



# **Diseño de un sistema de transferencia de calor con aceite térmico para grabación por rodillo en PROQUINAL S.A.S.**

**José Miller Vela Lozano**

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

2021

# **Diseño de un sistema de transferencia de calor con aceite térmico para grabación por rodillo en PROQUINAL S.A.S.**

**José Miller Vela Lozano**

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

Director:

Ing. Nicolás Giraldo Peralta, Ph.D.

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Bogotá, Colombia  
2021

## **Agradecimientos.**

Agradecer ante todo a Dios y la Virgen que están a todo instante iluminando mi día a día, también a todas esas personas que de una u otra manera me estuvieron prestando apoyo y dedicación en la etapa final de aprendizaje y elaboración de este documento. Debo hacer un reconocimiento a mi director de grado, el Ing. Nicolás Giraldo Peralta, el cual ha sido un apoyo importante para el desarrollo del mismo, brindando todo su conocimiento, experiencia, tiempo y paciencia, para llevar a cabo este proyecto de la mejor manera posible. A él, y a todos los docentes que participaron durante toda mi formación académica, que aportaron todo su conocimiento y facilitaron el aprendizaje durante toda mi carrera universitaria.

También, quiero agradecer de manera especial a mi madre, y amigos de trabajo que, durante el transcurso de mi formación, siempre estuvieron apoyando y brindando motivación para continuar y finalizar satisfactoriamente mi carrera profesional.

## Resumen.

Hoy en día donde la energía es cada vez es más costosa, es de gran importancia que las empresas adopten por hacer mejoras en los sistemas que generan energía térmica. Por eso el objetivo de este proyecto es el diseño de un sistema de transferencia de calor con aceite térmico para generar grabación por rodillos a ciertas telas vinílicas que llevan como proceso final en su fabricación. Para conseguir dicho objetivo, se estudiaron a fondo dos sistemas de transferencia de calor, primero es el sistema que está actualmente trabajando que es un sistema térmico con vapor, y el segundo es el sistema térmico propuesto en el proyecto que es con aceite térmico, con el fin de determinar parámetros y variables de trabajo en el sistema y poder compararlos.

Llevando a fin el diseño del sistema de transferencia de calor, se propone también el diseño del rodillo térmico para aceite el cual va a trabajar en el sistema, cumpliendo con todos los parámetros de funcionamiento tanto energéticos, económicos y ambientales para el nuevo sistema.

**Palabras clave:** vapor, energía, transferencia de calor, eficiencia energética, transferencia de calor, aceite térmico.

## **Abstract.**

Nowadays energy is more and more expensive, it is very important for companies to perform improvements in systems that generate thermal energy. Given that, the objective of this project is the design of a heat transfer system with thermal oil to heat rollers that are used to engrave vinyl fabrics as a final process in their manufacture. To achieve this objective, two heat transfer systems were studied in depth, first is the system that is currently working, which is a thermal system with steam, and the second is the thermal system proposed in this project, which is heated with thermal oil. All the design and operating parameters were studied in order to be able to compare both systems.

On the other hand, the design of the thermal oil engraving roller was also proposed, taking into account all the energy, economic and environmental operating parameters for the new system.

**Keywords:** steam, energy, engraving roller, energy efficiency, heat transfer, thermal oil.

# Contenido

	Pág.
<b>1. Descripción del proyecto.....</b>	<b>3</b>
1.1 Justificación. ....	3
1.2 Objetivos. ....	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
<b>2. Marco teórico.....</b>	<b>5</b>
2.1 Descripción del proceso de grabación.....	5
2.2 Rodillo térmico. ....	7
2.2.1 Tipos de rodillos térmicos. ....	7
2.2.2 Rodillos térmicos para vapor.....	7
2.2.3 Rodillo térmico para aceite. ....	9
2.2.4 Tipos de rodillos para aceite térmico.....	9
2.2.5 Rodillos de enfriamiento. ....	12
2.3 Calderas.....	13
2.3.1 Definición de caldera. ....	13
2.3.2 Clasificación de calderas ....	13
2.3.3 Combustibles para calderas.....	16
2.3.4 Combustión en calderas. ....	18
2.3.5 Rendimiento en calderas. ....	23
2.4 Tipos de fluidos térmicos y propiedades.....	24
2.5 Circuito de transferencia con vapor. ....	24
2.5.1 Tipos de vapor.....	25
2.5.2 Ventajas de los sistemas térmicos para vapor. ....	26
2.5.3 Desventajas de los sistemas térmicos para vapor. ....	26
2.5.4 Componentes de un sistema térmico para vapor.....	26
2.6 Circuito de transferencia con aceite térmico.....	27
2.6.1 Ventajas de los sistemas para aceite térmico. ....	28
2.6.2 Desventajas de los sistemas para aceite térmico.....	28
2.6.3 Componentes de un sistema para aceite térmico. ....	28
<b>3. Metodología.....</b>	<b>30</b>
<b>4. Descripción del sistema térmico de vapor y sistema térmico de aceite. ....</b>	<b>32</b>
4.1 Sistema térmico de vapor de PROQUINAL S.A.S. ....	32
4.1.1 Funcionamiento del Sistema térmico de vapor actual en el sistema de grabación. ....	33
4.1.2 Funcionamiento de la caldera de vapor. ....	35
4.1.3 Características de la caldera del sistema de vapor. ....	37
4.1.4 Funcionamiento del rodillo térmico de vapor en el sistema de grabación.....	38
4.1.5 Características del rodillo de vapor.....	39
4.2 Sistema de aceite térmico de PROQUINAL S.A.S. ....	40

4.2.1	Funcionamiento del sistema de aceite térmico.....	40
4.2.2	Características de la caldera de aceite térmico.....	43
<b>5.</b>	<b>Cálculos de los sistemas térmicos de PROQUINAL S.A.S.....</b>	<b>44</b>
5.1	Cálculos del sistema del vapor existente en PROQUINAL S.A.S. ....	44
5.1.1	Cálculos de balance de energía en la caldera de vapor.....	44
5.1.2	Cálculos de rendimiento de la caldera de vapor.....	46
5.1.3	Circuito termo mecánico del sistema de vapor.....	46
5.1.4	Circuito de agua.....	46
5.1.5	Circuito de combustión. ....	47
5.1.6	Cálculos termodinámicos del sistema de vapor. ....	48
5.1.7	Costo global de operación del sistema térmico de vapor. ....	50
5.2	Cálculos del sistema térmico de aceite.....	51
5.2.1	Cálculos del rendimiento de la caldera para aceite térmico. (método indirecto). ....	52
5.2.2	Relación de aire – combustible estequiometria. ....	52
5.2.3	Cálculos termodinámicos del sistema de aceite térmico. ....	53
5.2.4	Costo global de operación del sistema de aceite térmico.....	55
<b>6.</b>	<b>Diseño y ensamble del rodillo térmico para aceite.....</b>	<b>56</b>
6.1	Consideraciones de diseño. ....	56
6.2	Diseño mecánico.....	59
6.2.1	Diseño de partes.....	59
6.2.2	Materiales para la fabricación. ....	60
6.2.3	Simulación mecánica. ....	61
6.3	Diseño del sistema de recirculación de aceite para el rodillo.....	66
6.3.1	Componentes del sistema de recirculación de aceite.....	67
6.3.2	Características de la bomba de recirculación para el rodillo térmico de aceite. ....	68
<b>7.</b>	<b>Resultados y análisis.....</b>	<b>71</b>
7.1	Diseño del sistema de vapor actual - Rodillo.....	71
7.2	Diseño del sistema de aceite térmico para el proceso de grabación. ....	72
7.3	Tabla comparativa de los dos sistemas térmicos. ....	75
<b>8.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>78</b>
8.1	Conclusiones.....	78
8.2	Recomendaciones. ....	79
<b>9.</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>80</b>
<b>Anexos.....</b>		<b>83</b>
Anexo A.....		83
Anexo B.....		85
Anexo C.....		86
Anexo D.....		88
Anexo E.....		94
Anexo F.....		98
Anexo G.....		99
Anexo H.....		102
Anexo I.....		106





## Lista de figuras.

	Pág.
<b>Figura 2-1:</b> Máquina para el proceso de grabado. ....	5
<b>Figura 2-2:</b> Proceso de grabado por rodillos. ....	6
<b>Figura 2-3:</b> Rodillo de una sola carcasa, flujo dúo. ....	8
<b>Figura 2-4:</b> Rodillo de flujo único. ....	8
<b>Figura 2-5:</b> Rodillo para fluido térmico. ....	9
<b>Figura 2-6:</b> rodillo térmico de carcasa doble con pasaje en espiral. ....	10
<b>Figura 2-7:</b> Rodillo de flujo dúo. ....	10
<b>Figura 2-8:</b> Rodillo de doble cara y doble carcasa. ....	11
<b>Figura 2-9:</b> Rodillo con carcasa doble. ....	12
<b>Figura 2-10:</b> Rodillo de enfriamiento. ....	12
<b>Figura 2-11:</b> Caldera Acuo-tubular. ....	13
<b>Figura 2-12:</b> Caldera Piro tubular. ....	14
<b>Figura 2-13:</b> Detalle de caldera de dos pasos. ....	15
<b>Figura 2-14:</b> Detalle de la caldera de triple paso de humo. ....	16
<b>Figura 2-15:</b> Sistema típico de vapor. ....	25
<b>Figura 2-16:</b> Circuito de calentamiento por aceite térmico. ....	27
<b>Figura 4-1:</b> Circuito térmico de vapor Actual. ....	33
<b>Figura 4-2:</b> válvula de control. ....	34
<b>Figura 4-3:</b> Transductor de presión neumática. ....	34
<b>Figura 4-4:</b> Caldera de vapor. ....	37
<b>Figura 4-5:</b> rodillo térmico de vapor de PROQUINAL S.A.S. ....	39
<b>Figura 4-6:</b> Sistema térmico de vapor. ....	40
<b>Figura 4-7:</b> Mímico de la caldera de Aceite Térmico. ....	41
<b>Figura 4-8:</b> Caldera de aceite térmico. ....	42
<b>Figura 4-9:</b> Bombas de recirculación de aceite. ....	43
<b>Figura 5-1:</b> Esquema del balance de energía en la caldera de vapor. ....	46
<b>Figura 6-1:</b> Rodillo térmico ensamblado. ....	60
<b>Figura 6-2:</b> análisis de convergencia de mallado. ....	62

---

<b>Figura 6-3:</b> Esfuerzos máximo de Von Mises.....	63
<b>Figura 6-4:</b> Estrés principal del rodillo.....	64
<b>Figura 6-5:</b> Factor de seguridad del diseño. ....	65
<b>Figura 6-6:</b> Análisis desplazamiento. ....	66
<b>Figura 6-7:</b> Sistema de control y recirculación de Aceite. ....	67
<b>Figura 7-1:</b> Circuito térmico de vapor con variables de trabajo. ....	71
<b>Figura 7-2:</b> Sistema de aceite térmico con aceite - Rodillo. ....	73
<b>Figura 7-3:</b> Sistema térmico con el nuevo proceso. ....	74

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 2-1:</b> Composición de los gases de combustión. ....	18
<b>Tabla 4-1:</b> Características de la caldera de vapor. ....	37
<b>Tabla 4-2:</b> Características técnicas del rodillo de vapor. ....	39
<b>Tabla 4-3:</b> Descripción de la placa de la caldera KONUS. ....	43
<b>Tabla 5-1:</b> Balance de energía de la caldera de vapor. ....	45
<b>Tabla 5-2:</b> Concentración molar del producto de combustión (Base seca). ....	49
<b>Tabla 5-3:</b> Costos de generación de vapor. ....	51
<b>Tabla 5-4:</b> Costo global de generación de energía térmica de la caldera de aceite. ....	55
<b>Tabla 6-1:</b> Dimensiones para el diseño. ....	56
<b>Tabla 6-2:</b> Variables Térmicas de trabajo. ....	58
<b>Tabla 6-3:</b> Información del Material a utilizar. ....	61
<b>Tabla 6-4:</b> Análisis Estático obtenido en Autodesk® Inventor® student. ....	62
<b>Tabla 6-5:</b> Características de Curvas de la Bomba KSB. ....	69
<b>Tabla 6-6:</b> Información de curva de la bomba KSB. ....	70
<b>Tabla 7-1:</b> Valores termodinámicos del sistema de vapor. ....	72
<b>Tabla 7-2:</b> Valores termodinámicos del sistema de aceite. ....	74
<b>Tabla 7-3:</b> Tabla Comparativa por cambio de Tecnología. ....	75
<b>Tabla 7-4:</b> Tabla de Flujos Másicos de cada Sistema Térmico. ....	76
<b>Tabla 7-5:</b> de flujo másico de productos de combustión por caldera. ....	76

## Lista de símbolos y abreviaturas. Símbolos con letras latinas.

Símbolo	Término
$M^3$	Metro cúbico
$^{\circ}C$	Grados Celsius
$K$	Grados kelvin
$V$	Volumen
$T$	Temperatura

## Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término
$\eta$	Eficiencia
$\dot{m}$	Flujo másico
$\rho$	Densidad
$\lambda$	Lambda
$Q$	Caudal volumétrico

## Abreviaturas

Abreviatura	Término
$AC$	Relación de aire combustible
$C_p$	Calor específico
$h_g$	Entalpía de vapor saturado
$h_{fg}$	Entalpía de líquido saturado
$P_{sat}$	Presión de saturación

## Introducción.

PROQUINAL S.AS. es una empresa de telas vinílicas, realiza un proceso de acabado a sus productos por medio de un sistema de grabación por rodillo. En este proceso el producto pasa por un rodillo térmico, el cual es calentado por medio de vapor que fluye a través de él. Este vapor se genera con un circuito de vapor con caldera. Lo anterior, genera una serie de costos tanto energéticos como económicos a la compañía.

El presente proyecto plantea realizar un proceso de mejoramiento de la eficiencia energética del proceso, realizando un cambio tecnológico que consiste en el cambio del sistema de calentamiento, de vapor a aceite térmico, con el correspondiente cambio del rodillo. Lo anterior, aprovechando que la empresa tiene un circuito de aceite térmico que genera energía para otros procesos. Tal circuito de aceite se encuentra trabajando a una capacidad del **66%**, agregando el rodillo de aceite térmico la capacidad del sistema aumenta a un **67,5%**. Además de reportar un ahorro sustancial en costos de energía y aprovechamiento energético

## Antecedentes.

Esta propuesta de proyecto se desarrollará a partir de la necesidad que se está presentando en los procesos de grabado a materiales que produce la empresa PROQUINAL S.A.S., debido a algunas fallas que se presentan en un sistema térmico de vapor, ya sea por eficiencia de la caldera o por fallas que no se ven reflejadas con facilidad debido a los años de servicio del sistema, causando tiempos no productivos de máquinas causadas por el sistema de vapor que no genera la energía térmica requerida para el proceso de grabado por rodillos que tiene como variable principal la temperatura en el rodillo de vapor.

PROQUINAL S.A.S. miembro de SPRADLING GROUP es una compañía que se dedica a la fabricación de textiles recubiertos con polímeros para diferentes aplicaciones en los mercados de tapicería, transporte marino, automotriz, pisos industriales y marroquinería; compañía de 60 años de experiencia. En el año 2006 la Universidad Austral de Chile presentó un análisis de calefacción mediante aceite térmico en un buque porta contenedores, cuyo objetivo es dar a conocer un sistema de calefacción mediante aceite térmico. [1] En el año 2015 la Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Ingeniería, presenta una propuesta con el objetivo de mejora de un sistema de transferencia de calor con aceite térmico en una industria textil, que como resultado incrementa la eficiencia del sistema evitando pérdidas de calor en el transporte del fluido., [2].

En el año 2017 las Escuelas Politécnicas Nacionales en Quito diseñaron un sistema un sistema de calentamiento de agua y aire mediante aceite térmico para la empresa ATU ARTICULOS DE ACERO S.A. Donde proponen un sistema de calentamiento por fluido térmico como medio idóneo de transferencia de calor para el proceso, el cual requieren altas temperaturas. [3] En el año 2005 la Universidad Autónoma de Occidente Facultad de Ingenieras de Santiago de Cali presentó un estudio de eficiencia energética realizada a una caldera piro tubular de 250 BHP marca *Col maquinas* modelo 1979. Con el objetivo de mejorar su funcionamiento y reducir su consumo de combustible y el costo de vapor producido, con este estudio se evidenció que para generar calor es más eficiente generarlo en calderas de aceite térmico ya que ofrece mejores ventajas que en calderas de vapor., [4].

# 1.Descripción del proyecto.

Con este proyecto se busca principalmente mejorar la eficiencia y disminuir tiempos no productivos en un proceso que ocurre en la empresa PROQUINAL S.A.S. en la elaboración de sus productos y de esta forma también ofrecerle economía en el uso de energía térmica. Este cambio sería el uso de aceite térmico en lugar de vapor en el proceso de grabación de telas vinílicas. La empresa cuenta con una infraestructura que consiste de cuatro calderas de aceite térmico y una caldera de vapor. El circuito que se propone para que alimente con aceite térmico en lugar de vapor está liderado por la caldera cuyo nombre es KONUS tiene una capacidad térmica de **2907 kW/h** y un caudal de **237,5m<sup>3</sup>/h** a una temperatura máxima de funcionamiento de **573,15 K**.

La caldera de vapor tiene una capacidad térmica de **981,06 kW**, y presenta deficiencias en el sistema ya sea por pérdidas de calor o fallas en tubería que transporta vapor hacia las máquinas que lo requieren, debido a esta problemática se han aumentado los costos de operación por mantenimientos imprevistos en el sistema térmico.

Además de que este sistema térmico conformado por la caldera de vapor ha cumplido 50 años de servicio, y su costo global de operación anual de esta caldera se ha incrementado.

Se propone usar en vez de vapor, el aceite térmico del sistema que lidera la caldera KONUS para este fin. De esta forma aprovechar el calor generado por el aceite térmico de la caldera KONUS, como una alternativa para aprovechar esta fuente de energía y de esta forma hacer posible la sustitución del sistema de vapor.

## 1.1 Justificación.

El proyecto se busca principalmente beneficiar a la empresa PROQUINAL S.A.S., debido a la necesidad que está presentando actualmente de mejorar un proceso de grabación en su producción. Lo que se plantea es cambiar de sistema de calentamiento de vapor a aceite térmico lo que permite un ahorro sustancial de al menos un 20% comparada con el tradicional vapor [5], también permite un ahorro global de lo que cuesta la operación del sistema de vapor y mejor cuidado del medio ambiente.

## **1.2 Objetivos.**

### **1.2.1 Objetivo general.**

Diseñar sistema de transferencia de calor con aceite térmico para grabación por rodillo.

### **1.2.2 Objetivos específicos.**

1. Determinar los parámetros de funcionamiento del sistema de rodillos de grabación con fuente de energía de vapor.
2. Analizar termo mecánicamente la línea base actual de uso de energía y masa de vapor del sistema de rodillos en el proceso de grabación.
3. Determinar los costos de operación actuales del sistema de rodillos funcionando a vapor.
4. Determinar los parámetros de funcionamiento del sistema de rodillos con fuente de energía de aceite térmico.
5. Diseñar mecánicamente el sistema de rodillos de grabación para uso con aceite térmico y su correspondiente sistema de circulación.
6. Analizar termo mecánicamente el uso de energía y masa de aceite térmico en los rodillos de grabación.
7. Determinar los costos de operación del sistema de rodillos funcionando con aceite térmico.
8. Hacer un análisis comparativo de los sistemas de vapor y aceite térmico en aspectos energéticos, económicos y ambientales.
9. Determinar el costo de la propuesta de proyecto y la tasa interna de retorno de la inversión a la empresa PROQUINAL S.A.S.

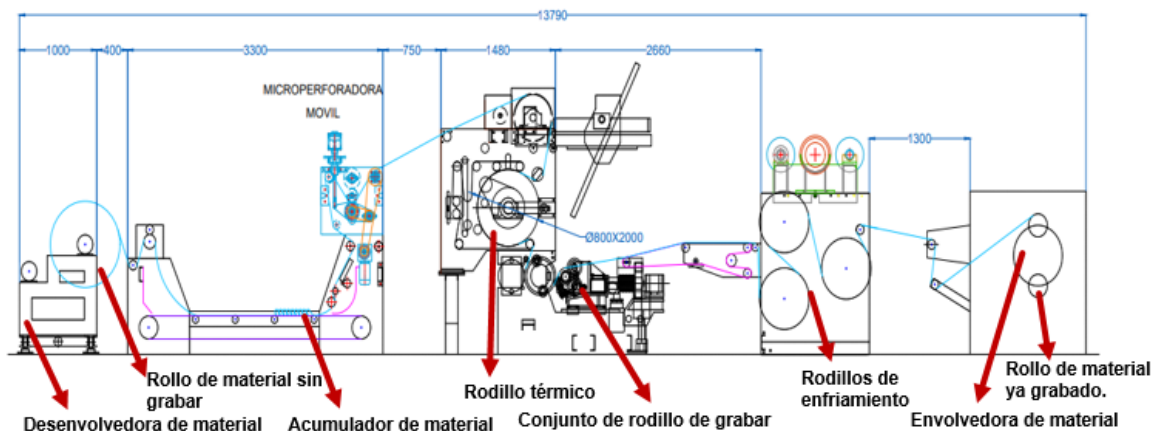


## 2.Marco teórico.

### 2.1 Descripción del proceso de grabación.

La fabricación de los diferentes productos en PROQUINAL S.A.S., llevan procesos de grabación y estampado para cada tipo de producto según el diseño y referencia del material. Uno de los procesos más destacados en la fabricación de estos productos es el proceso de grabación por rodillos. El cual lo describe la **Figura 2-1**, donde se da a conocer un esquema total de la máquina encargada de hacer este tipo de grabado por rodillos, la trazabilidad que hace el material por los diferentes puntos de la máquina hasta generar el grabado en el conjunto de grabar.

**Figura 2-1:** Máquina para el proceso de grabado.



Fuente: [6]

Que es, el proceso final que tiene el material en esta trazabilidad, observando que el material viene en rollos y que hace un recorrido desde una desmenuadora de material, que se encarga de desmenuar el material según su variable de velocidad de la máquina, pasando por un acumulador donde se acumula cierta cantidad de metros dándole tiempo al operario de hacer el empalme con el otro rollo a la medida que se va desmenuando. Luego llega a un sistema de micro perforado donde este proceso se desarrolla muy poco ya que material micro perforado tiene poca demanda. Luego sigue el recorrido llegando a un rodillo térmico de vapor donde se le transmite un sobrecalentamiento térmico a la cara de material que es a base de PVC para que sea fácil de generar el proceso de grabado cuando pase por el sistema de grabación, luego de ser grabado el material hace un

recorrido por un conjunto de rodillos de enfriamiento, haciendo que le material se refrigere y así evitando que pierda su ancho y finalmente llegando a la envolvedora para ser de nuevo enrollado.

