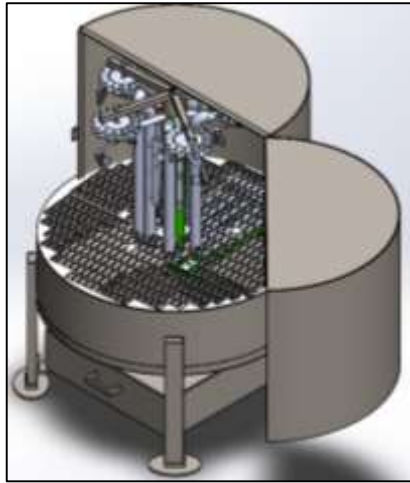
7.5 DESCRIPCION GENERAL DEL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

A continuación, se describe el funcionamiento de la máquina, desde el montaje de los filtros hasta el desmonte por parte del operario, lo que se considera como un ciclo de trabajo del equipo. La descripción se hará paso a paso e ilustrada por medio de imágenes que faciliten la comprensión de la función.

Paso 1. El equipo se encuentra descargado y se procede en la instalación del filtro uno a uno

Paso 2. Se retira el pasador de color rojo, ubicado en la parte superior de la tubería central (ver figura 47), luego se procede a girar de manera manual por parte del operario en sentido horario todo el carrusel

Figura 46. Equipo descargado



Paso 3. Comienza el montaje de los filtros en la siguiente posición después de haber girado el carrusel. El operario ensamblará el filtro y girará el carrusel hasta llegar a la posición donde comenzó.

Figura 47. Ubicación del pasador

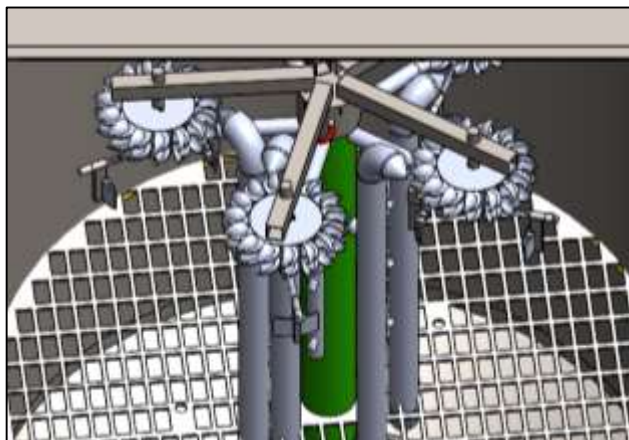
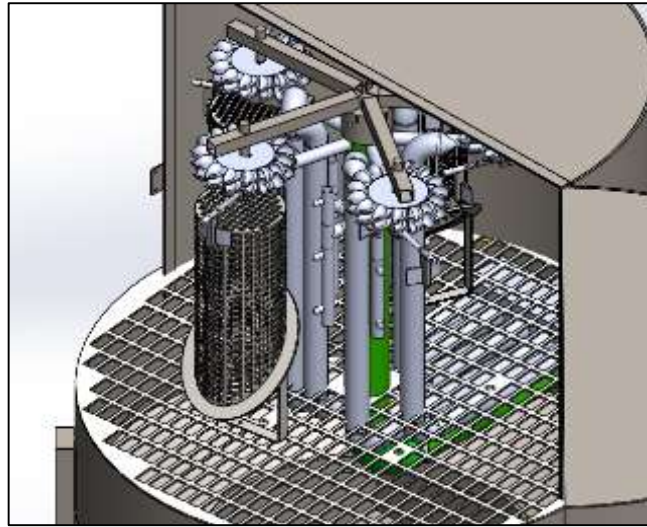


Figura 48. Montaje de los filtros



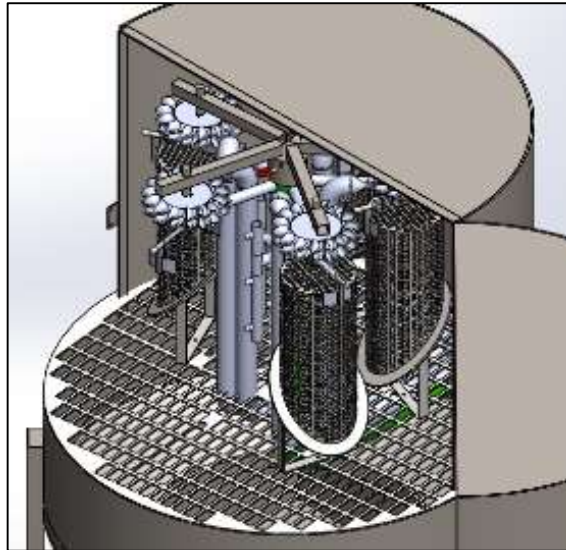
Paso 4. Una vez regresado a la posición donde se comenzó a girar, antes de colocar el ultimo filtro, el operario procede en asegurar de nuevo el carrusel con el pasador.

Paso 5. Se procede a instalar el ultimo filtro y cerrar la maquina

Paso 6. El operario permite el paso de vapor desde la caldera por la tubería central, y simultáneamente ejecuta un contador de tiempo (ver figura 50) con la duración establecida de 30 [min] para la fase de calentamiento. El dispositivo avisara mediante una alarma cuando la fase ha alcanzado el tiempo requerido.

Paso 7. Terminado el tiempo calentamiento, el operario regulará el flujo de vapor por la tubería central y abrirá el paso por la tubería de inyección desde la caldera, seguidamente cuadra el temporizador con el tiempo de 20 [min], requerido para la fase de limpieza.

Figura 49. Fijación del carrusel



Paso 8. Completada la fase de limpieza, el operario procede a cortar el suministro de vapor desde la caldera hacia las tuberías, esperara 5 [min] para poder abrir la máquina y realizar el desmontaje de los filtros. Los cinco minutos de espera se requieren para que el vapor alojado en la cámara se evacue y no ocurra un accidente al momento de abrir el equipo.

Paso 9. El operario procede en retirar el ultimo filtro ensamblado, retira el pasador de la camisa y termina de desmontar los filtros utilizando la metodología en la montada de los mismo. Por último, se asegura de nuevo la camisa y se deja listo para una próxima ejecución de la máquina.

Figura 50. Dispositivo temporizador



Fuente: <http://www.g-suntester.com/sale-8006156-ta118-lcd-digital-kitchen-timer-signalur-min-sec-count-up-down-timer.html>

7.6 CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO

Ahora bien, entramos en materia del prototipo. Para la fabricación del modelo se suministró a la empresa, los planos de cada uno de los componentes en una escala 1:2 de la real. En otras palabras, el prototipado se formará a con las dimensiones a la mitad de la original presentada en los planos.

A continuación, se presenta la etapa de construcción del equipo a escala, se implementó tres módulos para su posterior ensamble.

- Modulo estructural.
- Agarre del filtro.
- Tubería.

7.6.1 Estructura del prototipo.

Las puertas, base y techo se construyeron, utilizando tanques de transporte de aceites (ver figura 51) para lograr la forma cilíndrica del diseño. El material de estos tanques es acero al carbono.

Figura 51. Tanque de aceite



Seguidamente se procede en la construcción y ensamble de los componentes de la recolección como lo son: el embudo y recipiente. Además de la estructura de apoyo de la máquina (ver figura 52). El material empleado es tubería cuadrada de acero para las patas y lamina de acero para el embudo y recipiente.

Figura 52. Ensamble embudo, recipiente y soporte



7.6.2 Construcción del agarre, soporte para el filtro y tubería.

Posteriormente se realiza el agarre del filtro con las siguientes consideraciones:

- ✓ se simula la longitud y diámetro del filtro por medio de un tubo recto de acero.
- ✓ La rueda Pelton para este modelo se simulo implementando una rueda de paletas.
- ✓ La tubería de inyección se efectuó un *manifold* para reducir los tramos de tubería propuestos en el diseño (ver figura 57).