En este proceso de grabado hay una gran variedad de referencia de materiales que llevan procesos de acabado y que es generado por grabación por rodillos, según la aplicación o destino, los cuales se conocen con los nombres de SAHARA PASCAL, JERRY LIENZO, DIAMANTE EUROPA, CORDERO DIAMANTE, CAPELLADA ROVER, PANTERA WALLABY, VINICUERO JACKSON MIMBRE UNI NEGRO, ISLANDER CHAN TUNG, MAGLIA EUROPA BIC, HITCH EUROPA MET., CUDDY COM. Cada referencia de material se graba bajo unos parámetros y variables de trabajo debido a la hoja guía.

La Figura 2-2, nos muestra el proceso de grabado que se le genera al material según la referencia y su tipo de grabado.

**Figura 2-2:** Proceso de grabado por rodillos.



Fuente: [7]

La figura anterior, es uno de los procesos más importantes que se la aplica a las referencias de materiales que se fabrican en PROQUINAL S.A.S. con estos diseños de grabado hace que estos productos generen mayor atracción a los clientes.

## 2.2 Rodillo térmico.

Se denomina rodillo térmico o rodillo caliente como cuerpo cilíndrico que actúa sobre el producto en movimiento, aumentando, disminuyendo o manteniendo su temperatura en toda el área del rodillo.

Los rodillos térmicos o de calor se utilizan en diferentes aplicaciones que requieren control de temperatura uniforme. Se utilizan en muchos procesos de conversión, incluidos papel, láminas de plásticos y películas, material sintético. Para estos procesos existen una variedad de referencias de rodillos según su aplicación en la industria.

### 2.2.1 Tipos de rodillos térmicos.

Existe una gran variedad de rodillos térmicos, según para la aplicación.

- Rodillo térmico para vapor.
- Rodillo térmico para aceite.
- Rodillo de enfriamiento.

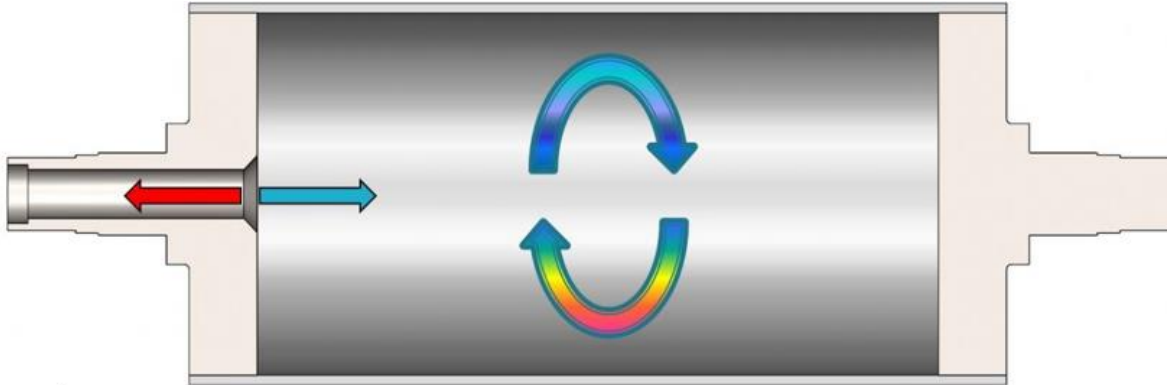
### 2.2.2 Rodillos térmicos para vapor.

El rodillo para vapor trabaja como un intercambiador de calor el cual se utiliza para transferencia de energía térmica disponible en el fluido a diferente temperatura. Los más utilizados en la industria son.

#### a. Rodillo de carcasa simple o sencilla.

Este tipo de rodillo tiene como característica principal que es de camisa simple, dúo o mono flujo [8]. La **Figura 2-3**, muestra el diseño de este tipo de rodillo térmico.

**Figura 2-3:** Rodillo de una sola carcasa, flujo dúo.



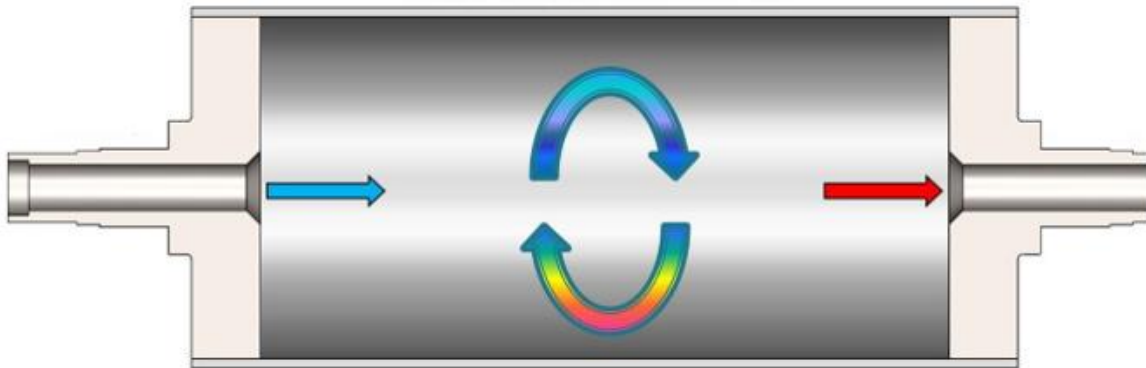
Fuente: [8]

Este tipo de rodillo se utiliza por un control de temperatura básico, donde es posible utilizar tubo sifón con boquilla ya que la entrada y retorno del fluido está por el mismo eje.

**b. Rodillo de flujo único de carcasa única.**

Este tipo de rodillo se caracteriza por sistema de flujo que ingresa y hace el retorno por espigo diferente. La **Figura 2-4** muestra el diseño con más detalle.

**Figura 2-4:** Rodillo de flujo único.



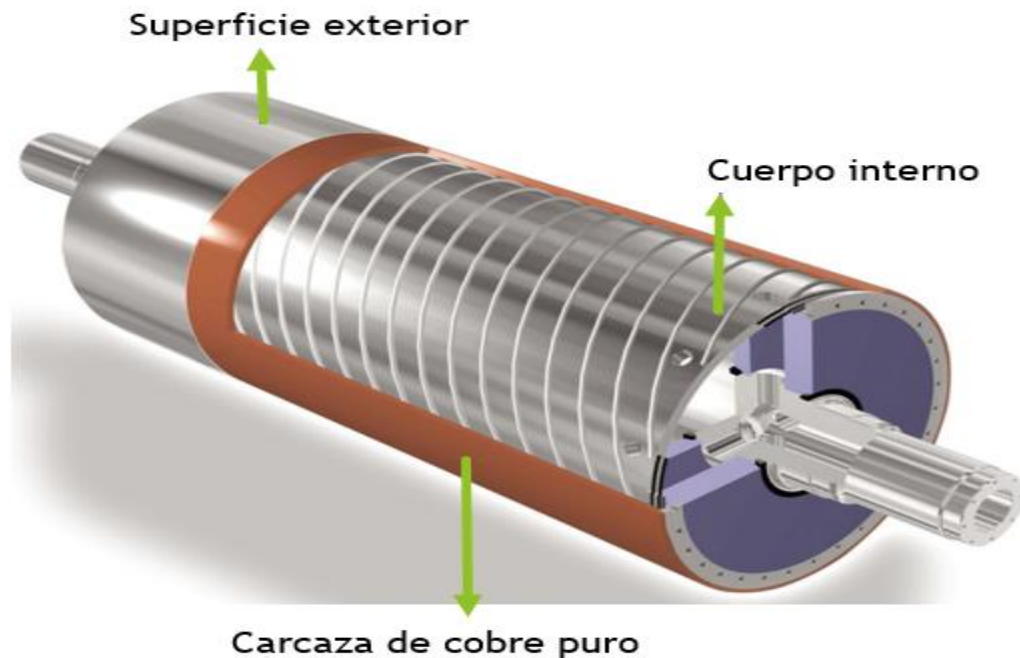
Fuente: [8]

De igual aplicación que el rodillo de la **Figura 2-3**, son rodillos para control de temperaturas básicas por su diseño que no es tan eficiente debido a sentido de entrada y retorno del fluido.

### 2.2.3 Rodillo térmico para aceite.

La selección de rodillos térmicos en muchas décadas ha sido el rodillo calentado por aceite, para provocar un flujo de calor desde el aceite dentro del rodillo a la superficie del rodillo donde está en contacto con la capa del material a precalentar. La **Figura 2-5**, muestra un diseño de un rodillo térmico para aceite.

**Figura 2-5** Rodillo para fluido térmico.



Fuente: [9]

La imagen anterior muestra un diseño de rodillo con enrollamiento en espiral, con doble camisa, que lo hace ser eficiente debido al diseño de la espiral que hace que el fluido se reparta por toda superficie del rodillo.

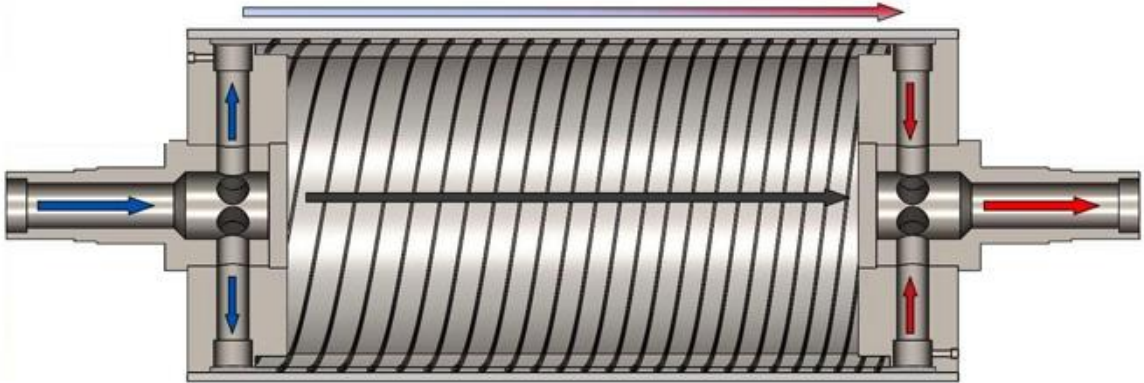
### 2.2.4 Tipos de rodillos para aceite térmico.

Estos tipos de rodillos para fluido térmico se manejan una gran variedad y se clasifican según su diseño y aplicación.

#### a. Rodillo de carcasa doble con pasajes en espiral.

Este modelo de rodillo térmico es el más popular en la industria, ya que sirve para varias aplicaciones como extrusión, laminado, calandrado y su propósito especial es para calentar o enfriar en línea. La **Figura 2-6**, muestra el diseño de este tipo de rodillo térmico.

**Figura 2-6:** rodillo térmico de carcasa doble con pasaje en espiral.



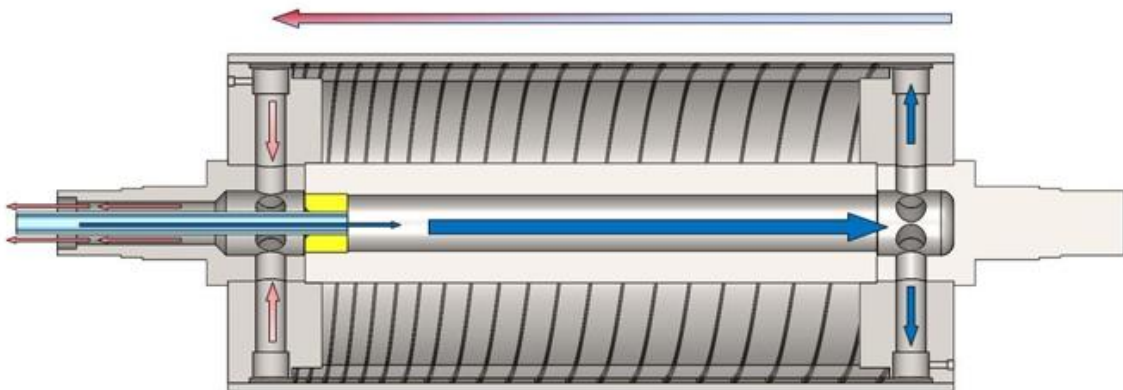
Fuente: [8]

En este diseño, la entrada y salida del fluido está por lados opuestos. El fluido fluye a través del rollo, un lado hacia dentro y un lado hacia fuera.

#### b. Rodillo de carcasa doble con pasajes en espiral – Rodillo de flujo dúo.

Su característica principal de este rodillo, es que la entrada y salida del fluido es por el mismo lado. Donde el fluido fluye a través de una tubería de sifón. La **Figura 2-7**, muestra a detalle el recorrido del fluido.

**Figura 2-7:** Rodillo de flujo dúo.



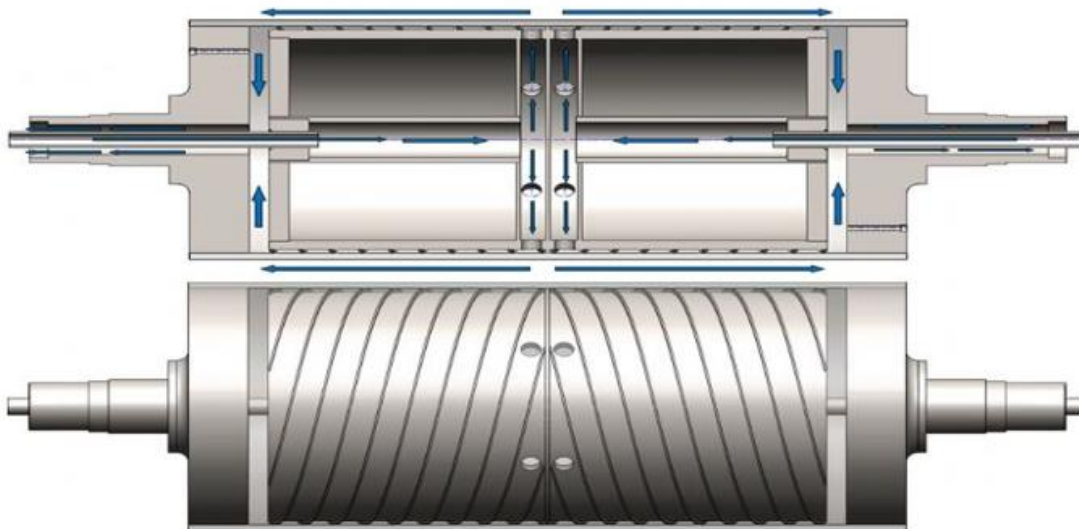
Fuente : [8]

Este tipo de rodillo la entrada del fluido está por el mismo lado, ya que el fluido fluye a través de una tubería de sifón para luego pasar por el espiral y salir a través del orificio del muñón.

### c. Rodillo de doble cara, doble carcasa con pasajes espirales de flujo dúo.

Este tipo de rodillo tiene como característica que la entrada y retorno del fluido se da por lado diferente. El fluido fluye a través de un tubo sifón desde cada lado y luego sigue los pasajes en espiral y sale a través de diferentes orificios de apoyo. La **Figura 2-8**, muestra el circuito interno del rodillo de doble carcasa.

**Figura 2-8:** Rodillo de doble cara y doble carcasa.



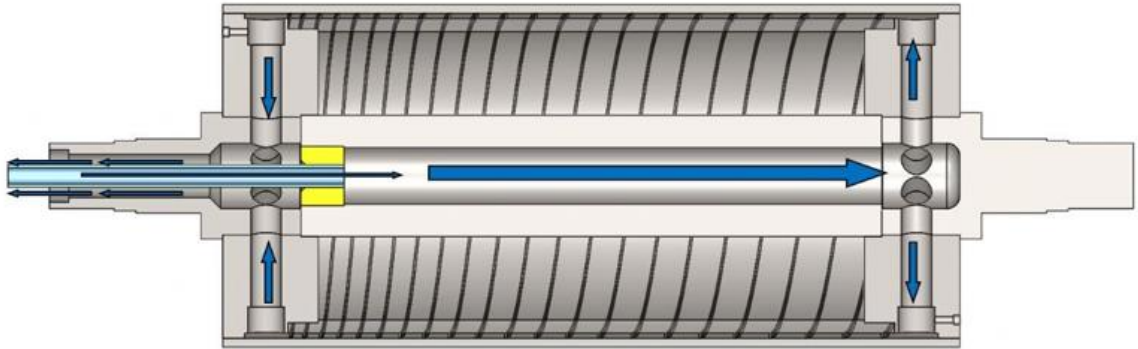
Fuente: [8]

Este tipo de rodillo térmico con este sistema, tiene una ventaja especial con el resto de diseños de rodillos y es que presenta una caída de presión y variación de temperatura mínima.

### d. Rodillo con carcasa doble con pasaje en espiral en espiral.

Este tipo de rodillo se utiliza especialmente para el proceso de calandrado, donde tiene un endurecimiento de 55- 60 HRc en el cuerpo es diseñado para problemas de flexión. La **Figura 2-9**, muestra el diseño de este tipo de rodillo.

**Figura 2-9:** Rodillo con carcasa doble.



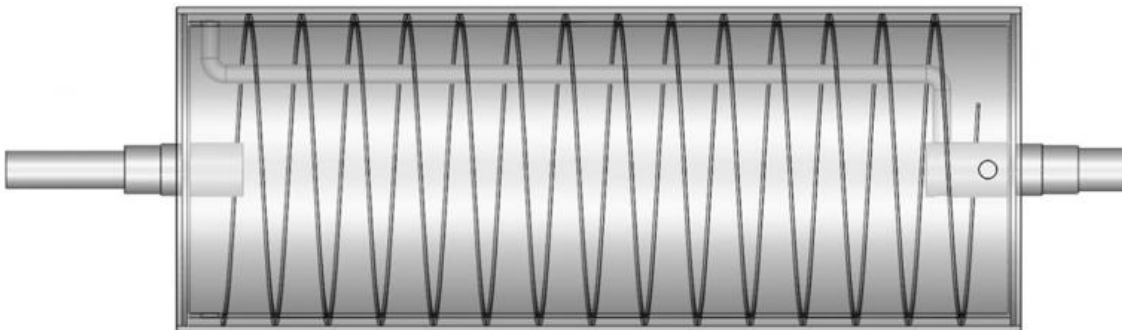
Fuente: [8]

Este tipo de rodillo térmico se utiliza especialmente para enfriar o calentar debido a su diseño y su aplicación es para trabajo pesado como extrusión y laminado.

### 2.2.5 Rodillos de enfriamiento.

Este tipo de rodillo se caracteriza por su sistema de contraflujo, el cual le da buen control de temperatura al sistema de enfriamiento. La **Figura 2-10**, muestra el diseño de este tipo de rodillo de enfriamiento el cual es el más común en la industria.

**Figura 2-10:** Rodillo de enfriamiento.



Fuente: [8]



En este tipo de rodillo el medio fluye a través de una tubería tipo sifón. El fluido ingresa a los canales en espiral desde un lado diferente y hay un sistema de contra flujo.

## 2.3 Calderas.

### 2.3.1 Definición de caldera.

La caldera se define como un intercambiador de calor el cual transforma la energía química del combustible en energía calorífica, las cuales se clasifican según su aplicación.

### 2.3.2 Clasificación de calderas

Las calderas se clasifican de acuerdo a su enfoque de servicio que va a prestar, o de acuerdo a la circulación de los fluidos dentro de los tubos del serpentín de la caldera.

#### a. Calderas Acuotubulares.

Son generadores de vapor de pequeño volumen de agua. Este tipo de caldera los gases de combustión circulan por la parte externa de los tubos, mientras que por su parte interna fluye el agua. La **Figura 2-11**, muestra un ejemplo detallado de este tipo de caldera.

**Figura 2-11:** Caldera Acuo-tubular.



Fuente: [10]

### **b. Calderas Piro tubulares.**

Son aquellas en las que los gases de combustión circulan por la parte interna de los tubos, mientras que por su parte externa fluye el agua. Todo el conjunto, agua y tubos de gases se encuentran rodeados por una carcasa exterior. Como muestra la **Figura 2-12**.

**Figura 2-12:** Caldera Piro tubular.



Fuente: [10].

Las calderas piro tubulares se clasifican en función de la disposición del haz tubular en:

- **Calderas horizontales.**

El haz tubular está de la parte delantera a la trasera de la caldera.

- **Calderas verticales.**

El haz tubular está dispuesto de la parte inferior a la parte superior de la caldera.

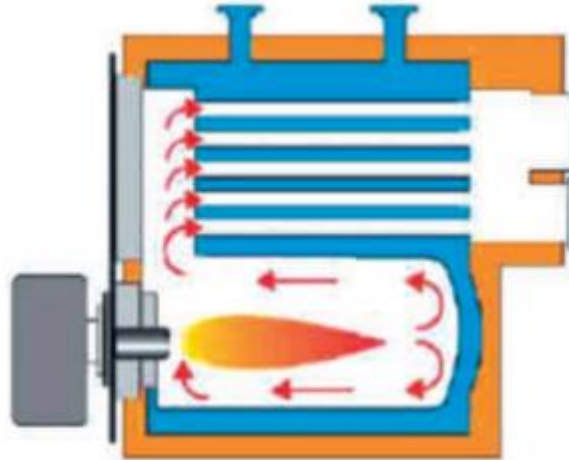
También las calderas piro tubulares se clasifican en función del número de haces tubulares en.

- **Calderas de dos pasos de gases.**

Este diseño de dos pasos de humos se ven claramente dos vías de paso autónomas de circulación de los productos de combustión. Se puede diferenciar una cámara cilíndrica de

combustión denominada hogar, localizada en la parte inferior de la caldera. Como lo muestra la **Figura 2-13**.

**Figura 2-13:** Detalle de caldera de dos pasos.

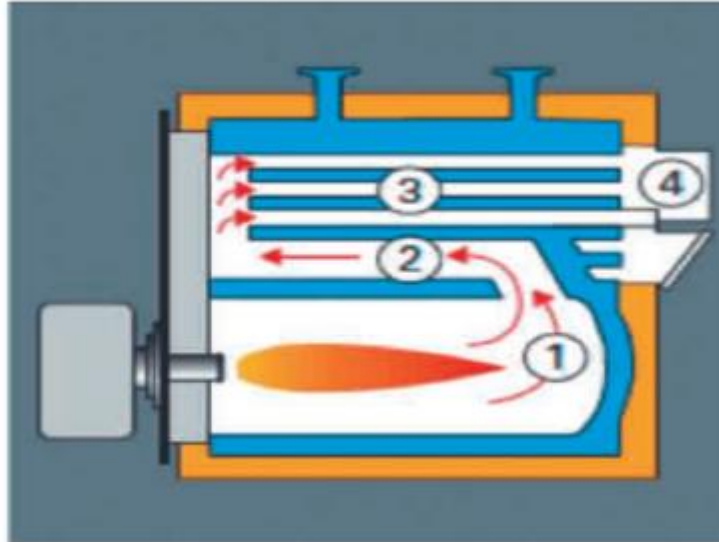


Fuente: [11]

- **Calderas de tres pasos de gases.**

En el diseño de tres pasos de humos se ve claramente tres vías de pasos autónomas de sentido único de circulación de los productos de combustión. Como lo muestra la Figura 2-14.

**Figura 2-14:** Detalle de la caldera de triple paso de humo.



Fuente: [11]

### 2.3.3 Combustibles para calderas.

Combustible es cualquier sustancia capaz de liberar energía en forma de calor cuando reacciona con el oxígeno. habitualmente el contenido en el aire, transformando su estructura química.

De acuerdo con su estado de agregación, los combustibles se clasifican en:

**a. Combustibles sólidos.** (leña, carbón).

Son aquellas sustancias en las que sus moléculas presentan una gran cohesión entre sí, ya que las fuerzas de atracción son superiores a las que originan los movimientos moleculares. Donde su característica principal es que mantienen una forma y volumen definidos.

**b. Combustible líquidos.** (fuel oil y gasoil).

Son aquellas sustancias en las que las fuerzas resultantes de los movimientos moleculares son lo suficientemente elevadas frente a las fuerzas de atracción para permitir el movimiento de las moléculas entre sí, permitiéndole fluir y adaptarse a la forma del recipiente que las contiene. Su característica principal es que no posee una forma definida, aunque mantienen un volumen determinado.

**c. Combustibles gaseosos.** (gases licuados del petróleo y gas natural).

Son aquellas sustancias en las que las fuerzas resultantes de los movimientos moleculares son muy superiores a las fuerzas de atracción entre moléculas.

**1. Propiedades generales de los combustibles.**

Independientemente del tipo de combustible, estos se definen por una serie de propiedades genéricas de las que se indican a continuación.

**a. Poder calorífico.**

Es la cantidad de energía (calor) desprendida por unidad de combustible en su combustión completa para unas condiciones determinadas de presión y temperatura de los productos que reaccionan y de los productos resultantes.

Para los combustibles cuyos productos de la combustión (gases quemados) contienen vapor de agua, se debe diferenciar si la cantidad de energía medida incluye la energía correspondiente al calor de vaporización de ese vapor de agua o no.

**b. Poder calorífico superior.**

Es la cantidad de energía desprendida por unidad de combustible enfriando los gases quemados hasta alcanzar condiciones normales. En estas condiciones, el vapor de agua ha condensado, cediendo su calor latente de vaporización (en este caso de condensación).

**c. Poder calorífico inferior.**

Es la cantidad de energía desprendida por unidad de combustible enfriando los gases quemados hasta alcanzar condiciones normales, pero sin considerar el calor latente de condensación del vapor producido. [11].

**2. Componentes del combustible.**

El combustible está compuesto principalmente por carbono (C) e hidrógeno (H). Cuando estas sustancias se queman con aire, se consume oxígeno (O<sub>2</sub>). Este proceso se llama oxidación. La **Tabla 2-1**, muestra la composición de los gases de combustión.

**Tabla 2-1:** Composición de los gases de combustión.

Fuente: [12]

### 3. Relación aire combustible.

La relación aire-combustible (AC) representa la cantidad de aire utilizado por unidad de masa de combustible durante un proceso de combustión. La ecuación (2-1), muestra la relación de aire combustible.

$$AC = \frac{\dot{m}_{aire}}{\dot{m}_{combustible}} \quad (2-1)$$

#### 2.3.4 Combustión en calderas.

La combustión es el conjunto de procesos físico-químicos en los que un elemento de combustible se combina con otro elemento generalmente oxígeno en forma de O<sub>2</sub> gaseoso, desprendiendo luz, calor y productos químicos resultantes de la reacción (oxidación). Como consecuencia de la reacción de combustión se tiene la formación de una llama. La cual emite luz y calor.

##### 1. Componentes de los gases de combustión.

Los componentes de los gases de combustión se dan según la concentración en el combustible.

##### a. Nitrógeno (N<sub>2</sub>).

El nitrógeno ( $N_2$ ) es el principal componente (79% en volumen) del aire que respiramos. Este gas incoloro, inodoro y sin sabor no interviene en la combustión. Entra en la caldera, se calienta y sale por la chimenea.

Valores comunes en los gases de combustión

Caldera de gasoil / gas 78% - 80%, valores son correspondiente a base seca.

#### **b. Dióxido de carbono ( $CO_2$ ).**

El dióxido de carbono es un gas incoloro e inodoro con un ligero sabor a agrío. Bajo la influencia de la luz solar y el verde de las hojas, la clorofila, las plantas convierten el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) en oxígeno ( $O_2$ ). La respiración humana y animal convierten el oxígeno ( $O_2$ ) de nuevo en dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Esto crea un equilibrio que los productos gaseosos de la combustión distorsionan.

Valores comunes en los gases de combustión:

Caldera de gasoil: 12.5% - 14%

Caldera de gas: 8% - 11%

#### **c. Vapor de agua (humedad).**

El hidrógeno que contiene el combustible se mezcla con el oxígeno para formar agua ( $H_2O$ ). Esta cantidad de agua se forma a partir del combustible y del aire combustionado, dependiendo de la temperatura de los gases de combustión (TH), en forma de humedad del gas de combustión (a una temperatura de los gases de combustión TH elevada) o como condensado (a una baja temperatura de los gases de combustión).

#### **d. Oxígeno ( $O_2$ ).**

El oxígeno restante no utilizado en la combustión en el caso de utilizar aire en exceso aparece como componente de los gases de combustión y se utiliza para medir el rendimiento de la combustión. Se utiliza para determinar las pérdidas de las chimeneas y el contenido de dióxido de carbono.

Valores típicos de combustión:

Caldera de gasoil: 2% - 5%

Caldera de gas: 2% – 6%  
(calentador)

#### **e. Monóxido de carbono (CO).**

Es un gas venenoso al respirarlo, incoloro, inodoro y es el producto de la combustión incompleta. En concentración demasiado alta, no permite que la sangre absorba oxígeno. Donde su valor límite de respiración es de 50 ppm.

Valores típicos en los gases de combustión:

Caldera de gasoil: 80 ppm – 150 ppm

Caldera de gas: 80 ppm – 100 ppm

#### **f. Óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).**

A altas temperaturas de combustión, el nitrógeno presenta en el combustible y en el aire ambiente una combinación con el oxígeno del aire formando monóxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). El NO<sub>2</sub> es soluble en agua, tóxico si se respira y contribuye a la formación del ozono en combinación con la radiación ultravioleta (luz solar). El NO y NO<sub>2</sub> en conjunto se llaman óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).

Valores típicos en los gases de combustión:

Caldera de gasoil: 50 ppm

Caldera de gas: 100 ppm

#### **g. Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).**

El dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) es un gas tóxico incoloro con un olor fuerte. Se forma a partir del azufre del combustible. Su valor límite es de 5 ppm. [12].

Valores típicos en los gases de combustión:

Caldera de gasoil: 180 ppm.

Calderas de gas: 220 ppm.

## **2. Balance de energía en calderas.**

En el balance de calor de una caldera se establece en la siguiente igualdad.

Calor entrante = Calor saliente



Para realizar el balance de energía se debe establecer lo siguiente.

Temperatura de referencia.

Realizar un balance de masa.

Establecer el PCI de combustible.

### 3. Calor entrante.

Para calcular el calor entrante se considera la siguiente información.

#### a. Calor sensible del combustible ( $Q_c$ ).

$$Q_c = Cc * Tc \quad (2-2)$$

Donde.

$Cc$  = calor específico del combustible

$Tc$  = Temperatura de precalentamiento del combustible (°C)

#### b. Calor de combustión ( $Q_{co}$ ).

$Q_{co}$  = PCI.

#### c. Calor de aire de combustión ( $Q_a$ ).

$$Q_a = Ac * c_{pa} * \Delta t \quad (2-3)$$

Donde.

$\Delta t$  = Diferencia de temperatura del aire de entrada a la caldera y de referencia

$c_{pa}$  = Calor específico del aire

$Ac$  = kg aire/ kg combustible (relación aire – combustible).

#### c. Cálculo del flujo de entrada ( $Q_{fe}$ ).

$$Q_{fe} = \frac{h_{fe} * Ca}{b} \quad (2-4)$$

Donde.

$h_{fe}$  = entalpía del fluido de entrada.

$c_a$  = Caudal del agua de alimentación a la caldera (kg/h).

$b$  = consumo horario de combustible.

#### 4. Calor saliente.

##### a. Calor de fluido de salida.

$$Q_{fs} = \frac{h_{fs} * p_v}{b} \quad (2-5)$$

Donde

$h_{fs}$  = Entalpía del fluido de salida [kJ/kg]

$p_v$  = Producción de vapor [kg/h]

$b$  = consumo horario de combustible.

##### b. Calor de humos $Q_h$ .

$$Q_{gs} = x \text{ [ kg humos /kg De combustible] } * \text{ [kJ / kg de humos] } \quad (2-6)$$

El calor de los gases de combustión se muestra en la tabla de la referencia [13]. Con él dé % de  $O_2$  y  $CO_2$  se obtiene el caudal de humos ( $x$ ) expresado en kg de humos /kg de combustible. Con la temperatura de los humos, y en la misma tabla, se encuentra la entalpía específica de los humos en kcal/ kg humos.

#### 3. Calor por inquemados gaseosos ( $Q_{ig}$ ).

$$Q_{ig} = \frac{21}{21-[O_2]} \left( \frac{[CO]}{3100} + \frac{CH}{1000} \right) * [\% \text{ de pérdidas sobre el PCI del combustible.}] \quad (2-7)$$

Donde

$O_2$  = concentración de  $O_2$  en los humos

$CO$  = concentración de  $Co$  en los humos ppm

$CH$  = concentración de  $CH$  en los humos ppm

#### 4. Calor por purgas $Q_p$ .

$$Q_p = \frac{p * h_p}{b} \quad (2-8)$$

Donde.

P= caudal de purgas en [kg/h]

$h_p$ = [Entalpía de la purga en kJ/ kg purga y corresponde a la entalpía de líquido para la presión de generación de vapor]

b= consumo horario de combustible

### 5. Calor por radiación ( $Q_r$ ).

$$Q_r = \frac{kJ/h}{b} \text{ [ kJ/kg de combustible]} \quad (2-9)$$

### 2.3.5 Rendimiento en calderas.

El rendimiento en calderas se puede calcular por dos métodos.

#### a. Método directo.

$$\eta = \frac{\dot{m}_{vapor} * (H - h)}{\dot{m}_{combustible} * LHV} \quad (2-10)$$

Donde.

$\dot{m}_{vapor}$ = Flujo másico del vapor [kg/h]

H= Entalpía del vapor [kJ/kg]

h= Entalpía del fluido de entrada [kJ/kg]

$\dot{m}_{combustible}$ = Flujo másico de combustible [kg/ h]

LHV= Poder calorífico del combustible [kJ/m<sup>3</sup>]

#### b. Método indirecto.

$$\eta = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{aportado}}} \times 100 \quad (2-11)$$

Donde.

$$Q_{\text{útil}} = Q_{\text{aportado}} - Q_{\text{pérdidas}}$$

$$Q_{\text{pérdidas}} = Q_{\text{humos}} + Q_{\text{inquemados}} + Q_{\text{purgas}} + Q_{\text{radiación}}$$

$$Q_{\text{aportado}} = PCI$$

## 2.4 Tipos de fluidos térmicos y propiedades.

Los aceites son fluidos utilizados para transportar calor de un lugar a otro, después de haber sido previamente calentado ya sea por la llama de un quemador, o una resistencia o cualquier otro equipo que suministre calor.

a. Los tipos de fluidos térmicos más comunes son los que menciona la fuente de sistemas de fluidos térmicos como son: [14].

1. Base agua, como agua caliente, sobrecalentada o vapor.
2. Base hidrocarburos, derivados del petróleo como los aceites.
3. Sales o minerales fundidos a altas temperaturas.

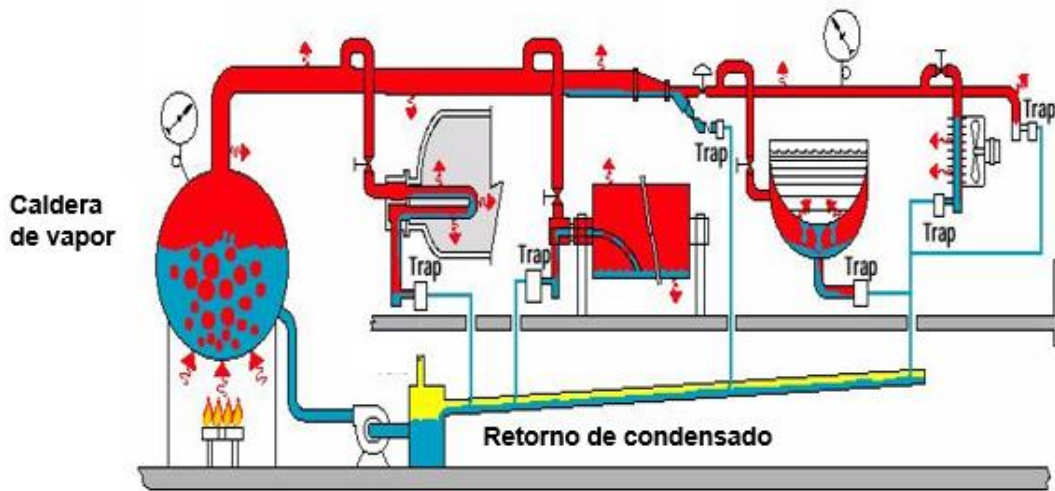
b. Algunas de las propiedades más comunes en los fluidos térmicos con la que se mencionan a continuación:

1. Tener una buena estabilidad que permite largos periodos de servicio con una funcionalidad estable.
2. Debe poseer buenas propiedades de transferencia de calor.
3. Deben ser resistentes a la oxidación, donde la oxidación se produce con la temperatura, esto produce aumento en la viscosidad y una pérdida de eficiencia en la transferencia térmica.
4. Baja viscosidad en todos los rangos de trabajo, en especial en las arrancadas evitando picos de consumo eléctrico elevados.
5. Baja temperatura de solidificación que permita paradas prolongadas seguras.
6. Baja corrosión a los elementos que forman parte del sistema.
7. El coeficiente de transferencia, necesita un alto coeficiente de transferencia, a mayor coeficiente, mayor eficacia.

## 2.5 Circuito de transferencia con vapor.

El vapor conocido por sus aplicaciones en calentamiento de trabajo de manera de fuente directa e indirecta de calor, es conocido como uno de los medios de transmisión energética calorífica mayor en la industria. Y está compuesta al igual que una red de distribución de un fluido por tubería y accesorios para tubería. la **Figura 2-15**, muestra un sistema típico de vapor.

**Figura 2-15:** Sistema típico de vapor.



Fuente: [15]

Este circuito de calentamiento por vapor es uno de los más típicos en la industria para obtener calefacción por su sencilla instalación.

### 2.5.1 Tipos de vapor.

El proceso para generar vapor es el mismo, tanto como en un recipiente metálico montado en una estufa, un generador de vapor industrial, sin embargo, no todo el vapor generado es igual, y las propiedades del mismo varían según las variables como son la presión y la temperatura a la que está sometido. En los sistemas de generadores de vapor se encuentran tres tipos principales como son vapor húmedo, vapor saturado, vapor sobrecalentado.

#### 1. Vapor húmedo.

Es la forma más común de vapor que se puede experimentar en plantas, ya que cuando el vapor se genera dentro de una caldera, generalmente contiene humedad proveniente de las partículas de agua que no se vaporizan y son arrastradas hacia la línea de distribución, lo cual, en algunos procesos puede ser perjudicial y deben ser eliminadas o separadas de la línea principal de vapor.

#### 2. Vapor saturado.

Este tipo de vapor se presenta en ambientes donde la presión y la temperatura en las cuales el vapor (gas) y el agua (líquido) pueden coexistir juntos. Esto se da cuando el rango de vaporización del agua es igual al rango de condensación.

### **3. Vapor sobrecalentado.**

Este vapor es el producto del sobrecalentamiento del vapor saturado para alcanzar un punto mayor al de saturación. Esto quiere decir que es un vapor que contiene una temperatura mucho más alta que la del vapor saturado y menor densidad en una misma presión de trabajo. [16].

## **2.5.2 Ventajas de los sistemas térmicos para vapor.**

Estos sistemas térmicos con vapor representan economía en su funcionalidad y menor coste de inversión, como son un bajo consumo eléctrico [14].

## **2.5.3 Desventajas de los sistemas térmicos para vapor.**

Una de las desventajas que resalta este circuito es que representa una vida útil corta, y presentan mayor complejidad a las actualizaciones en el sistema, requiere tratamiento al agua para reducir la corrosión, su eficiencia es menor comparada con el sistema térmico con aceite [14].

## **2.5.4 Componentes de un sistema térmico para vapor.**

A continuación, se van a describir los componentes que conforman un sistema de vapor:

### **1. Tanque de agua.**

Es el que almacena y alimenta el circuito de agua de la caldera, para completar el nivel adecuado de trabajo.

### **2. Bombas de alimentación.**

Los equipos encargados de suministrar el agua a la caldera para completar el nivel de trabajo de la misma.

### **3. Línea de retorno de condensado.**

Son líneas del circuito que hacen que regrese el vapor que se convirtió en condensado al tanque de alimentación de agua para luego ser suministrado de nuevo a la caldera.

#### 4. Trampas.

Son las que permiten evacuar condensados formados en el circuito de vapor. El condensado se forma en los puntos más bajos del circuito, por lo que es necesario proceder a su evacuación.

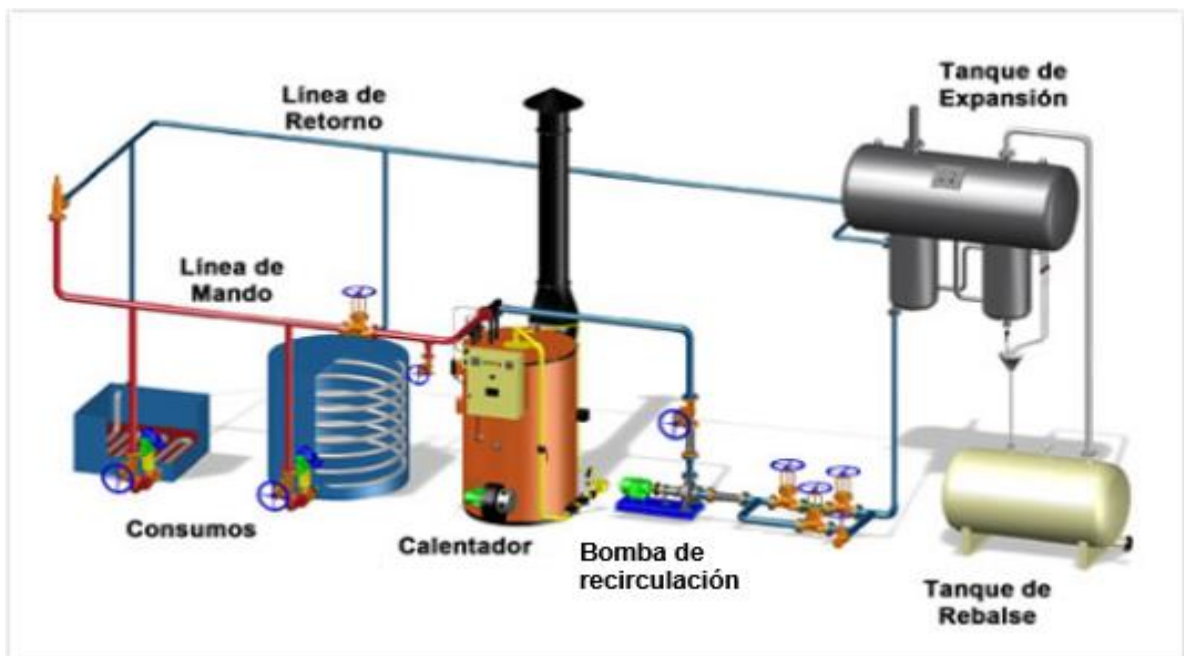
#### 5 Válvulas de seguridad del sistema.

Tiene como objetivo evitar que la presión de la caldera sobrepase la presión normal de trabajo, y de paso proteger a la caldera de presiones excesivas.

## 2.6 Circuito de transferencia con aceite térmico.

Este circuito de transferencia de calor está conformado por el portador de calor que fluye desde la caldera hasta el consumidor de calor y retorna de nuevo a la caldera, es un circuito cerrado donde una bomba centrífuga es la que genera presión para la circulación del aceite en todo el sistema. La **Figura 2-16**, muestra cómo está compuesto un circuito térmico por aceite.

**Figura 2-16:** Circuito de calentamiento por aceite térmico.



Fuente: [16].

Este es uno de los sistemas térmicos más eficiente y económicos en la industria. Ya que ofrecen temperaturas de trabajo de 350 °C a muy baja presión. Está diseñado para obtener una alta velocidad de recirculación y un gran poder de intercambio calorífico, y una larga duración.

### **2.6.1 Ventajas de los sistemas para aceite térmico.**

Las superficies de intercambio térmico en el intercambiador de calor son reducidas, con ligeras diferencias de temperatura, por lo que este equipo resulta más sencillo y económico.

El coste de tuberías y accesorios también resultan más económicos por la reducción de diámetro de la red. No existen condensaciones, por lo que la red se simplifica al no ser necesario purgas ni redes de retornos de condensado. A nivel de seguridad en el sistema es menos exigente que en el caso del vapor [18].

### **2.6.2 Desventajas de los sistemas para aceite térmico.**

Como son sistemas que tienen circulación de fluido a altas temperaturas en las tuberías, lo cual representa hacer un aislamiento mucho mayor que el utilizado en el sistema de vapor. Tratar de evitar fugas en el sistema ya que se representa riesgos de quemaduras de alto grado, también tener en cuenta en estos sistemas es necesario el cambio del aceite en un tiempo determinado [19].