Por consiguiente, se presenta material fotográfico de la construcción y ensamble de estos componentes.

Figura 53. Agarre filtro



Figura 54. Montaje carrusel



Figura 55. Carrusel y sistema de agarre



Figura 56. Ensamblaje tubería central y tapiz



Figura 57. Ensamblaje tubería-carrusel, manifold de inyección y tubería de propulsión



7.7 COSTOS DE CONSTRUCCIÓN MAQUINA Y PROTOTIPO

Como complemento a este capítulo, se evidencia en las tablas 11 y 12, el costo estipulado para la fabricación de la maquina con dimensiones reales; y por otro lado el costo que implico la construcción del prototipo.

La construcción del prototipo se realizó con materiales de acero en la mayoría de sus componentes, se agregaron los valores del mismo según precios manejados en el mercado actual. Se contabilizo las horas empleadas en cada operación de la fabricación para así determinar un costo por hora de la labor. A continuación, se evidencia las operaciones y materiales implementados con su respectivo valor monetario.

Tabla 11. Análisis de costo del prototipo

MATERIALES	CARACTERÍSTICAS	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Lamina calibre 18	Acero	181 kg	Kg	\$2.500	\$452.500
Tubería	Acero al carbono SCH 40, 1 in	1	m	\$20.053	\$ 20.053
Tubería	Acero al carbono SCH 40, 1 ¼ in	1	m	\$26.199	\$26.199
Tubería	Acero al carbono SCH 40, 2 in	2	m	\$33.815	\$67.630
Tubería	Acero al carbono SCH 40, 3 in	3	m	\$63.148	\$189.444
ELEMENTOS COMPRADOS	CARACTERÍSTICAS	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL	
Sello de puerta.	Caucho 6 metros	1	\$50.000	\$50.000	
Barra rectangular	Acero al carbono, 6 metros	1	\$20.000	\$20.000	
Barra redonda roscada	Acero inox.	5	\$9.600	\$48.000	
Tornillería	Acero inox.	20	\$480	\$9.600	
Buje	Bronce	5	\$1.400	\$6.000	
MANO DE OBRA	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL	
Ensamblaje	3	Hora	31.000	\$93.000	
Pintura	2	Hora	30.000	\$60.000	
Taladrado	3	Hora	25.000	\$75.000	

Mecanizado	4	Hora	60.000	\$240.000
Curvadora	3	Hora	40.000	\$120.000
Soldadura	4	Hora	50.000	\$200.000
Corte plasma	3	Hora	35.000	\$105.000
ITEM		COSTO		
Materiales		\$755.826		
Elementos comprados		\$133.600		
Mano de obra		\$693.000		
TOTAL		\$1.582.426		

Basados en la fabricación del prototipo se estima un valor para la maquina con sus dimensiones reales y relacionando las horas utilizadas como una estimación del tiempo a emplear en cada una de las operaciones.

Tabla 12. Análisis de costo de la máquina

MATERIALES	CARACTERÍSTICAS	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Lamina calibre 18	Acero	363 kg	Kg	\$2.500	\$907.500
Tubería	Acero al carbono SCH 40, 1 in	1	m	\$20.053	\$ 20.053
Tubería	Acero al carbono SCH 40, 1 ¼ in	1	m	\$26.199	\$26.199
Tubería	Acero al carbono SCH 40, 2 in	2	m	\$33.815	\$67.630
Tubería	Acero al carbono SCH 40, 3 in	3	m	\$63.148	\$189.444