### **2.6.3 Componentes de un sistema para aceite térmico.**

Este sistema térmico lo componen los siguientes equipos:

#### **1. Calentador.**

También conocido en la industria como calderas de aceite térmico, este componente se encarga de elevar la temperatura del fluido térmico a través de la combustión generada en el hogar de la misma [19].

#### **2. Tanque para aceite térmico.**



Componente fundamental en un sistema de aceite térmico que tiene como objetivo las siguientes funciones:

- a. Absorber la expansión del fluido térmico al aumentar la temperatura en el sistema.
- b. Desairar el aceite con propósito de evitar al máximo la corrosión en el sistema.
- c. Garantiza que el aceite más frío del sistema sea el que entre en contacto con el ambiente dentro del tanque de expansión y así evitar que capture oxígeno.

### **3. Zona de intercambio de calor.**

El intercambiador está ubicado en la parte inferior del tanque, y su misión consiste en hacer que el aceite más frío vaya a la sección de expansión del tanque, con finalidad de hacer que el aceite no vuelva a capturar oxígeno [19].

### **4. Cámara de expansión.**

Es el espacio donde se da el aumento de volumen de aceite térmico por su calentamiento al que se eleva a diferentes temperaturas.

### **5. Bomba de recirculación.**

Tiene la misión de hacer que el aceite térmico recircule por el sistema desde la caldera hasta el punto más alejado de la caldera, esta bomba debe ser dimensionado para cumplir con la satisfacción del fluido mínimo de aceite requerido por usuarios y el calentador con una presión suficiente para vencer las pérdidas de todo el sistema [19].

### **3. Metodología.**

Se va a llevar a cabo esta propuesta de diseño de un sistema de transferencia de calor con aceite térmico para grabación por rodillo con la metodología descrita a continuación:

1. Determinación de los parámetros de funcionamiento del sistema actual en cuanto a índices de producción, tiempo de funcionamiento, velocidades de grabación.
2. Toma de datos durante una semana y posterior análisis termo mecánico de los rodillos de grabación tomando como base los valores de las variables como flujo, presión, temperatura del vapor de trabajo, velocidad de grabación.
3. Relacionar los resultados hallados anteriormente con las variables económicas que delimitan la operación como costos de energía eléctrica, costos de producción de vapor, costos de las pérdidas, costos de combustible y demás.
4. Teniendo en cuenta los parámetros de funcionamiento del proceso de grabación se determinan los parámetros de funcionamiento del sistema funcionando con aceite térmico en cuanto a índices de producción, tiempo de funcionamiento, velocidades de grabación.
5. Con los parámetros se procede a diseñar el sistema de rodillo caliente para el sistema de grabación para uso con aceite térmico y su correspondiente sistema de circulación teniendo en cuenta los aspectos mecánicos y térmicos correspondientes.
6. Análisis termo mecánico de los rodillos de grabación con aceite térmico tomando como base los valores de las variables como flujo, presión, temperatura del aceite térmico, velocidad de grabación.

7. Relacionar los resultados hallados anteriormente con las variables económicas que delimitan la operación como costos de energía eléctrica, costos de producción de aceite térmico, costos de las pérdidas, costos de combustible y demás.

8. Con los datos de los análisis anteriores se hace un análisis comparativo de los sistemas de vapor y de aceite térmico en aspectos energéticos, económicos y ambientales.

9. Estructuración técnico económica del proyecto de mejora mediante la instalación del sistema de rodillos de grabación con aceite térmico para la empresa PROQUINAL y determinación del TIR del caso de negocio. Esta incluye la determinación de equipos y anexos a adquirir e instalar.

## **4.Descripción del sistema térmico de vapor y sistema térmico de aceite.**

Para la descripción de estos dos sistemas, iniciamos dando a conocer primero el sistema térmico de vapor que actualmente está trabajando, donde se describe aspectos de funcionalidad del sistema con valores de variables y parámetros de trabajo.

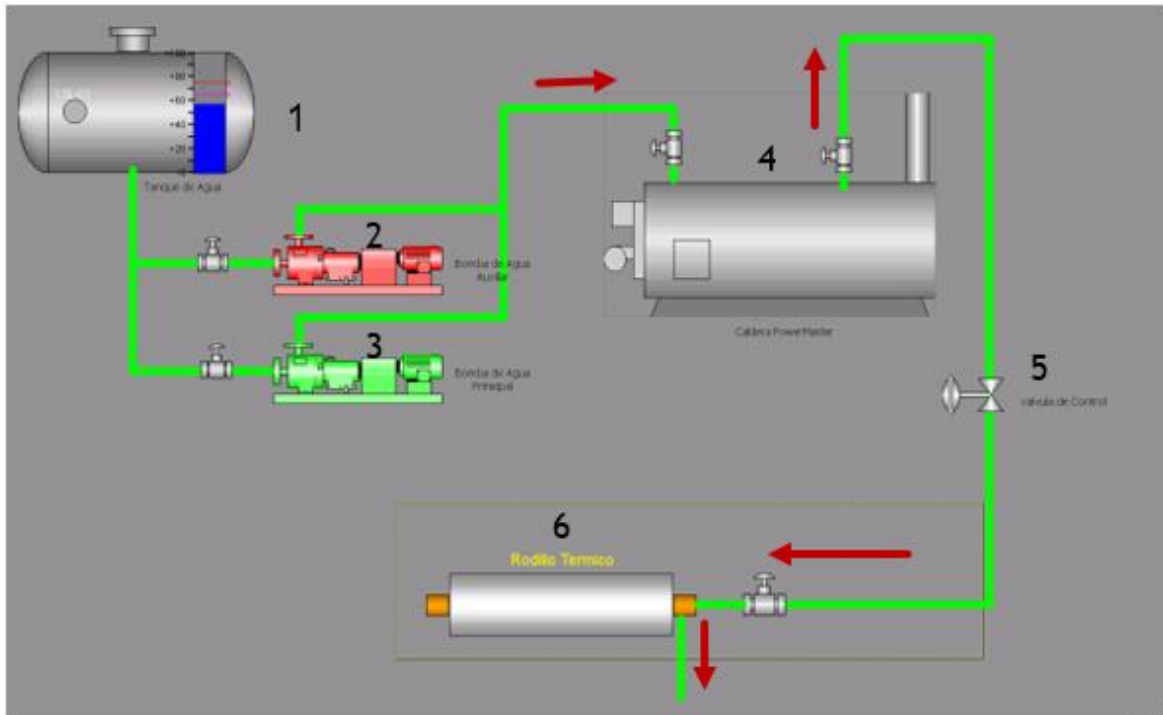
Luego se da a conocer el sistema térmico con aceite, con valores de trabajo de este sistema como son eficiencia de caldera, capacidad térmica utilizada, valores termodinámicos del circuito.

### **4.1 Sistema térmico de vapor de PROQUINAL S.A.S.**

El sistema térmico de vapor lo compone inicialmente una caldera que genera vapor a cierta temperatura y lo suministra al circuito donde está alimentando el rodillo térmico del sistema de grabar como lo muestra la **Figura 4-1**.

Una de las principales características de este sistema térmico es que no hace retorno del vapor a la caldera por la distancia que hay entre la caldera y los rodillo térmicos, por este motivo no se recupera el retorno de este fluido térmico.

**Figura 4-1:** Circuito térmico de vapor Actual.



Fuente: [6].

#### 4.1.1 Funcionamiento del Sistema térmico de vapor actual en el sistema de grabación.

En este sistema térmico de vapor actualmente están funcionando tres máquinas donde cada una tiene un rodillo de vapor, el cual es de gran importancia para los conjuntos de grabar para ejecutar el proceso de grabado en el material.

El sistema de vapor en este proceso de grabado es el principal componente de la máquina ya que es la fuente térmica en el proceso para transmitir el vapor a través del rodillo térmico de vapor el cual se le controla su temperatura mediante una válvula de control y un mando de transductor (IP), el cual es fundamental para el control de registro de magnitudes como la de la presión. La **Figura 4-2**, y **Figura 4-3**, donde se controla la temperatura por este conjunto de transductores.

**Figura 4-2:** válvula de control.



Fuente: [7]

La **Figura 4-3** muestra el control IP de la válvula de control, es ahí donde se programa la temperatura a la que debe estar el rodillo de vapor, esta temperatura está definida por la hoja guía de trabajo para cada referencia de material que se desea grabar.

**Figura 4-3:** Transductor de presión neumática.



Fuente: [7]

### 4.1.2 Funcionamiento de la caldera de vapor.

El funcionamiento de este circuito térmico al día de hoy, tiene ciertas condiciones de trabajo que se deben conocer, como lo principal es que la caldera debe estar con su nivel de llenado hasta donde lo indique el visor de nivel máximo de agua ya que, si no presenta esta condición, el control de nivel del *McDonnell* impedirá que se envíe la señal de encendido al quemador de la caldera y de este modo comunica otra señal a prender la bomba de alimentación de agua para completar su nivel requerido por el *McDonnell* de la caldera. Esta operación debe realizarse hasta alcanzar su nivel de agua establecido. Una vez que se haya completado el nivel de agua dentro de la caldera, el control de nivel comunica una señal a la bomba de alimentación de agua para que se apague. Completando esta condición de nivel de agua otro circuito de mando le indica al quemador que se encienda automáticamente.

El quemador tiene una condición manejado por una fotocelda la cual indica una señal cuando no exista llama en su electrodo, para de inmediato ordena el cierre de la alimentación de combustible y al ventilador del quemador indicando la suspensión de este proceso. De nuevo que se logre encender el quemador, la caldera debe entrar de nuevo al proceso de elevar la temperatura del agua hasta que se llegue a la temperatura de ebullición y por ende elevar la presión en el interior de la caldera.

Esta presión alcanzada, es más que la presión de operación de la caldera cuando se llega a esta presión de trabajo el control de presión de la caldera que envía la señal de apagar automáticamente el quemador cuando esta llega a su valor preestablecido bajo las condiciones de trabajo.

Este equipo de control permite establecer un rango de presión establecida sobre y por debajo del valor de operación de la caldera, por lo que indica que cuando la caldera se encuentre generando vapor de una manera continua esta se encuentra en estado estable de trabajo, esta presión se encontrara variando entre el valor máximo **689,476 kPa**, y el mínimo de **517,107 kPa** que se haya establecido en el controlador de presión para lo cual está enviando una señal automáticamente de encender el quemador cuando la presión es la mínima y apagar cuando la presión sea la máxima.

En caso de que se presente una falla dada por el controlador de presión, la caldera cuenta con unas válvulas de seguridad que están calibradas a la presión de diseño establecida en la operación de la caldera las cuales se activan cuando la presión se ha sobrepasado.

Una vez cuando la caldera se encuentre generando vapor, de una forma continua o no, es necesario completar el nivel de agua que se está consumiendo y es aquí cuando entra en operación por segunda vez el dispositivo que lleva el control de nivel de agua dentro de la caldera. Si se presenta un bajo nivel de agua de manera moderada, se apaga el circuito que energiza la bomba que alimenta la caldera para reponer el nivel.

Durante este proceso el quemador no se encuentra des energizado esto nos indica que si se encontraba encendido cuando se prendió la bomba de alimentación y se mantendrá encendido para completar el nivel del agua dentro de caldera.

Proceso contrario se presenta cuando el nivel del agua se baja a un límite mínimo preestablecido en la caldera, ya que en este caso no solo se encenderá la bomba de suministro de agua, sino que también se apaga el quemador de la caldera.

El proceso descrito lo realiza el funcionamiento de la caldera durante el tiempo que se encuentre en operación hasta ser apagada. En la **Figura 4-4** se muestra la caldera de vapor que conforman este circuito térmico en PROQUINAL S.A.S.



**Figura 4-4:** Caldera de vapor

Fuente: [7]

### 4.1.3 Características de la caldera del sistema de vapor.

La **Tabla 4-1**, nos indica las características de la caldera de vapor que forma el circuito térmico de vapor de PROQUINAL S.A.S.

**Tabla 4-1:** Características de la caldera de vapor.

Capacidad de la caldera BHP		100
Modelo de caldera		C3-100
BTU por hora	x 1000	3.347
"Heat Release" en hogar de combustión BTU/PIES <sup>3</sup> HR.	x- 1000	137
Vapor a 212 °F	lb/h	3.440
Consumo de gas (1000 BTUxPIES <sup>3</sup> )	pie <sup>3</sup>	4.191
Volumen de combustión	pie <sup>3</sup>	29.67
Contenido de agua llena	lb	7.450
Contenido de agua a nivel normal	lb	5.550
Peso de caldera llena	lb	16.550
Peso neto	lb	9.100

Fuente: [7]

#### 4.1.4 Funcionamiento del rodillo térmico de vapor en el sistema de grabación.

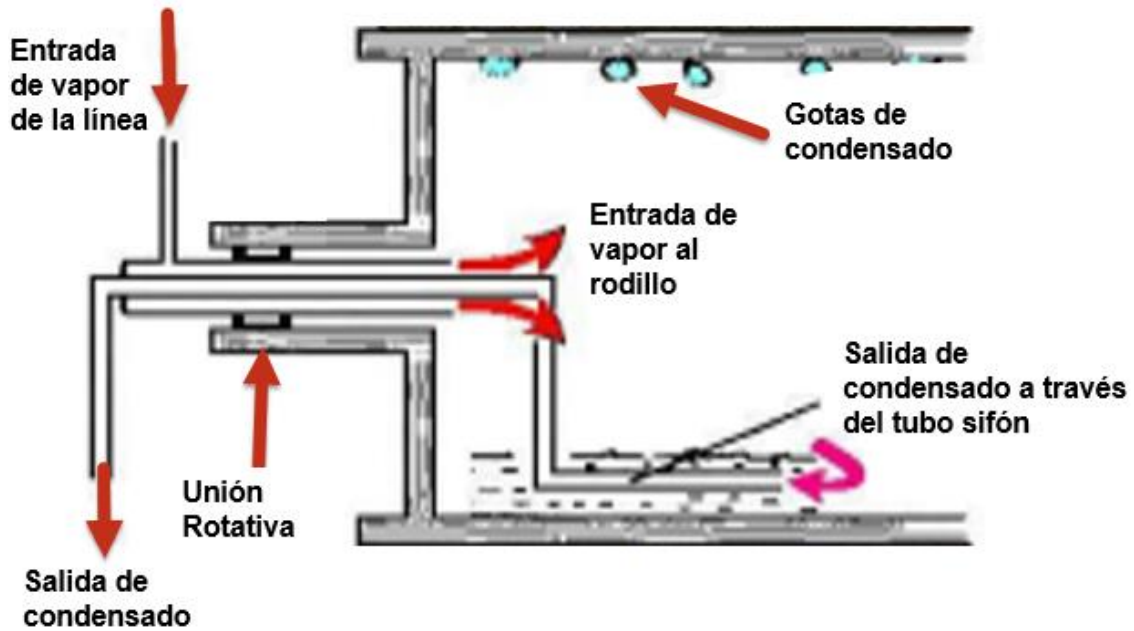
Actualmente este rodillo térmico de vapor está conectado al circuito térmico de vapor, donde su principal función es transferir esa energía térmica suministrada por el vapor y ser transferida por conducción al material para generarle un ablandamiento en la superficie y ser grabada por el conjunto de grabar, trabajando con las siguientes variables de operación como es velocidad y temperatura.

Cuando se programa el rodillo de vapor a temperaturas entre **90 °C – 120 °C**, su velocidad de trabajo es de **9 m/min – 16m/min**. O cuando se requiere temperaturas más altas como son **120°C – 150 °C** su velocidad es de **3 m/min – 6 m/min**. Estos parámetros de trabajo ya están definidos en la guía de producción de la máquina para cada referencia de material a grabar.

Estos parámetros indican que, a mayor temperatura, menor velocidad ya que se requiere que el grabado sea profundo por lo tanto requiere más temperatura para que se ablande en su totalidad y grabarlo a menor velocidad. El caso contrario pasa cuando está a menor temperatura programada nos indica que el grabado del material es superficial por lo tanto no se requieren temperaturas altas y se puede trabajar a mayor velocidad la máquina.

La variable principal a controlar en este rodillo es su temperatura la cual se controla con un sistema conformado inicialmente por una válvula de control que permite graduar el paso de vapor según la temperatura programada en el rodillo.

La **Figura 4-5**, ilustra el funcionamiento de este rodillo térmico para vapor con tubo sifón, este es el sistema de flujo que tiene los rodillos térmicos de vapor en PROQUINAL S.A.S.

**Figura 4-5:** rodillo térmico de vapor de PROQUINAL S.A.S.

Fuente: [19]

Este tipo de rodillo se utiliza para un control de temperatura básico, en donde es posible utilizar tubo de sifón con boquilla, para que la entrada y retorno del fluido sea solo por un extremo del rodillo lo que lleva solo a utilizar una sola unión rotativa.

#### 4.1.5 Características del rodillo de vapor.

Las características técnicas del rodillo de vapor se muestran en la **Tabla 4-2**.

**Tabla 4-2:** Características técnicas del rodillo de vapor.

Características del rodillo térmico de vapor	Cantidad	Unidades
Volumen	887	L
Temperatura máxima	473,15	K
Presión máxima de trabajo	1620,27	kPa
Diámetro exterior	0,8	m
Longitud	2	m

Fuente: [7]

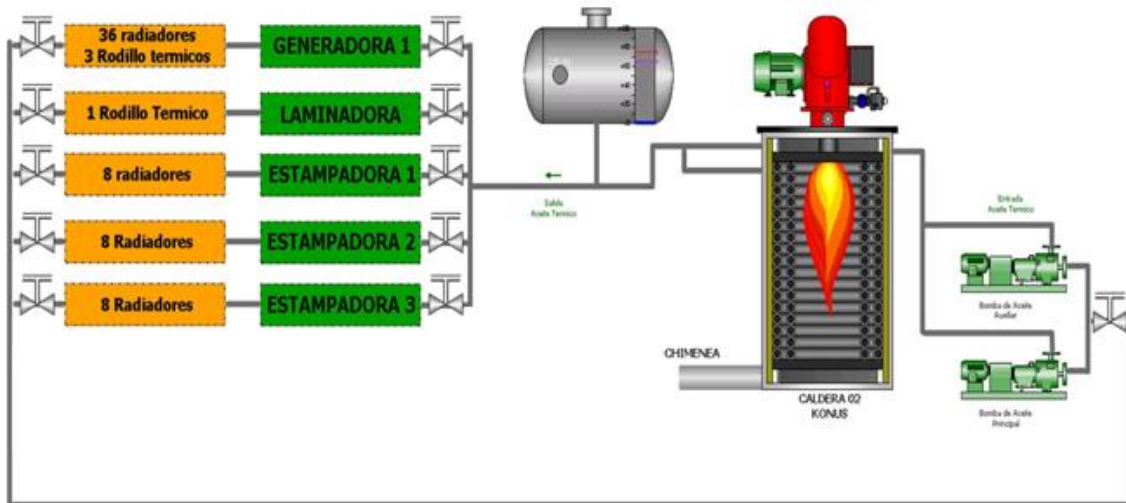
Estas son las características principales de este rodillo en el sistema térmico de vapor.

## 4.2 Sistema de aceite térmico de PROQUINAL S.A.S.

Este sistema con aceite térmico, lo compone una caldera vertical conocida con el nombre de KONUS, donde cuenta una capacidad térmica de **2907 kW** definida por placa de fabricación.

Este sistema térmico está alimentando en la actualidad 5 procesos a diferentes máquinas las cuales cuentan con diversos dispositivos térmicos como son rodillos térmicos e intercambiadores de calor los cuales suman una cantidad de 64 dispositivos térmicos, a continuación la **Figura 4-6**, se muestra el diseño del sistema térmico de aceite con sus derivaciones de suministro a cada máquina.

**Figura 4-6:** Sistema térmico de vapor.



Fuente: [7]

Este sistema térmico con aceite cuenta con una cantidad de aceite en todo el sistema de **119.82 m<sup>3</sup>**, el cual lo recircula bombas centrífugas de la caldera a las máquinas.

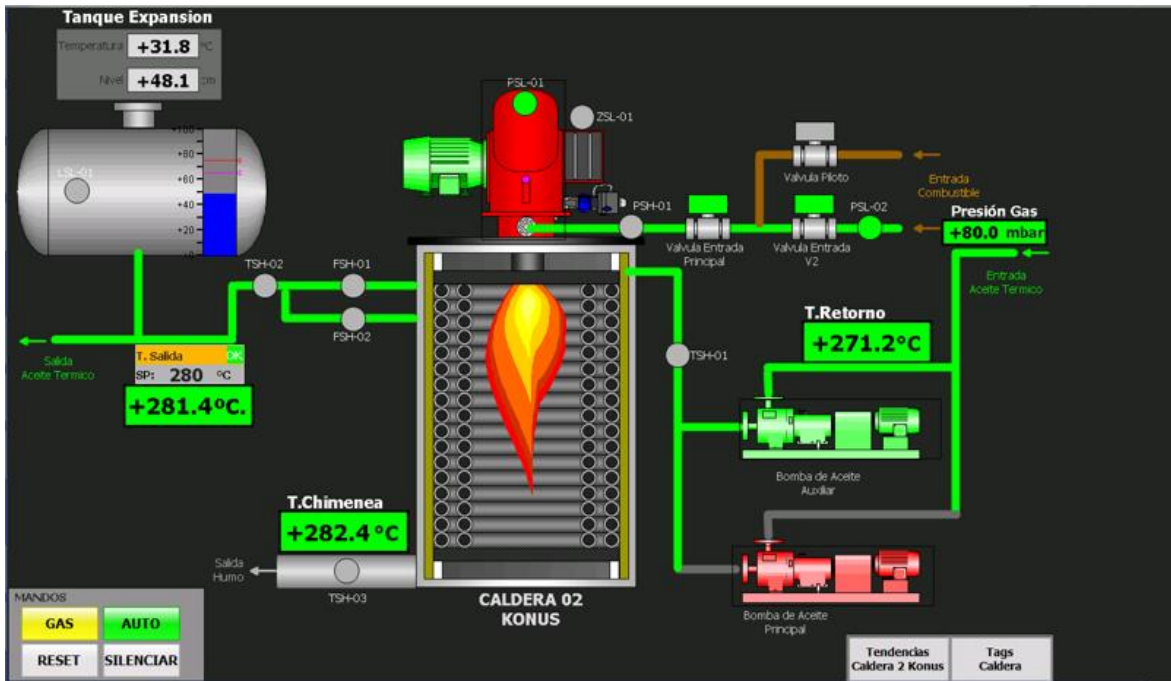
### 4.2.1 Funcionamiento del sistema de aceite térmico.

Este sistema térmico funciona actualmente con un aceite térmico Mobiltherm 605, definido como un aceite mineral ya que brinda una estabilidad térmica estable, sugerido para uso en sistemas cerrados de transferencia de calor. Este sistema térmico de aceite está compuesto principalmente por una caldera con su respectivo quemador, un conjunto de bombas para la recirculación del aceite en todo el circuito, un tanque de expansión con

una capacidad de 2.32 m<sup>3</sup>, y 5 procesos que están conectados a este sistema térmico, la **Figura 4-7**, muestra la caldera en funcionamiento de este sistema con sus respectivas variables de temperatura de salida y retorno a la caldera.

El funcionamiento de la caldera de este sistema térmico está dado a partir de las condiciones de trabajo y demanda de energía térmica que requieran las máquinas para cumplir con las condiciones de trabajo en la producción

**Figura 4-7:** Mímico de la caldera de Aceite Térmico.



Fuente: [7]

En la

**Figura 4-8** se muestra la imagen de cómo está esta caldera en las instalaciones en PROQUINAL S.A.S.

**Figura 4-8:** Caldera de aceite térmico.



Fuente: [7]

La del fluido térmico en el sistema, estas bombas cuenta con un caudal de circulación de  $125 \text{ m}^3/\text{h}$ .

**Figura 4-9**, muestra el conjunto de bombas encargadas de la recirculación del fluido térmico en el sistema, estas bombas cuenta con un caudal de circulación de  $125 \text{ m}^3/\text{h}$ .

**Figura 4-9:** Bombas de recirculación de aceite.

Fuente: [7]

La figura anterior muestra las bombas de recirculación de aceite de la caldera, son dos porque una es la bomba principal que va estar en servicio y la otra es la bomba de respaldo por si presentan fallas y no deje la caldera fuera de servicio.

#### 4.2.2 Características de la caldera de aceite térmico.

Las características principales de esta caldera se muestran en la **Tabla 4-3**, donde se mencionan los datos técnicos del fabricante de la caldera.

**Tabla 4-3:** Descripción de la placa de la caldera KONUS.

Item	Descripción	Cantidad	Unidades
1	Caldera KONUS KV AÑO 1979		kW
2	Capacidad de Placa	2907	kW
3	Capacida a la altura de 2680 m sobre el nivel del mar.	2152	kW
4	Volumen de Aceite	274	m <sup>3</sup>
5	Presion de Diseño	1000	kPa
6	Flujo Volumetrico	237	m <sup>3</sup> /h

Fuente: [7].

De lo anterior visto en la descripción de la **Tabla 4-3**, se deduce que la potencia de la caldera estará afectada por un 26% menos por la topografía colombiana.

Este porcentaje del 26% que reduce la potencia de la caldera se obtiene a partir de la deducción del valor total de la capacidad de placa sobre la capacidad a la altura de 2680 m sobre el nivel del mar, obteniendo un valor del 74 % de la totalidad de la potencia disponible para trabajar a estas condiciones de altura donde se encuentra la caldera.

## 5. Cálculos de los sistemas térmicos de PROQUINAL S.A.S.

### 5.1 Cálculos del sistema del vapor existente en PROQUINAL S.A.S.

Para el cálculo de la capacidad de la caldera tenemos que **1 BTU/h = 0,0002907kW**.

De acuerdo con las características observadas en la **Tabla 4-1**, de esta caldera cuenta con una capacidad térmica de **981,055 kW = 3531799 kJ/h**.

#### 5.1.1 Cálculos de balance de energía en la caldera de vapor.

Para los cálculos del balance de energía de la caldera, se tiene una fuente de calor entrante o calor aportado de **37259,30 kJ/m<sup>3</sup>**. Lo que nos indica el calor de combustión.

$$Q_{comb} = PCI = 37259,30 \text{ kJ/m}^3$$

Entonces tenemos que el calor de entrada o aportado por el combustible es el siguiente.

$$Q_{entrada} = 37259,30 \text{ kJ/m}^3$$

Para calcular la energía de transferencia de la caldera, tenemos que hallar el flujo másico de vapor obtenido por la ecuación (5-1).

$$\dot{m}_{vapor} = \frac{P_c}{cp*(T_{sa}-T_1)+h_{fg}} \quad (5-1)$$

Donde,

$\dot{m}_{vapor}$  = Flujo másico de vapor [kg/h]

$P_c$  = Potencia de la caldera [kJ/h]



$c_p$ =Calor específico del Agua [kJ/kg K]

$T_{sa}$ = Temperatura de Saturación a la Presión de Trabajo tomada en la caldera [438,15 K]

$T_1$ =Temperatura de entrada de Agua tomada en la caldera [297,15 K]

$h_{fg}$ = Entalpía de evaporación tomada en tablas del anexo A. a una presión de 700.93 kPa [kJ/kg]

$$\dot{m}_{vapor} = \frac{3531799,46}{4,18 * (438,15 - 297,15) + 2065,6} = \mathbf{1329,94 \text{ kg/h}}$$

Ahora pasamos a calcular la energía de transferencia con la ecuación (5-2).

$$Q_{vapor} = \dot{m}_{vapor}(H - h) \quad (5-2)$$

Donde.

$Q$ = Energía de transferencia [kW]

$\dot{m}_{vapor}$ = Flujo másico del vapor [kg/h]

$H$ = Entalpía de vapor Saturado [kJ/kg]

$h$ = Entalpía de líquido Saturado [kJ/kg]

$$Q = (1329,94)(2762,8 - 104,83) = \mathbf{3534942,11 \text{ kJ/h} = 774,02 [kW]}$$

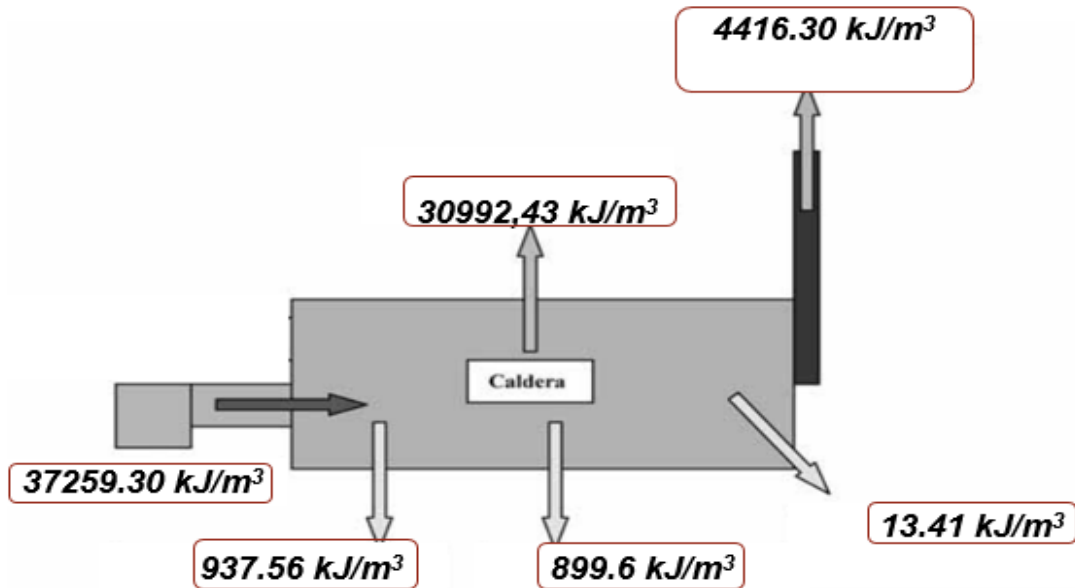
Encontrado el calor de entrada y teniendo en cuenta las fórmulas del balance de energía el balance de la caldera queda como lo muestra la **Tabla 5-1**.

**Tabla 5-1:** Balance de energía de la caldera de vapor.

$Q_{entrada} [kJ/m^3]$ .		$Q_{salida} [kJ/m^3]$		%
$Q_{co}$	37259,30	$Q_h$	4416,30	11,85
		$Q_{ig}$	13,41	0,036
		$Q_p$	899,6	2,414
		$Q_r$	937,56	2,52
		$Q_{vapor}$	30992,43	83,18
<b>TOTAL</b>	<b>37259,30</b>	<b>Total</b>	<b>37259,30</b>	<b>100,00</b>

Fuente: Propia.

**Figura 5-1:** Esquema del balance de energía en la caldera de vapor.



Fuente: Propia

### 5.1.2 Cálculos de rendimiento de la caldera de vapor.

Para el cálculo del rendimiento de la caldera de vapor, se obtiene a partir de la **ecuación (2.10)**, por el método indirecto.

$$\eta = \frac{1329,94 * (2762,8 - 2357,7)}{18,04 * 37259,30} * 100 = 80\%$$

### 5.1.3 Circuito termo mecánico del sistema de vapor.

En este sistema térmico de vapor lo conforman 2 principales circuitos, los cuales hacen que la caldera genera vapor en su ciclo de trabajo como son el:

### 5.1.4 Circuito de agua.

El circuito de agua de la caldera de vapor consta de los siguientes sistemas.

1. Un sistema de alimentación de agua con una bomba principal y una auxiliar de alimentación para mantener el nivel mínimo de agua requerido para el funcionamiento.

También se lleva un control de tratamiento para el agua, para retirar los lodos, controlar la dureza y la mineralización del agua.

2. Tanque o depósito para el almacenamiento del agua de consumo inmediato.

De lo anterior el flujo volumétrico de este circuito hacia la caldera es de **1,34 m<sup>3</sup>/h** de agua que ingresa a la caldera, volumen obtenido por contador de agua que está instalado en la línea de alimentación de agua al tanque de la caldera. A partir de lo anterior se calcula el flujo másico de agua que está ingresando a la caldera de vapor, con la ecuación (5-3).

$$\dot{m}_{agua} = \rho * Q \quad (5-3)$$

Donde.

$\dot{m}_{agua}$  = Flujo másico de agua [ kg/h]

$\rho$  = densidad del agua [997 kg/m<sup>3</sup>]

$Q$  = Flujo volumétrico [ 1,3 m<sup>3</sup>/h]

$$\dot{m} = (997) (1,34) = [1335,98 \text{ kg/h}]$$

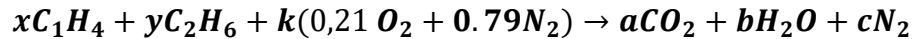
### 5.1.5 Circuito de combustión.

El circuito de combustión se da por una relación entre aire – combustible que es ingresado a la cámara de combustión por medio de un quemador de combustible el cual cuenta con los siguientes componentes.

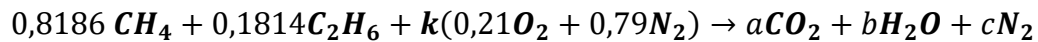
1. Quemador de combustible.
2. Tren de válvulas para el control del combustible al ingreso del quemador.
3. Válvulas de paso que permiten la regulación o corte del combustible.
4. Manómetro de presión en la entrada al quemador de combustible, para tener el control de la presión del combustible.

### 5.1.6 Cálculos termodinámicos del sistema de vapor.

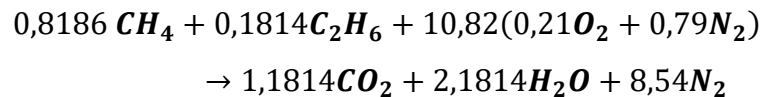
Para los cálculos del combustible que es Gas Natural, se parte de la ficha técnica de Vanti<sup>1</sup> que especifica las fracciones molares de los componentes de la siguiente manera,  $C_1H_4$  con 81,86%, y  $C_2H_6$  con un 18,14%. El planteamiento de la reacción de combustión queda de la siguiente manera:



Para realizar este balance de masa se asume que la reacción de combustión es completa dado que todo el carbono e hidrógeno del combustible reacciona con el aire para formar dióxido de carbono y agua. Con lo anterior mencionado se obtuvo la siguiente reacción:



#### a. Reacción estequiometria.



#### b. Relación de Aire – Combustible estequiometria.

La reacción de aire combustible se calculó a partir de la ecuación (2.1), de la siguiente manera.

$$AC = \frac{(10,82)(0,21*32+0,79*28)}{(0,8186)*((12*1)+(4*1))+(0,1814)*((12*2)+(6*1))} = \mathbf{16,83 \text{ kg aire/ kg comb.}}$$

Donde.

$m_a$  = Masa de aire

$m_c$  =Masa de combustible

El resultado indica que por cada kilogramo de metano se requieren **16,83kg** de aire.

<sup>1</sup> Especificación técnica de Vanti (Empresa proveedora del gas natural en PROQUINAL S.A.S.) De marzo 26 de 2021.

En la combustión de la caldera de vapor se determinó que hay un exceso de aire que asegura que todo el combustible se quemé, y ese exceso de aire es medido por un analizador de gases Testo, donde se realizan rutinas de medición de combustión en las calderas para tener soporte para auditorías internas y externas para verificación que la combustión en las calderas sea la adecuada.

Donde el exceso de aire en la combustión de la caldera de vapor es de  $\lambda$ : **1,3** indicado por lectura de análisis en la caldera ver **Anexo H.2**. Análisis que se realizan cada tres meses a las calderas como rutina para soporte de auditorías.

La concentración molar para los diferentes productos de combustión se calcula a partir de la ecuación (5-4).

$$x_i = \frac{\text{Número de moles de la sustancia}}{\text{Número de moles de los productos}} \quad (5-4)$$

Donde.

$x_i$  = Representa la concentración molar de la sustancia.

La **Tabla 5-2**, muestra la concentración molar calculada para cada producto de combustión definidos en el balance energía.

**Tabla 5-2:** Concentración molar del producto de combustión (Base seca).

Componentes	N° Moles	Moles sin H <sub>2</sub> O	Fraccion Molar	% de Fraccion Molar
N <sub>2</sub>	9,77	9,77	0,86	85,93
CO <sub>2</sub>	1	1	0,09	8,80
H <sub>2</sub> O	2			
O <sub>2</sub>	0,6	0,6	0,05	5,28
<b>Total</b>	<b>13,37</b>	<b>11,37</b>	<b>1</b>	<b>100</b>

Fuente: Propia

Teniendo en cuenta la concentración molar de los productos en la combustión el rendimiento de la combustión en la caldera de vapor es de 90,1 %.

### c. Flujo másico del combustible.

Se obtuvo el flujo másico de combustible a partir de la ecuación (5-5), teniendo en cuenta que el flujo volumétrico del gas se obtuvo en el costo global de la **Tabla 5-3**, de la caldera de vapor con un consumo de  $12.85 \text{ m}^3/\text{h}$  y una densidad de  $1,63 \text{ kg/ m}^3$ .

$$\dot{m}_{combustible} = Q_{gas} * \rho_{gas} \quad (5-5)$$

Donde,

$\dot{m}_{combustible}$  = Flujo másico de combustible [kg/h]

$Q_{gas}$  = Caudal de combustible [ $12.89 \text{ m}^3/\text{h}$ ]

$\rho_{gas}$  = Densidad del gas Natural [ $1,63 \text{ kg/ m}^3$ ]

$$\dot{m}_{combustible} = (12,89)(1,63) = 21 \text{ [kg/h]}$$

#### d. Flujo másico de aire.

$$\dot{m}_{aire} = (AC) * (\dot{m}_{combustible}) \quad (5-6)$$

Donde,

$\dot{m}_{aire}$  = Flujo másico de aire [kg/h]

$AC$  = Relación aire-combustible [kg aire / kg combustible]

$\dot{m}_{combustible}$  = Flujo másico de combustible.

$$\dot{m}_{aire} = (16,83)(1,3) * (21) = 459,5 \text{ [kg aire/h]}$$

### 5.1.7 Costo global de operación del sistema térmico de vapor.

Teniendo como base este sistema térmico de vapor se toman valores de consumo para llegar al costo de operación de este sistema, al cual se propone suspender su funcionamiento, la **Tabla 5-3**, muestra un costo global de este sistema.

**Tabla 5-3:** Costos de generación de vapor.

Consumo de Agua			
Valor del m <sup>3</sup>		m <sup>3</sup>	\$ 2.200
Consumo x Agua por Mes	474,63	m <sup>3</sup>	\$ 1.044.179
Consumo de Agua x Año	5695,52	m <sup>3</sup>	\$ 12.530.149
Consumo de Energía			
Valor del kW/h		kW/h	\$ 376
Consumo x Mes	324	kW/h	\$ 121.824
Consumo x Año	3888	kW/h	\$ 1.461.888
Consumo de Gas			
Valor m <sup>3</sup> de Gas		m <sup>3</sup>	\$ 1.066
Consumo por Mes	14553	m <sup>3</sup>	\$ 15.513.942
consumo por Año	174641	m <sup>3</sup>	\$ 186.167.306
Costo por Mto por Año			
Costos de mantenimiento anual			\$ 4.500.000
Costo por Tratamiento de Agua			
Tratamiento del Agua por mes			\$ 1.960.000
<b>Costo Global de Operación Caldera de Vapor</b>			<b>\$ 206.619.343</b>

Fuente: Propia

## 5.2 Cálculos del sistema térmico de aceite.

Para estos cálculos, tomamos el caudal y flujo dado por el fabricante en la ficha técnica de la caldera, donde nos indica un caudal de **237,5 m<sup>3</sup>/h**. Para estos cálculos iniciamos obteniendo como primer paso el flujo másico de aceite que pasa por el serpentín de la caldera.

Tenemos que el flujo másico se obtiene con la ecuación (5-7).

$$\dot{m}_{\text{aceite}} = Q * \rho \quad (5-7)$$

Donde,

$\dot{m}_{\text{aceite}}$  = Flujo másico del aceite térmico (**Mobiltherm 605**)

Q = Flujo volumétrico 237,5 [m<sup>3</sup>/h]

$\rho$  = Densidad del aceite [kg/m<sup>3</sup>] a una temperatura de 553,15 K.

$$\dot{m}_{aceite} = (237.5)(698.8) = 165965[\text{kg/h}]$$

Ahora pasamos a calcular la energía de transferencia con la ecuación (5-8).

$$Q = \dot{m}_{aceite} * cp * \Delta t. \quad (5-8)$$

Donde.

Q= Energía de transferencia [kW]

$\dot{m}_{aceite}$  = Flujo másico del aceite [kg/h]

cp= Calor específico del aceite a 553,15 K Anexo A.2. [kJ/kg °C]

$\Delta t$ = T. salida – T. retorno de la caldera [°C].

$$Q = (165965,35)(2,8)(11) = 5111722\text{kJ/h} = 1421,06[\text{kW}]$$

### 5.2.1 Cálculos del rendimiento de la caldera para aceite térmico. (método indirecto).

Para obtener el rendimiento de la caldera se tiene, de acuerdo a la ecuación (2.10), donde se calcula por el método indirecto.

$$\eta = \frac{165965,35 * (1568,57 - 1540,48)}{154,30 * 37259,30} * 100 = 81\%$$

### 5.2.2 Relación de aire – combustible estequiometria.

En esta reacción se obtiene un parámetro importante que nos establece la cantidad de masa de aire que ingresa a la cámara de combustión por cada unidad de masa de combustible oxidado. La reacción de aire combustible se calculó partiendo de la ecuación (2.1), de la siguiente manera.

$$AC = \frac{(10,82)(0,21*32+0,79*28)}{(0,8186)*((12*1)+(4*1))+(0,1814)*((12*2)+(6*1))} = 16,83 \text{ kg aire / kg comb.}$$

Donde,

$m_a$  = Masa del aire

$m_c$  = Masa del combustible



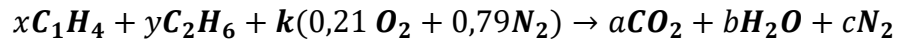
El resultado nos dice que por cada kilogramo de metano se requieren **16,83 kg** de aire.

El porcentaje de aire en la combustión de la caldera es de  $\lambda$ : **1,4**, indicado por lectura de análisis en la caldera de aceite térmico ver **Anexo H.3**. Análisis que se realizan cada tres meses a las calderas como rutina para soporte de auditorías.

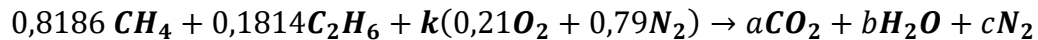
Lo que indica este valor de lambda es que la combustión tiene un exceso de aire del 40%.

### 5.2.3 Cálculos termodinámicos del sistema de aceite térmico.

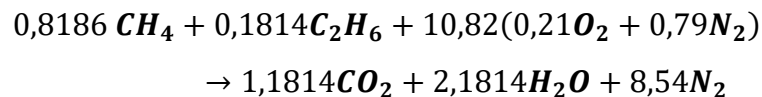
Para los cálculos del combustible que es Gas Natural, se parte de la ficha técnica de Vanti<sup>2</sup> que especifica las fracciones molares de los componentes de la siguiente manera,  $C_1H_4$  con 81,86%, y  $C_2H_6$  con un 18,14%. El planteamiento de la reacción de combustión queda de la siguiente manera:



Para realizar el siguiente paso que es el balance de masa se asume que la reacción de combustión es completa y que todo el carbono e hidrógeno del combustible reacciona con el aire para formar dióxido de carbono y agua. Con lo anterior mencionado realizando el balance de masa y se obtuvo la siguiente reacción:



#### a. Reacción estequiometria.



#### b. Flujo másico del combustible.

Dado este circuito también se calcula el flujo másico del combustible, partiendo de la ecuación (5-5).

<sup>2</sup> Especificación técnica de Vanti (Empresa proveedora del gas natural en PROQUINAL S.A.S.) De marzo 26 de 2021.