ELEMENTOS COMPRADOS	CARACTERÍSTICAS	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Sello de puerta.	Caucho 6 metros	1	\$50.000	\$50.000
Barra rectangular	Acero al carbono, 6 metros	1	\$20.000	\$20.000
Barra redonda roscada	Acero inox.	5	\$9.600	\$48.000
Tornillería	Acero inox.	20	\$480	\$9.600
Buje	Bronce	5	\$1.400	\$6.000
Tobera	Acero inox.	20	\$47.800	\$956.000
MANO DE OBRA	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Ensamblaje	4	Hora	31.000	\$124.000
Pintura	3	Hora	30.000	\$90.000
Taladrado	4	Hora	25.000	\$100.000
Mecanizado	8	Hora	60.000	\$480.000
Curvadora	6	Hora	40.000	\$240.000
Soldadura	6	Hora	50.000	\$300.000
Corte plasma	5	Hora	35.000	\$175.000
ITEM		COSTO		
Materiales		\$1.210.826		
Elementos comprados		\$1.089.600		
Mano de obra		\$1.509.000		
TOTAL		\$3.809.426		

8. CONCLUSIONES

- Se redujo el tiempo de operación a causa del desarrollo de la máquina, puesto que se limpian cinco filtros a la vez durante una hora, además de disminuir el consumo en un 58% aproximadamente respecto al gasto implementado por la empresa durante una jornada de dieciséis horas de limpieza. lo cual se justifica por la configuración cerrada de la máquina y el impacto directo del flujo en la superficie del filtro.
- Se implementó un catálogo (anexo I) de instalación y funcionamiento de la máquina, con el objeto de dar al operario la información necesaria para evitar accidentes de trabajo mediante la identificación de los entornos potenciales de peligro y respetando las reglas de seguridad pertinentemente. Lo anteriormente expuesto, se modificará y agregará nueva información al manual, respecto que no existe un modelo similar con el cual comparar.
- Con respecto al prototipo diseñado y construido, se encuentra en curso de desarrollo, Por tanto una de las recomendaciones sugeridas es emplear un control que permita la apertura y cierre del suministro de vapor al comenzar y terminar cada fase, como resultado el operario no necesitara temporizar el proceso ni manipular manualmente el suministro de vapor, en consecuencia se evita perdidas de flujo de caudal por sobrepasarse del tiempo especificado o filtros sucios por concluir con el proceso anticipadamente.

- El presente proyecto afianza la relación entre la Universidad Industrial de Santander e IMSOL S.A.S, abriendo puertas con beneficios mutuos para la realizacion de futuros convenios que aporten a mejorar la formación del estudiante y la calidad de la empresa.

- Los softwares para el cálculo de ecuaciones *EES* y simulación grafico *SIMULINK* fueron de gran importancia para el desarrollo del modelo matemático, permitiendo una caracterización del comportamiento de las variables que rigen el comportamiento de las tuberías y la estructura del prototipo, dando solución a los problemas de requerimiento de vapor en cada fase.

BIBLIOGRAFIA

ÇENGEL, Yunus A; CIMBALA, Jhon M. Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones: Turbomaquinaria. Cuarta edición, México: McGraw-Hill, 2012. 997p.

ÇENGEL, Yunus A; BOLES, Michael A. Termodinámica. Séptima edición, México: McGraw-Hill, 2012. 1041p.

ÇENGEL, Yunus A; GHAJAR, Afshin J. Transferencia de calor y masa, Fundamentos y aplicaciones. Cuarta edición, México: McGraw-Hill, 2011. 946p.

GOMEZ LOPEZ, Luis Eduardo; RUGELES PEREZ, Javier. Endurecimiento acelerado del concreto por termotratamiento con vapor. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 1985, 210p.

KERN J, Donald. Procesos de transferencia de calor: condensación de vapores simples. México: CECSA, 1999. 980p.

MORENO DÍAZ, Ennar Sicilia. Propuesta de un método de disminución de viscosidad para el mejoramiento del sistema hidráulico de la estación de flujo orocual 2 (EF-ORC-2C). Trabajo de grado Ingeniero de Petróleo. Maturín.: Universidad del Oriente. Escuela de Ingeniería de petróleo, 2011, 174p.

ANEXOS