Donde,

$$\dot{m}_{combustible} = 79,92 \text{ [kg/h]}$$

**c. Flujo másico de aire.**

Para el cálculo del flujo másico del aire se obtiene partiendo de la ecuación (5-6),

$$\dot{m}_{aire} = (16,83)(1,4) * (79,92) = 1883 \text{ [kg aire/h]}$$

**d. Flujo másico del aceite térmico.**

Teniendo en cuenta los cálculos de la caldera de aceite térmico, el flujo másico del aceite obtenido a partir de la Ecuación (5.9).

$$\dot{m}_{aceite} = Q * \rho \tag{5-9}$$

Donde,

$\dot{m}_{aceite}$  = Flujo másico de Aceite [kg/h]

$Q$  = Energía de transferencia [kW]

$\rho$  = Densidad del Aceite a 280 °C tabla **Anexo A.2** [ kg/m<sup>3</sup>]

$$\dot{m}_{aceite} = (237,5)(698,8) = 165965 \text{ [kg/h]}$$

### 5.2.4 Costo global de operación del sistema de aceite térmico.

**Tabla 5-4:** Costo global de generación de energía térmica de la caldera de aceite.

<b>Consumo de Energía</b>			
Valor del kW/h		kW/h	\$ 376
Consumo por día	369,6	kW/h	\$ 138.970
consumo por mes	9240	kW/h	\$ 3.474.240
Consumo x Año	110880	kW/h	<b>\$ 41.690.880</b>
<b>Consumo de Gas</b>			
Valor m <sup>3</sup> de Gas		m <sup>3</sup>	\$ 1.066
Consumo por día	2320	m <sup>3</sup>	\$ 2.473.120
consumo por mes	58000	m <sup>3</sup>	\$ 61.828.000
consumo por Año	582111	m <sup>3</sup>	<b>\$ 620.530.326</b>
<b>Costo por Mtto por Año</b>			
Costos de mantenimiento anual			<b>\$ 4.000.000</b>
<b>Costo global de operación caldera de aceite térmico</b>			<b>\$ 666.221.206</b>

Fuente: Propia

La tabla anterior muestra el costo de operación del sistema térmico de aceite durante por año para 5 sistemas térmicos los cuales que requieren demanda de calor para su proceso de operación. En esta tabla muestra con detalle el costo de cada energía suministrada al circuito térmico con valores actuales del 2021.

## 6. Diseño y ensamble del rodillo térmico para aceite.

Para el diseño del rodillo térmico, se propone en el diseño un rodillo de doble camisa o caso con espiral sellado, donde se acopla una camisa exterior sobre una camisa interior espiralada y envuelta. De esta forma el fluido es forzado a fluir a través del área rectangular generada, el rodillo de doble camisa de espiral con espaciamiento se diseña con un espiral maquinado con varias entradas de fluido, de tal forma que exista una tolerancia nominal entre el diámetro exterior de la espiral y el diámetro interno de la camisa exterior, de esta forma con las dimensiones del rodillo se deduce el coeficiente de transferencia de calor y también se puede calcular la tasa de flujo necesaria para alcanzar el nivel óptimo de transferencia de calor y la uniformidad de temperatura en todo el cuerpo del rodillo.

Este diseño de casco o camisa doble hace que el desempeño del rodillo sea predecible y la uniformidad de temperatura pueda ser controlada.

En muchos casos los rodillos de transferencia de calor deben estar cromados para dar mejor conductividad térmica en la superficie.

### 6.1 Consideraciones de diseño.

Estas variables de diseño son dadas por montaje y espacio en la máquina principal la cual son las principales a tener en cuenta en las dimensiones del nuevo rodillo.

**Tabla 6-1:** Dimensiones para el diseño.

Condiciones de Diseño para el rodillo térmico de aceite	Dimensiones	Unidades
Longitud del cilindro	2	m
Longitud total con espigos	2.63	m
Diámetro exterior del rodillo	0,8	m
Carga transmitida	1500	N
Potencia del sistema de transmisión mecánica	0,8	kW

Fuente: Propia

Teniendo en cuenta la información suministrada por la tabla anterior, el valor de la carga de 1500 Newton, está definida de acuerdo a la tensión transmitida por el sistema de transmisión al rodillo térmico, valor importante para la simulación de mallado para el rodillo

térmico. La información de potencia del sistema de transmisión es de 0.8 kW, la cual se trabaja con la velocidad máxima de trabajo en el rodillo que es de 16m /min. Por lo tanto, la velocidad de giro es de 1.6 rad/s. teniendo en cuenta esta información determinamos el torque que se le aplica al rodillo

$$P = T \times \omega \quad (6-1)$$

De la formula anterior ya conociendo la potencia, hacemos el despeje en la ecuación 6-1, para hallar el valor de la tensión que se está generando en la transmisión.

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{800}{1.6} = \mathbf{500 \text{ Nxm}}$$

Donde,

$$P = 800 \text{ [W]}$$

$$\omega = 1.6 \text{ [rad/s]}$$

$$T = F \times d \quad (6-2)$$

En esta ecuación se desconoce el valor de la fuerza, hacemos el despeje en la ecuación (6-2), y pasamos a calcular el valor de la fuerza en el sistema de transmisión.

Donde,

$$F = \frac{T}{d} \quad (6-3)$$

$$T = 500 \text{ Nxm}$$

$$d = 0.4 \text{ m}$$

$$F = \frac{500}{0.4} = \mathbf{1250 \text{ N}}$$

Estas condiciones de diseño son importantes tenerlas en cuenta a la hora de las dimensiones para el diseño del rodillo, ya que son dimensiones dadas por el espacio

disponible de montaje en la máquina principal, y así seguir conservando la originalidad de la máquina a la hora del cambio del rodillo térmico de vapor por el de aceite, también para realizar el análisis de elementos finitos.

Para este diseño se consideró el código **ASME** sección **VIII división 1**, donde da a conocer las reglas para la construcción y diseño de recipientes a presión a los cuales están los rodillos de transferencia térmica, información que se tuvo en cuenta a la hora del diseño.

Este código del **ASME**, indica los calibres de los materiales a los cuales se le pueden aplicar la condición de trabajo sin tener ninguna falencia de falla ya que cumple con los parámetros a los cuales se van a someter. Este código nos da respaldo si se cumple con los métodos y condiciones nombradas en esta sección VIII división 1.

El acero propuesto para este diseño es un acero **Cold Rolled**, que quiere decir laminado en caliente, este acero **A-36**, producido bajo las especificaciones de la **ASTM 36**, lo compone una aleación de hierro mínimo del 98% y con un contenido de carbono menor del **0.18%** con concentración del 0.02% Cobre y un 0.8 – 0.9% de silicio, que son resistentes a la tracción y fluencia a la soldadura. Este tipo de Acero **A-36**, tiene una densidad o masa por unidad de volumen de 7.85 g/m<sup>3</sup>. Y cuenta con un módulo de elasticidad de 200 GPa. Y también cuenta con módulo de corte o cizallamiento de 79.3 GPa. Este tipo de acero cuenta con ciertas ventajas para la construcción del rodillo ya que cuenta con buena ductilidad y homogeneidad y soldabilidad.

El acero ASTM A-36 es la especificación estándar dada por American Society for Testing and Materials (ASTM) para este tipo de acero.

Para este diseño tenemos que el rodillo térmico nos trabaja con la siguiente información dada en la **Tabla 6-2**, la cual tenemos valores de caudal y flujo másico en el rodillo [21].

**Tabla 6-2:** Variables Térmicas de trabajo.

Aceite Térmico	Equivalencia	unidades
Q=	8,36	m <sup>3</sup> /h
f=	791,6	kg/m <sup>3</sup>
V <sub>esp</sub> =	0,0013	m <sup>3</sup> /kg
m=	6617,78	kg/h

Fuente: Propia

Teniendo como referencia la información de la tabla anterior para el diseño del rodillo térmico, Luego se procede a realizar los cálculos térmicos del Rodillo para determinar la energía de transferencia la cual está dada por la **ecuación (5-8)**, teniendo en cuenta un delta de temperatura de 5 K en el retorno del aceite en el rodillo térmico.

Donde.

$Q$ = Energía de transferencia [kW]

$\dot{m}_{aceite}$  = Flujo másico del aceite tomada en campo. [kg/h]

$cp$ = Calor específico del aceite a 120 °C tabla de **Anexo A.2** [kJ/kg °C].

$\Delta t$ = T. salida – T. retorno [°C].

$$Q = (6617.78)(2.3)(5) = 76104.47kJ/h = \mathbf{21.86[kW]}$$

Energía que va a aportar el rodillo térmico para Aceite, con el diseño propuesto de camisa doble de 12 entradas. Con esta energía entregada por el rodillo térmico, podemos trabajar con las condiciones de trabajo obtenidas por el rodillo de vapor sin tener deficiencias en el sistema de grabación.

## 6.2 Diseño mecánico.

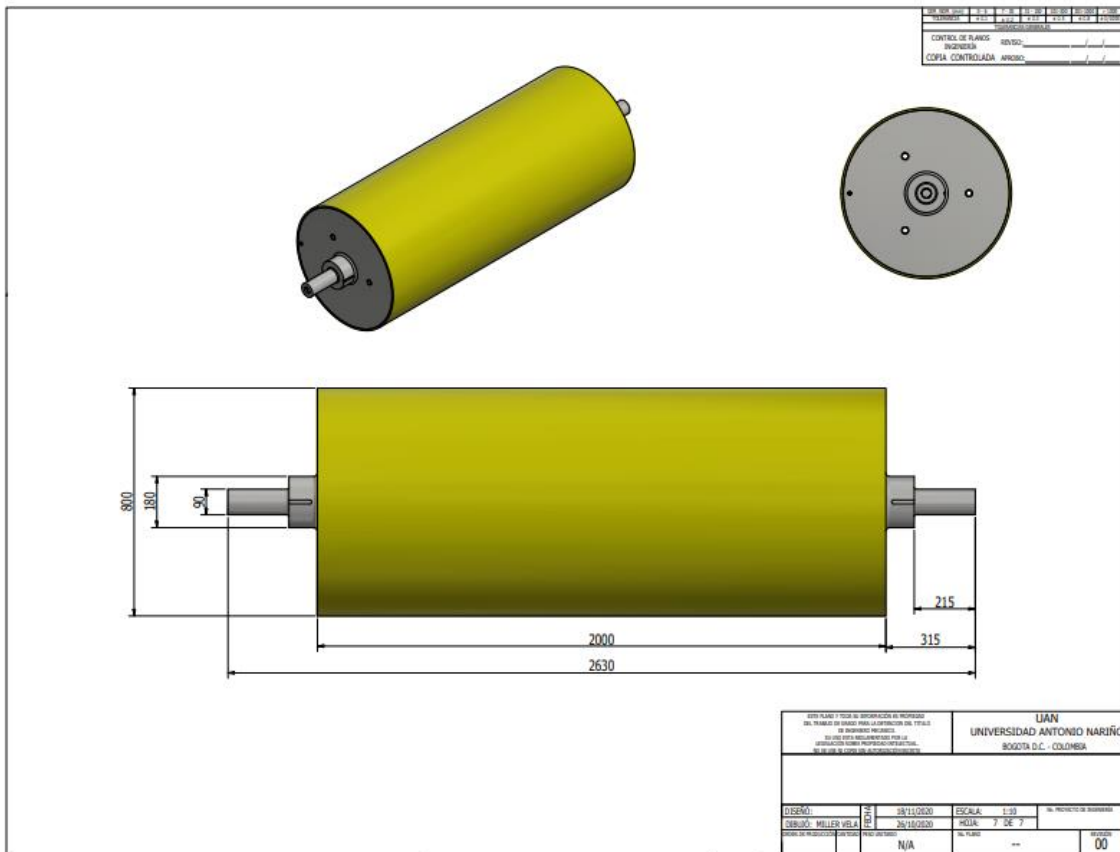
Para el diseño del rodillo térmico se trabajó con el software Autodesk® Inventor® student y se diseñó por partes, con el fin de facilitar el ensamble al fabricante. Teniendo en cuenta las tolerancias de cada pieza de ensamble.

### 6.2.1 Diseño de partes.

Para el diseño de partes, se pueden consultar en el anexo D, ahí encontrará el plano de cada parte del rodillo térmico para aceite con sus respectivas dimensiones.

En la **Figura 6-1**, se encuentra el diseño del rodillo térmico completamente ensamblado con sus dimensiones establecidas.

**Figura 6-1:** Rodillo térmico ensamblado.



Fuente: [21]

Finalmente, la figura anterior muestra el rodillo ensamblado con dimensiones de diseño.

### 6.2.2 Materiales para la fabricación.

Los materiales para la fabricación de este rodillo, es un acero estructural A-36 se produce bajo la especificación ASTM 36, acero A-53 se produce también bajo la especificación de la ASTM donde muestra los tipos de fabricación de tubos de acero soldados y sin costura con material de acero al carbono negro.

La **Tabla 6-3**, indica los tipos de materiales para la fabricación del rodillo para aceite térmico.



**Tabla 6-3:** Información del Material a utilizar.

5	--	TAPON	2	A.C	Ø3/8"	0.031 kg
4	C-RODMIL-014	TUBO DISIPADOR	6	A-53	TB 1" SCH 40 x 230 mm	0.518 kg
3	C-RODMIL-010	PLATO LATERAL	1	A-36	AISI 41/40 Ø800 mm x 350 mm	138.568 kg
2	W-RODMIL-11	INTERCAMBIADOR	1	WA-86	TB Ø734 x 2000; LAM RIG INT 1/2"	372.206 kg
1	W-RODMIL-10	CAMISA EXTERIOR	1	WA-86	TB Ø800 x 2000 mm EJES Ø90 mm4	630.061 kg
ITEM	PLANO / COD	NOMBRE	CANT	MAT	DESCRIPCION	PESO UNIT

Fuente: [21].

La tabla anterior de materiales especifica el nombre de cada pieza y el tipo de acero con el que se va a fabricar, también detalla las dimensiones y peso del material a usar.

### 6.2.3 Simulación mecánica.

Para llevar a cabo el diseño mecánico del rodillo térmico, se trabajó con ayuda del software de diseño Autodesk® Inventor® student para la construcción y análisis estático del diseño, verificando que sea confiable y seguro se realiza la simulación mecánica.

Las condiciones de contorno que se tuvieron en cuenta fueron para un estudio estático, por lo cual en los ejes de los platos laterales se establecieron sujeciones fijas, y en el centro del cilindro se estable una fuerza de **1500 N** que se calculó en la ecuación (6-4). Y el tipo de contacto para la simulación fue rígida debido a que sus componentes están conformando un solo conjunto.

La **Tabla 6-4**, muestra el análisis estático del diseño.

**Tabla 6-4:** Análisis Estático obtenido en Autodesk® Inventor® student.

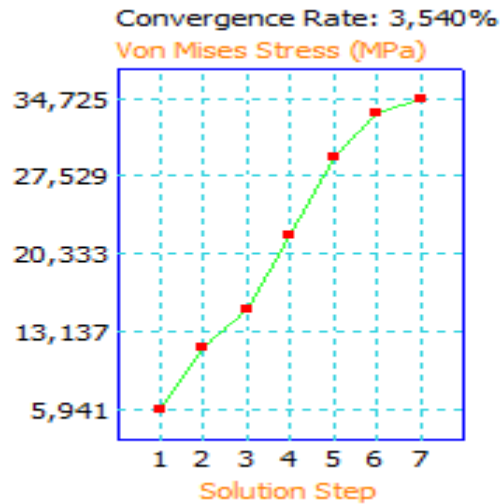
Análisis Estático	
Variable	Máximo
Volumen	145,16 L
Peso	1143,69 kg
Factor de Seguridad	15
Esfuerzo maximo de Von Mises	34,72 MPa
Desplazamiento Máximo del Material	0,006 mm
Estrés del acero	
Máximo	
Módulo de Elasticidad	200000 MPa
Relación de Poisson	0,29
Módulo de Cizallamiento	77519.4 MPa

Fuente: [21]

La tabla mencionada anteriormente fue un análisis estático de la simulación del rodillo térmico planteada por software Autodesk® Inventor® student, teniendo en cuenta fuerza aplicada y el acero con el que se va construir el rodillo.

La **Figura 6-2**, muestra una gráfica de convergencia donde se pueden observar algunos puntos de variación de números de elementos.

**Figura 6-2:** análisis de convergencia de mallado.



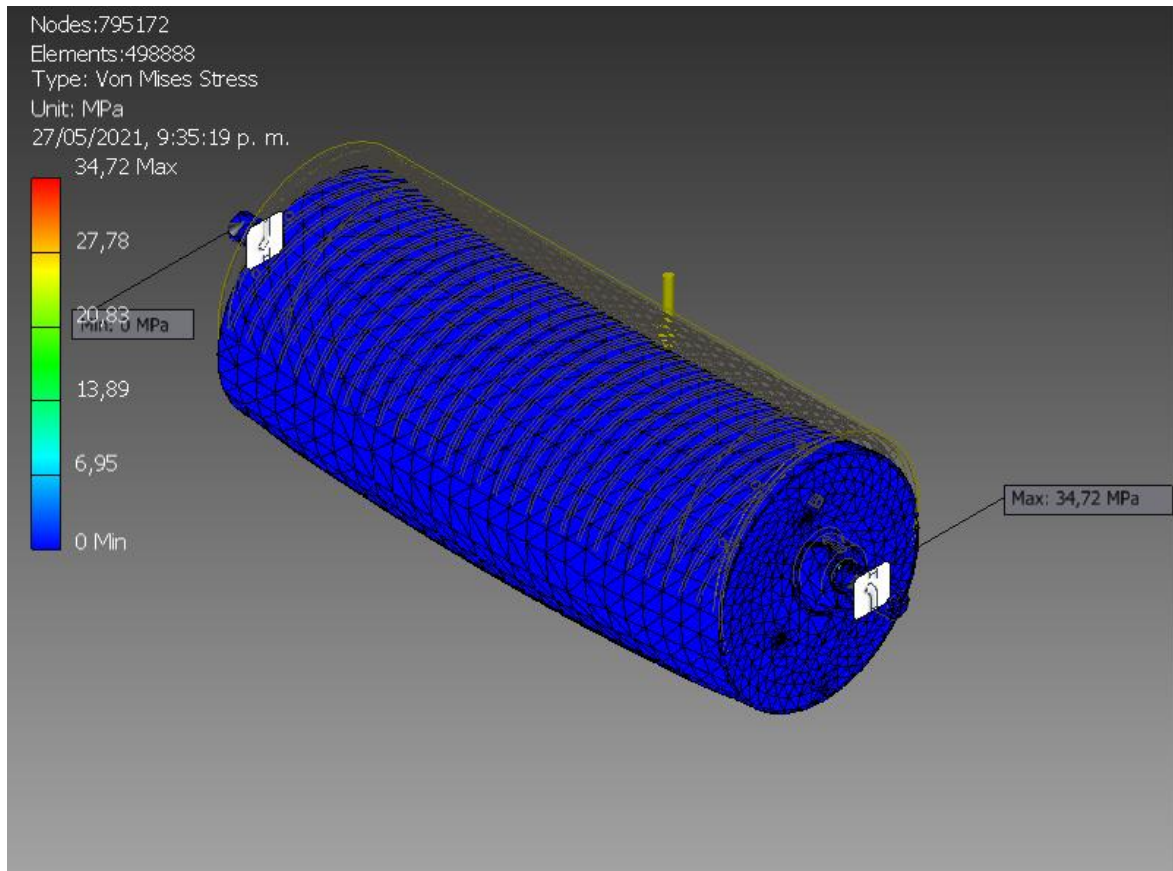
Fuente: [21]

En el análisis de convergencia mostrado en la figura anterior se realizó en base a los datos obtenidos del esfuerzo máximo y deformación total. El análisis mostrado del diagrama de convergencia se evidencia que, para cada iteración donde la malla

disminuye, pero el resultado de Von mises va aumentado hasta su valor máximo. La tasa de cambio disminuye exponencialmente con cada iteración, acercando de a un valor final de 34,725 MPa.

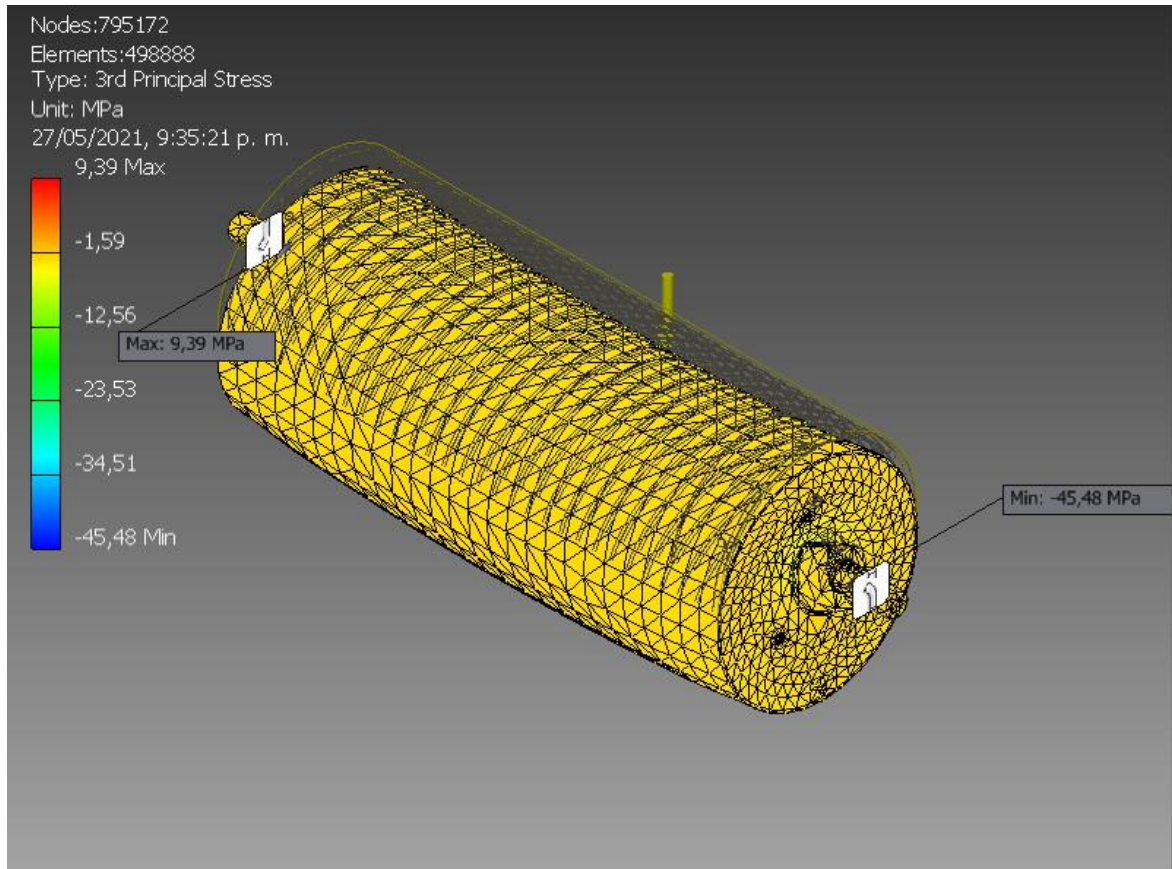
La **Figura 6-3**, muestra el análisis estático estructural del esfuerzo máximo de Von Mises y su comportamiento en la gráfica del sólido.

**Figura 6-3:** Esfuerzos máximo de Von Mises.



Fuente: [21]

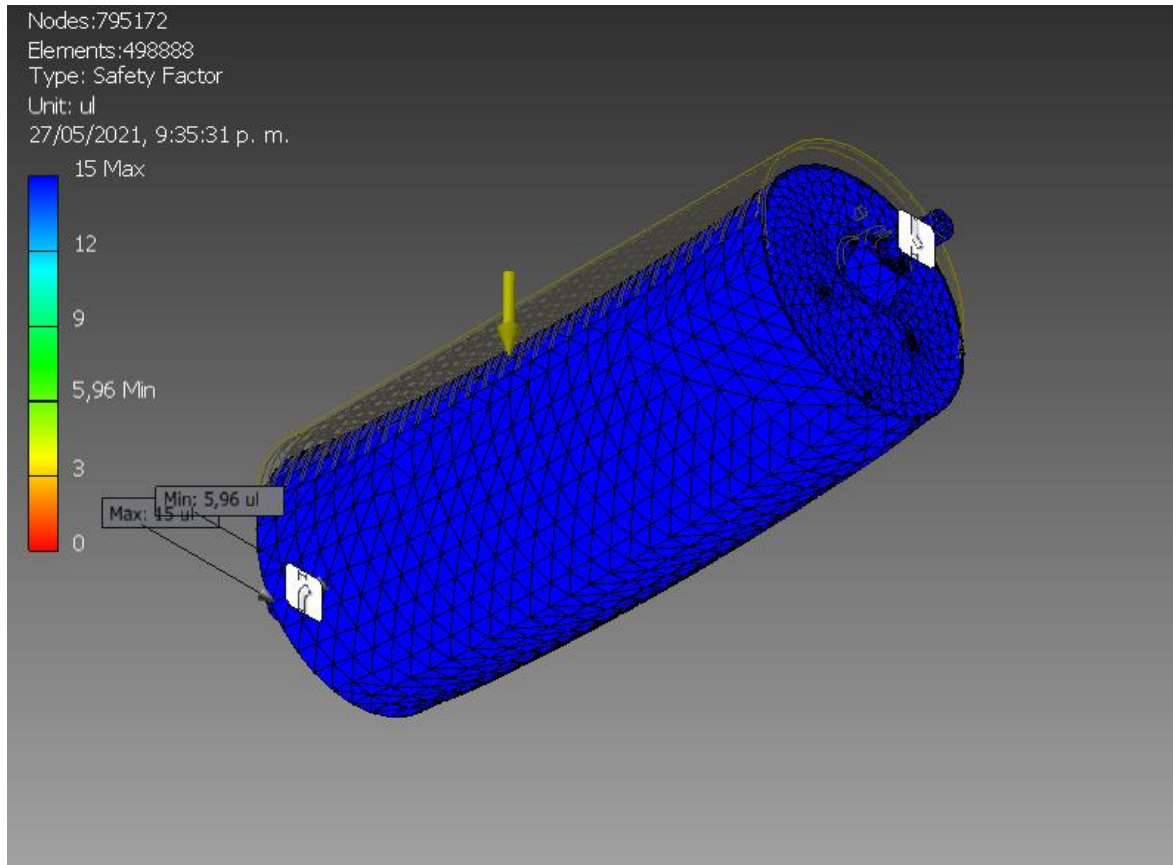
De la imagen anterior se puede observar que el diseño del rodillo tiene un máximo esfuerzo de 34.72 MPa.

**Figura 6-4:** Estrés principal del rodillo.

Fuente: [21]

El estrés principal del rodillo da un máximo estrés de 9.39 MPa, lo que nos indica que el diseño está entre los parámetros de diseño.

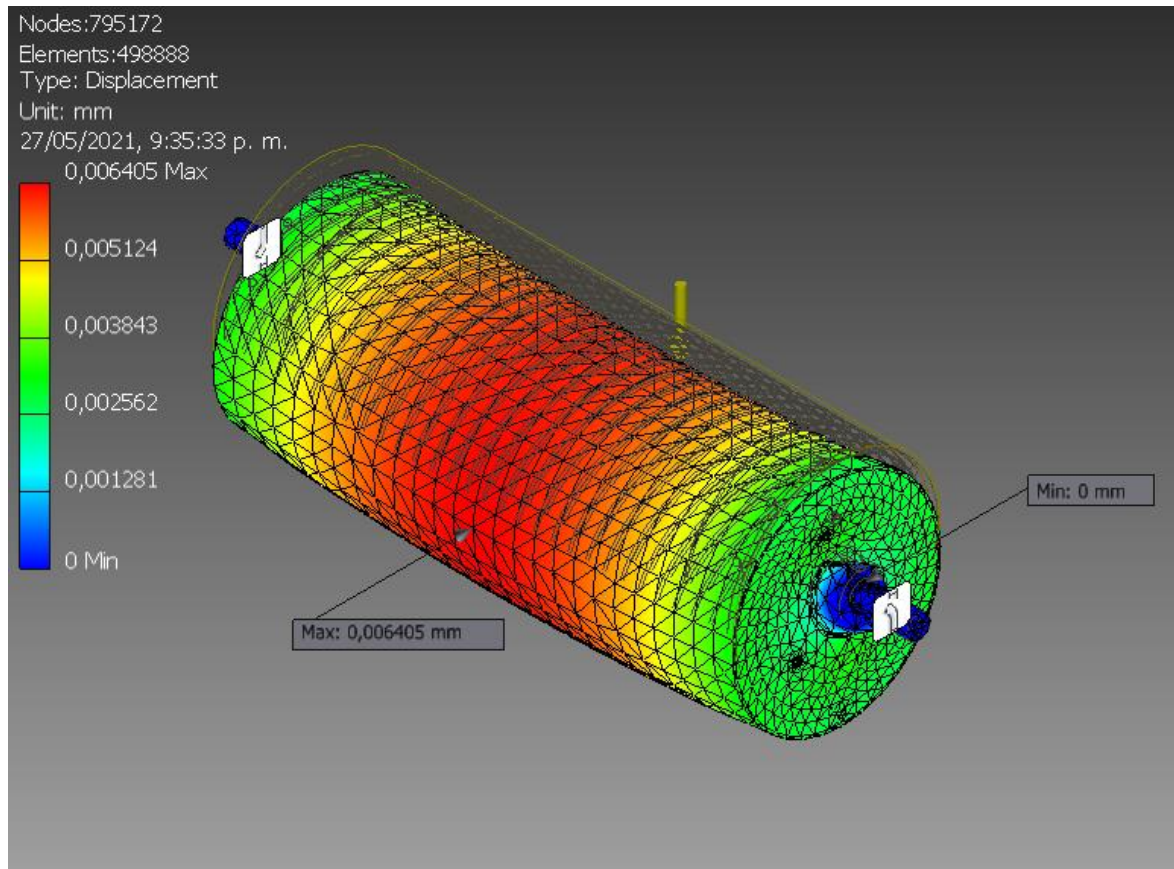
**Figura 6-5:** Factor de seguridad del diseño.



Fuente: [21]

La figura anterior muestra el factor de seguridad del diseño, de ahí se parte si el diseño es viable para la fabricación o si toca estructurar mejor el diseño.

**Figura 6-6:** Análisis desplazamiento.



Fuente: [21]

En la figura anterior muestra un desplazamiento máximo de 0.006405 mm, lo que nos indica que este diseño del rodillo nos muestra un desplazamiento tolerable o insignificante a que su desplazamiento es mínimo.

### 6.3 Diseño del sistema de recirculación de aceite para el rodillo.

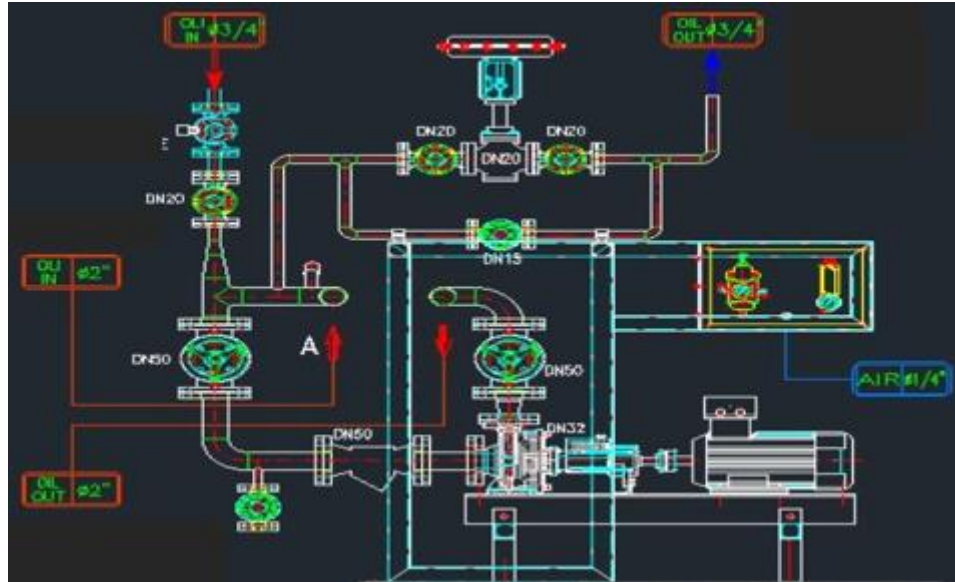
Los rodillos de transferencia de calor funcionan en una cantidad de procesos a los cuales se adaptan según la necesidad de cada industria.

Los factores y condiciones que definen la función y diseño de un rodillo térmico son básicamente el proceso y el producto para el cual va hacer diseñado.

Para este sistema térmico donde su principal elemento es el rodillo de aceite, se propone el control de temperatura del mismo con un sistema de control de circulación de aceite como lo muestra la **Figura 6-7.**, donde este sistema facilita el control de temperatura del

rodillo en casos dados que toque aumentar o disminuir la temperatura según el programa de trabajo de la máquina.

**Figura 6-7:** Sistema de control y recirculación de Aceite.



Fuente: [6].

La figura anterior muestra un diagrama de ingreso y retorno del aceite al rodillo mediante el sistema de recirculación impulsado por una bomba centrífuga, garantizando la temperatura en el rodillo térmico.

### 6.3.1 Componentes del sistema de recirculación de aceite.

Para el control de temperatura del rodillo de aceite térmico, se necesita un sistema de recirculación del aceite que ingresa al rodillo, para facilitar el control de su temperatura en la superficie.

Los componentes de este sistema se muestran a continuación.

1. Bomba centrífuga KSB.
2. Válvula de control modular SAMSON. DN 20
3. Válvulas de fuelle. DN 20, DN 15.
4. Brida plana para válvulas de fuelle.
5. Tubería en acero al carbón SCH 40.
6. Accesorios para tubería SCH 40.

7. Control IP.
8. Reguladores de presión para modular la apertura de la válvula de control.
9. Manómetro de presión.
10. Mangueras neumáticas.

### **6.3.2 Características de la bomba de recirculación para el rodillo térmico de aceite.**

Para este nuevo proceso, la bomba sugerida para el sistema de recirculación del rodillo de aceite es una bomba centrífuga con las características mencionadas a continuación:

Bomba centrífuga Sugerida = KSB

Flujo= **51,95 m<sup>3</sup>/h**

Modelo= **ETNY 065-050-160**

En la **Tabla 6-5**, se muestra las características y curva de la bomba sugerida para el sistema de recirculación para el control de temperatura del rodillo .



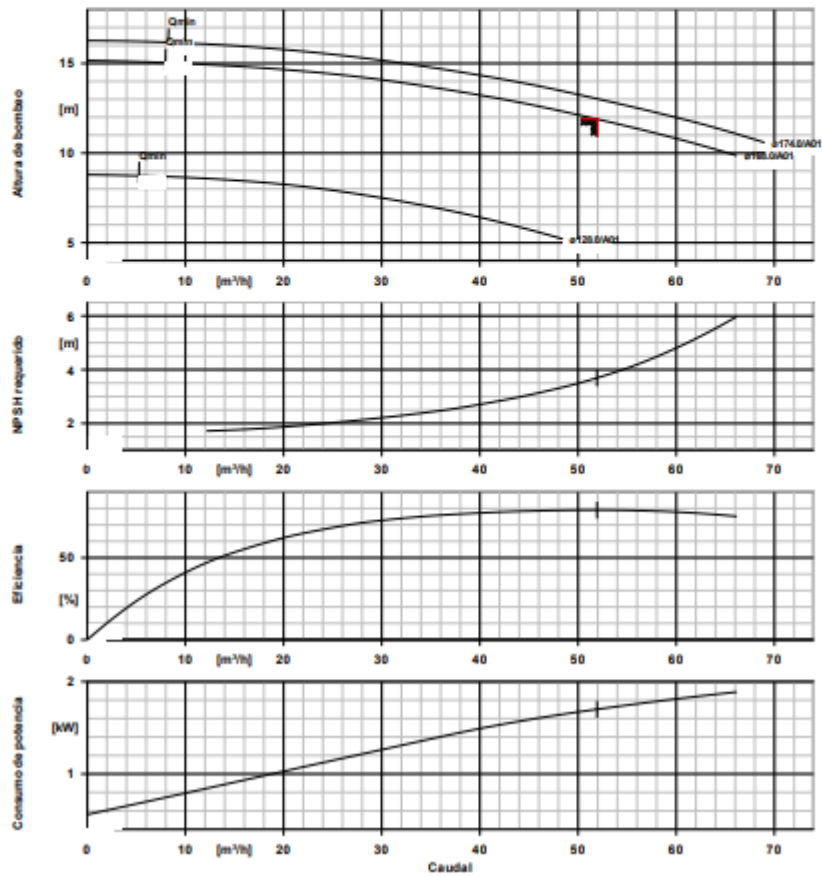
**Tabla 6-5:** Características de Curvas de la Bomba KSB.**Hoja de curvas**

Nº de posición del cliente:  
 Pedido fechado:  
 Doc. no.: Quick quote  
 Cantidad: 1

Número: ES 6039369  
 Nº de artículo: 100  
 Desede: 27/06/2018  
 Página: 3 / 6

**ETNY065-050-160 SG DB08LA200174B**  
 Bomba centrífuga Etanorm SYT para bajas presiones

Versión nº.: 1



Fuente: [22]

**Tabla 6-6:** Información de curva de la bomba KSB.**Datos de curvas**

Velocidad de giro	1742 rpm	Altura de bombeo requerida	11,90 m
Densidad del fluido	799 kg/m <sup>3</sup>	Eficiencia	79,1 %
Viscosidad	0,60 mm <sup>2</sup> /s	Absorción de potencia	1,70 kW
Corriente volumétrica	51,93 m <sup>3</sup> /h	NPSH requerido	3,69 m
Caudal bombeado requerido	51,95 m <sup>3</sup> /h	Número de curva	K1311.464/31
Altura de bombeo	11,89 m	Diámetro efectivo del rodete	168,0 mm

Fuente: [22]

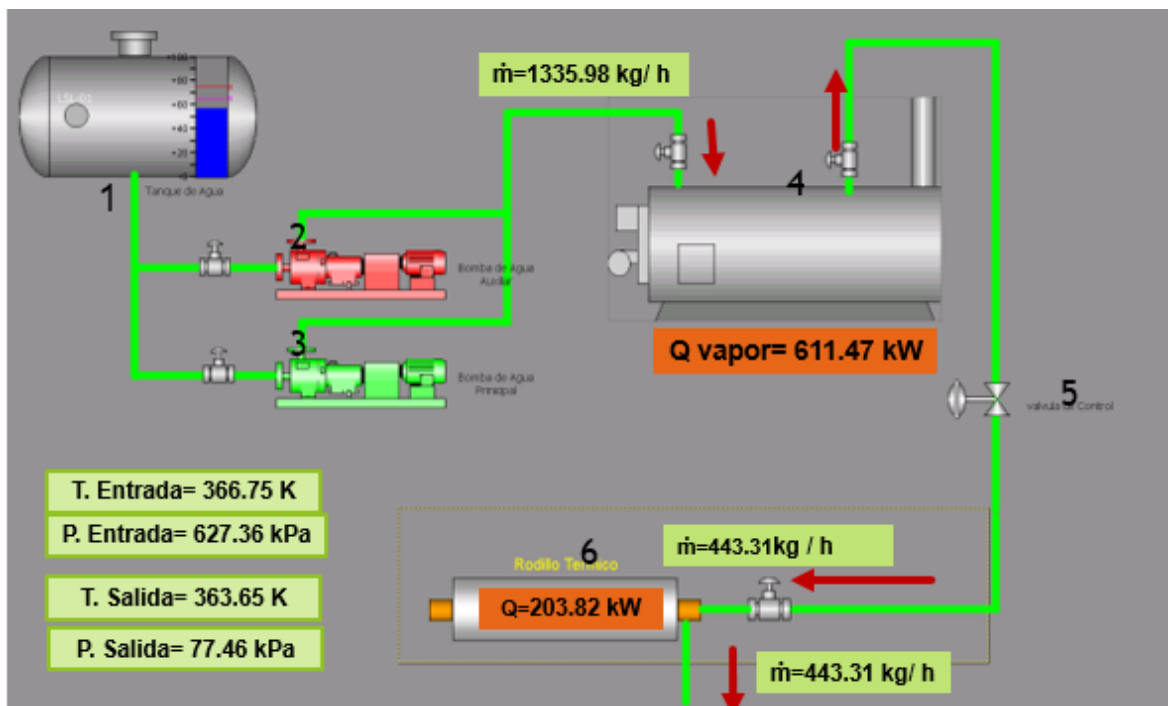
La figura anterior muestra los datos de la curva de trabajo, como la altura de bombeo, caudal de bombeo, corriente volumétrica de la bomba para aceite térmico para recirculación de aceite dentro del rodillo térmico. Con las características de esta bomba se puede garantizar una buena recirculación en el rodillo.

## 7. Resultados y análisis.

### 7.1 Diseño del sistema de vapor actual - Rodillo.

El diseño del sistema térmico actual está distribuido como lo muestra la **Figura 7-1**, donde se ve el recorrido que hace el fluido térmico desde la caldera hacia el rodillo de vapor, con sus variables de trabajo correspondientes como son temperatura, presión y flujo másico del circuito.

**Figura 7-1:** Circuito térmico de vapor con variables de trabajo.



Fuente: [7]

La figura del circuito de vapor muestra valores de variables de trabajo del rodillo térmico con su flujo másico a la entrada y retorno de vapor del rodillo y presión alcanzada por el vapor. También muestra la capacidad térmica de la caldera, estos valores se calculan teniendo en cuenta el ciclo de trabajo del circuito de vapor.

La **Tabla 7-1** muestra valores termodinámicos obtenidos en los calculados en el sistema térmico de vapor.

**Tabla 7-1:** Valores termodinámicos del sistema de vapor

<b>Circuito de vapor</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidades</b>
Entalpia del Vapor a la salida de la Caldera	<b>2762,8</b>	<b>kJ/kg</b>
Temperatura del Vapor a la salida de la Caldera	<b>438,15</b>	<b>K</b>
Presión del Vapor a la salida de la Caldera	<b>234,24</b>	<b>kPa</b>
Entalpia del vapor a la entrada del Rodillo	<b>2665,36</b>	<b>kJ/kg</b>
Temperatura del Vapor a la entrada del Rodillo	<b>366,75</b>	<b>K</b>
Presión del vapor a la entrada del Rodillo	<b>627,36</b>	<b>kPa</b>
Entalpia del Vapor a la salida del Rodillo	<b>381,25</b>	<b>kJ/kg</b>
Temperatura del Vapor a la salida del Rodillo	<b>363,65</b>	<b>K</b>
Presión del Vapor a la salida del Rodillo	<b>77,46</b>	<b>kPa</b>

Fuente: Propia

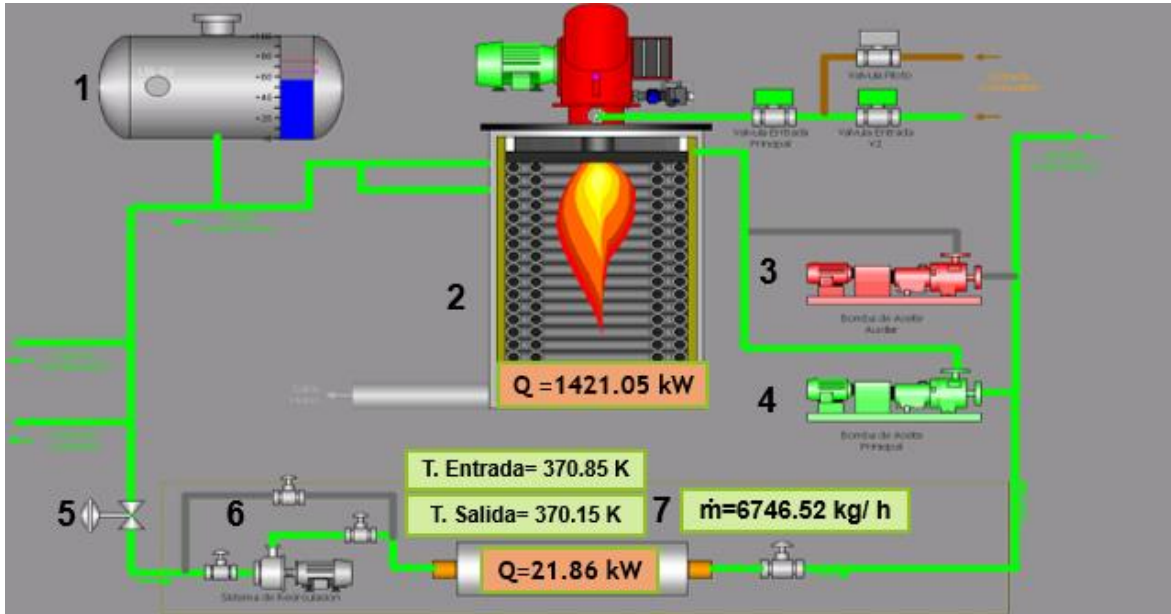
La tabla anterior muestra resultados de análisis termodinámico del sistema de vapor obtenidos durante un seguimiento en su ciclo de trabajo de la caldera y del comportamiento del rodillo térmico de vapor.

## **7.2 Diseño del sistema de aceite térmico para el proceso de grabación.**

El nuevo proceso térmico de aceite que se propone para el conjunto de grabar queda como se muestra en la Figura 7-2, donde se muestra el recorrido que hace que el aceite térmico desde la caldera hacia los dispositivos térmicos, haciendo énfasis principalmente al rodillo térmico del conjunto de grabar, mostrando con detalle sus respectivas variables de trabajo como son temperaturas y flujo másico de aceite.

En este diseño lo que se plantea al sistema es la conexión del rodillo térmico para el proceso de grabado que se realiza en la máquina. también se muestra el sistema de recirculación del aceite para controlar la temperatura en el rodillo.

**Figura 7-2:** Sistema de aceite térmico con aceite - Rodillo.



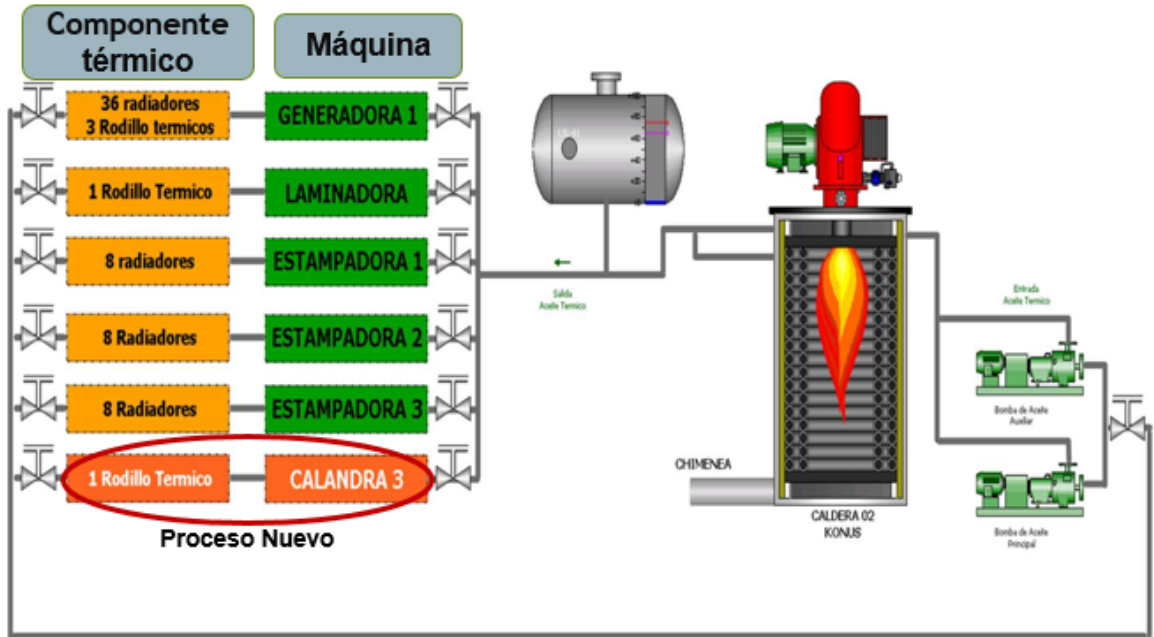
Fuente: Propia

La figura del sistema de aceite térmico nos muestra las condiciones de trabajo del rodillo térmico con aceite con sus respectivos valores de flujo másico y temperatura en un ciclo de trabajo.

Para este diseño del sistema de grabación con aceite térmico lo más importante, son las condiciones de trabajo de la caldera hasta el momento. Para esto el objetivo fue de revisar el funcionamiento del sistema actual de aceite térmico de PROQUINAL S.A.S. liderado por una caldera vertical con una capacidad térmica de **2907 kW**.

En este proceso de análisis del sistema térmico de esta caldera se verifican consumos de energía de los procesos que actualmente están conectados a este circuito con el fin de confirmar que la caldera tenga capacidad para poder incluir el nuevo proceso.

La **Figura 7-3** muestra el total de procesos conectados a la caldera de aceite, incluido el sistema de grabación por rodillo el cual tiene un rodillo térmico.

**Figura 7-3:** Sistema térmico con el nuevo proceso.

Fuente: Propia

La figura anterior nos muestra el sistema térmico y el recorrido que hace el aceite de la caldera hacia las máquinas, la cual se identifica el número de componentes térmicos que tiene cada Máquina para llevar a cabo su proceso de producción.

**Tabla 7-2:** Valores termodinámicos del sistema de aceite.

Circuito de Aceite térmico	Cantidad	Unidades
Entalpia del Aceite a la salida de la Caldera	<b>1568,57</b>	<b>kJ/kg</b>
Temperatura del Aceite a la salida de la Caldera	<b>553,15</b>	<b>K</b>
Presión del Aceite a la salida de la Caldera	<b>688,68</b>	<b>kPa</b>
Entalpia del Aceite a la entrada del Rodillo	<b>812,80</b>	<b>kJ/kg</b>
Temperatura del Aceite a la entrada del Rodillo	<b>370,85</b>	<b>K</b>
Entalpia del Aceite a la salida del Rodillo	<b>812,80</b>	<b>kJ/kg</b>
Temperatura del Aceite a la salida del Rodillo	<b>365,85</b>	<b>K</b>

Fuente: Propia

Los valores de la tabla anterior fueron obtenidos durante el ciclo de trabajo de la caldera de aceite térmico y del rodillo de aceite, donde se calcularon resultados dados en la tabla para compararlos con el sistema de vapor.

### 7.3 Tabla comparativa de los dos sistemas térmicos.

Teniendo en cuenta el funcionamiento de los dos sistemas y el análisis de cada uno, se puede ver el cambio de eficiencia energética y el aumento de la misma haciendo el cambio de tecnología, también se puede observar un ahorro económico como energético de un sistema térmico comparado con el otro, se da una mejora en temas ambientales como son las emisiones de gases de efecto invernadero aplicado solamente al rodillo de fluido térmico. La **Tabla 7-3**, muestra los resultados obtenidos en el funcionamiento de cada sistema térmico.

**Tabla 7-3:** Tabla Comparativa por cambio de Tecnología.

<b>Circuito de vapor</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidades</b>
Eficiencia de la Caldera de Vapor	69	%
Costo Global de Operación por Año por Rodillo	\$ 68.873.114	COP
Energía de Transferencia por Rodillo	203.82	kW
Capacidad Térmica del Rodillo de Vapor	327.02	kW
Capacidad utilizada de la Caldera de Vapor	78.9	%
<b>Circuito de Aceite térmico</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidades</b>
Eficiencia de la Caldera de Aceite Térmico	80	%
Costo Global de Operación por Año por Rodillo	\$ 10.249.557	COP
Energía de Transferencia por Rodillo	21.86	kW
Capacidad utilizada de la Caldera de Aceite Térmico	66	%
Costos de Ahorros por cambio de Tecnología por Año	\$ 58.623.557	COP

Fuente: Propia

Teniendo en cuenta los datos de la **Tabla 7-3**, se realizaron los cálculos termo mecánicos, económicos, y se hallaron las variables de rendimiento de la caldera para cada sistema térmico, costo de operación por cambio de tecnología por cada rodillo por año, energía de transferencia, capacidad térmica de cada rodillo, y capacidad utilizada de cada caldera, para el caso del vapor y el aceite térmico aplicado solamente al rodillo térmico.

Los resultados muestran que, efectivamente haciendo el cambio de tecnología, los ahorros económicos son del 86% al pasar de un gasto anual de **\$69** millones anuales a **\$10** millones anuales. Los ahorros energéticos son del **90%** al pasar de un gasto energético de **203 kW** por rodillo a **21 kW**. Sumado a lo anterior, al utilizar el circuito de aceite térmico se tiene la posibilidad de eliminar completamente el sistema de vapor, ahorrando los gastos de mantenimiento, combustible y agua de proceso de un sistema completo.

**Tabla 7-4:** Tabla de Flujos Másicos de cada Sistema Térmico.

<b>Circuito de vapor</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidades</b>
Rendimiento de Combustión	90,1	%
Flujo Másico del Combustible - Caldera	20,89	kg/h
Flujo Másico del Agua Caldera	1335,98	kg/h
Flujo Másico de Aire - Caldera	457,05	kg/h
Flujo Másico del Rodillo	443,31	kg/h
Eficiencia de la Caldera	69	%
<b>Circuito de Aceite térmico</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidades</b>
Rendimiento de Combustión	90,6	%
Flujo Másico del Combustible - Caldera	79,92	kg/h
Flujo Másico de Aire - Caldera	1883,16	kg/h
Flujo Másico del Rodillo	6746,52	kg/h
Eficiencia de la Caldera	80	%

Fuente: Propia

Teniendo en cuenta la tabla anterior se puede comparar los valores de flujos másicos obtenidos durante la operación de los dos circuitos, con el fin de conocer parámetros, variables y condiciones de trabajo de cada sistema.

Ya conociendo aspectos termodinámicos que se resaltan, también se genera un impacto ambiental, haciendo cambio de tecnología ya que no se va a desechar condensando a las aguas residuales de las alcantarillas. Esta agua que se no se recupera en el circuito por temas de economía se vierten al alcantarillado, siendo agua tratadas químicamente para el proceso. También se reflejan la reducción de productos de combustión lo que genera un impacto ambiental. La **Tabla 7-5**, muestra la cantidad de productos de combustión generada por cada sistema térmico, los cuales son emisiones de gases de efecto invernadero como son nitrógeno, dióxido de carbono, agua y oxígeno.

**Tabla 7-5:** de flujo másico de productos de combustión por caldera.

<b>Sistema térmico de vapor</b>	<b>cantidad</b>	<b>unidades</b>
Flujo Másico de productos de combustión	372,47	kg/h
Presión de la salida de la Caldera	73,38	kPa
Temperatura de salida de la chimenea	443,31	K
Flujo Másico del Rodillo de vapor	443,31	kg/h
Temperatura del Vapor a la salida del Rodillo	363,65	K
<b>Sistema térmico de aceite</b>	<b>cantidad</b>	<b>unidades</b>
Flujo Másico de productos de combustión	185,23	kg/h
Presión de la salida de la Caldera	73,38	kPa
Temperatura de salida de la chimenea	518,95	K
Reducción de productos de combustión por cambio de tecnología	50,27	%



Fuente: Propia

La tabla anterior muestra la cantidad de productos de combustión generados por cada caldera, en este el proceso de trabajo con el sistema vapor se está generando **372,47 kg/h** y si se hace el cambio de tecnología a aceite térmico se estaría produciendo **185,47 kg/h** de productos generados por la combustión. Lo que se generaría es una reducción de productos de combustión del **50,27%** con el cambio de tecnología para este proceso de grabado por rodillo.

## 8. Conclusiones y recomendaciones

### 8.1 Conclusiones

Conociendo el funcionamiento del sistema de vapor y sus parámetros de operación, se determinaron variables de funcionamiento del sistema del rodillo térmico para el conjunto de grabar con fuente de energía del vapor. Las variables determinadas para el funcionamiento de este sistema fueron temperatura, presión y velocidades de operación de la máquina que hace el proceso de grabado por rodillos.

Al realizar análisis termo mecánicamente de la línea base actual de uso de energía y masa de vapor del sistema térmico para el proceso de grabación, se identificó que el rodillo térmico de vapor para cumplir con la temperatura requerida para el proceso de grabado necesita cierta cantidad de energía equivalente a **203 kW**. Partiendo de esta información se confirma que puede salir costoso generar vapor para este sistema de grabar.

Partiendo del análisis termo mecánico se determinaron los costos de operación por año del rodillo funcionando con vapor con valores actuales del 2020 y 2021 y fueron de **\$68.873.114** millones. para cumplir con las condiciones de trabajo en sistema térmico para grabar.

Para la propuesta de diseño de transferencia de calor con aceite térmico se determinaron los parámetros de funcionamiento del sistema de aceite térmico para corroborar que la caldera tenga capacidad para alimentar otro dispositivo térmico. Haciendo los cálculos térmicos en la caldera se certificó que la caldera de aceite está con una capacidad utilizada del 66% con una eficiencia de **80%**.

Conociendo las condiciones de funcionamiento de la caldera de aceite térmico, se pasó a hacer el diseño mecánico del rodillo para aceite del sistema de grabar. Conociendo las variables de funcionamiento del sistema de vapor como referencia, se realizó el diseño de un rodillo térmico con su sistema de recirculación de aceite que trabaje con una energía de transferencia de **21 kW**, cumpliendo con las variables de temperaturas de trabajo para el sistema de grabar sin verse afectado por el cambio de tecnología.

Teniendo en cuenta la cantidad de energía que necesita el rodillo de aceite térmico para cumplir con las condiciones de trabajo en el sistema de grabación se determinó los costos

de operación anual del rodillo funcionando con aceite térmico y fueron de **\$10.249.557** millones.

Los resultados por cambio de tecnología muestran que efectivamente haciendo el cambio de tecnología con el diseño del rodillo térmico propuesto los ahorros son del **86%** al pasar de un gasto de 69 millones anuales con vapor a **10** millones anuales con aceite térmico.

El cambio de tecnología de vapor a aceite térmico, nos genera también un impacto ambiental bastante agradable para la compañía, ya que se reduciría la cantidad de **kg/h** de productos generados por la combustión. Estos productos generados por la combustión en la caldera de vapor son gases son de efecto invernadero. Esta reducción esta alrededor del **50,27%**.

Teniendo en cuenta el diseño de transferencia con aceite térmico el costo de esta propuesta mencionado en el anteproyecto fue de **\$227.268.580,00**. Con una tasa de retorno a 4 aproximadamente para recuperar esta inversión.

## **8.2 Recomendaciones.**

Durante el desarrollo de este trabajo se determinaron aspectos importantes en sistemas térmicos que pueden servir de ayuda a trabajos futuros en temas energéticos en sistemas térmicos para las industrias.

Se recomienda que, para mejorar el rendimiento a cualquier sistema térmico, es importante realizar las buenas prácticas, en temas de aislamiento por completo de los sistemas térmicos, con esto se minimiza un porcentaje de pérdidas por radiación.

PROQUINAL S.A.S. teniendo los resultados de este trabajo para cada sistema térmico, puede aprovechar más la capacidad térmica de la caldera de aceite térmico, teniendo en cuenta que está en una capacidad de uso del 66%.

Partiendo de este trabajo y los resultados obtenidos en campo en sistemas térmicos, se recomienda a PROQUINAL S.A.S. o trabajos futuros implementar buenas prácticas en los sistemas térmicos en calderas en temas de aislamiento de tuberías de transporte de fluidos térmicos; con esto ayudará a tener menos consumos de combustible, reducirá tiempos de calentamiento y aumenta la eficiencia en la caldera.

## 9. Bibliografía.

- [1] D. F. B. Medina., «ANÁLISIS DE INGENIERÍA A UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN MEDIANTE ACEITE TÉRMICO EN UN BUQUE PORTACONTENEDORES», Chile, 2006.
- [2] J. C. T. Pérez, PROPUESTA DE MEJORA EN UN SISTEMA DE TRANSFERENCIA DE, Guatemala , 2015.
- [3] E. M. C. R. - P. W. J. Turriago, Diseño de un sistema de calentamiento de agua y aire mediante aceite térmico., Quito, 2017.
- [4] E. A. B. Vasquez, EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA CALDERA PIROTUBULAR COLMAQUINAS DE 250 BHP DE UN LABORATORIO FARMACÉUTICO, Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2005.
- [5] R. A. M. SANDOVA, GUÍA DE UTILIZACIÓN DEL ACEITE TÉRMICO EN UNSISTEMA DE TRANSFERENCIA DE CALOR, GUATEMALA: [https://www.academia.edu/33859915/GUIA\\_DE\\_UTILIZACION\\_DEL\\_ACEITE\\_TERMICO\\_EN\\_UN\\_SISTEMA](https://www.academia.edu/33859915/GUIA_DE_UTILIZACION_DEL_ACEITE_TERMICO_EN_UN_SISTEMA), 2009.
- [6] P. S.A.S., Mimico general de la máquina calandra 3, Bogota D.C., 2011.
- [7] P. S.A.S, Fotografías de partes y fichas técnicas de equipos de proquinal s.a.s., Bogotá D.C., 2020.
- [8] Eral-makina, «cilindro de rodillos eral makina <http://www.eralmak.com/en/urunler.asp?kt=36>,» 2002-2016 Er Al Makina, Alemania, 2002- 2016.
- [9] Derichs, «Chill-Rolls- Copper-Design,» Maschinen- und Apparatebau GmbH, Alemania .
- [10] R. N. M. Valdovinos, «CLASIFICACIÓN, USOS Y MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR,» 2018.

- 
- [11] J. U. Martínez, «Calderas Industriales Eficientes,» la suma de todos, España, 2004/2012.
- [12] B. K. -. L. Walleser, Tecnología de medición en calderas, Argentina: testo, 2000985.2383/hd/R/01.2004.
- [13] E. practicos, «MEJORAS HORIZONTALES DE AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA SECTOR INDUSTRIAL.».
- [14] PIROBLOC, «<https://www.pirobloc.com/sistemas-de-fluido-termico-la-guia-completa/>,» © 2020 - Pirobloc, S.A., 2020.
- [15] h. PDF., «[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lqi/bautista\\_v\\_g/capitulo4.](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lqi/bautista_v_g/capitulo4.),» <http://catarina.udlap.mx/>, 2011.
- [16] M. Ingeniería, «Montajes Soluciones Ingeniería.,» Copyright 2020, 2020.
- [17] T. CDC, «<http://www.tecnicacdc.com.ar/calentadores-de-aceites-termicos/>,» WebLineService.com, Argentina , 2016.
- [18] G. n. Fenosa, «Manual de eficiencia energética.,» oi escuela de negocios., 2007.
- [19] J. C. T. Pérez, «PROPUESTA DE MEJORA EN UN SISTEMA DE TRANSFERENCIA DE CALOR CON ACEITE TÉRMICO EN UNA INDUSTRIA TEXTIL.,» Guatemala., 2015.
- [20] L. & DTC, «PROCESS FLATWORK THROUGH CALENDARS,» © 2008 LTC & DTC Limited, 2008.
- [21] I. L. R. VARGAS, ESTUDIO DEL EFECTO DE LOS PARÁMETROS DE SOLDADURA ROBOTIZADA EN UN COMPONENTE ESTRUCTURAL DE ACEROS., MÉXICO: CIATEQ, 2017.
- [22] A. Inventor®, «Análisis estático en Autodesk® Inventor® student.,» Autodesk® Inventor®, Bogotá D.C., 2020.

- 
- [23] KSB, *Bomba centrífuga Etanorm SYT para bajas presione*, ETNY065-050-160 SG DB08LA200174B Versión nº.: 1, 2018.
- [24] C. 2. E. M. C. A. R. Reserved., Copyright 2020 Exxon Mobil Corporation. All Rights Reserved. <https://www.mobil.com.mx/es-mx/lubricantes/industrial/lubricants/products/products/mobiltherm-605>, Copyright 2020 .
- [25] P. Jorge Jiménez, «Powermaster,» 2019, Powermaster. [En línea]. Available: <https://www.powermaster.com.mx/guia-tecnica/combustibles/#%22>.
- [26] Y. A. B. M. Cengel, *termodinámica* (vol. 7ma edición). México DF: McGraw Hill., Mexico: Mc Graw Hill, 2012.
- [27] X. I. George R. Cozzarin y Timothy W. Womer, «Tecnología del plástico,» Noviembre 2005. [En línea]. Available: <http://www.plastico.com/temas/Rodillos-de-transferencia-de-calor+3043920?pagina=2>.
- [28] C. d. Madrid., «Calderas industriales eficientes.,» Madrid..
- [29] <http://www.babcock-wanson.es/>, «BABCOCK WANSON,» [En línea].

# Anexos.

## Anexo A.

### Tablas termodinámicas.

#### A.1. Anexo: Tabla A-4 Tabla de temperaturas.

**TABLA A-4**

Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., T °C	Pres. sat., P <sub>sat</sub> kPa	Volumen específico, m <sup>3</sup> /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Liq. sat., v <sub>f</sub>	Vapor sat., v <sub>g</sub>	Liq. sat., u <sub>f</sub>	Evap., u <sub>fg</sub>	Vapor sat., u <sub>g</sub>	Liq. sat., h <sub>f</sub>	Evap., h <sub>fg</sub>	Vapor sat., h <sub>g</sub>	Liq. sat., s <sub>f</sub>	Evap., s <sub>fg</sub>	Vapor sat., s <sub>g</sub>
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302

## A.2. Anexo: Tabla de características del aceite mobil Mobiltherm 605.

Entalpia	Temperatura	kinemática	Densidad	Presión	Calor específico	Capacidad calorífica volumétrica	Coef. Conducc. Térm.	Viscosidad	Prandtl-NUMBER
kJ/kg	°C	mm <sup>2</sup> /s	kg/m <sup>3</sup>	mPas	kJ/kg K	kJ/m <sup>3</sup> K	W/mK	mm <sup>2</sup> /s	
495,19	0	148	871,4	128,97	1,8129	1579,7	0,1359	0,086	1720,19
509,35	5	107	868,3	92,9	1,8312	1589,9	0,1356	0,0853	1255,03
523,66	10	79,9	865,1	69,14	1,8494	1600	0,1352	0,0845	945,88
538,18	15	60,8	862	52,38	1,8677	1610	0,1348	0,0837	725,67
552,88	20	47,2	858,9	40,5	1,886	1619,8	0,1345	0,083	568,08
567,74	25	37,3	855,7	31,89	1,9042	1629,5	0,1341	0,0823	452,9
582,81	30	30	852,6	25,53	1,9225	1639	0,1337	0,0816	367,06
598,06	35	24,4	849,4	20,75	1,9408	1648,5	0,1334	0,0809	301,95
613,46	40	20,2	846,2	17,09	1,959	1657,8	0,133	0,0802	251,76
629,08	45	16,9	843	14,26	1,9773	1666,9	0,1326	0,0796	212,5
644,85	50	14,3	839,9	12,02	1,9955	1676	0,1323	0,0789	181,36
660,83	55	12,2	836,7	10,24	2,0138	1684,9	0,1319	0,0783	156,36
676,99	60	10,6	833,5	8,81	2,0321	1693,7	0,1316	0,0777	136,05
693,31	65	9,2	830,3	7,64	2,0503	1702,4	0,1312	0,0771	119,38
709,84	70	8,07	827,1	6,68	2,0686	1710,9	0,1308	0,0765	105,56
726,55	75	7,13	823,9	5,88	2,0869	1719,3	0,1305	0,0759	94
743,42	80	6,34	820,7	5,21	2,1051	1727,6	0,1301	0,0753	84,25
760,50	85	5,68	817,5	4,64	2,1234	1735,8	0,1297	0,0747	75,96
777,76	90	5,11	814,2	4,16	2,1417	1743,8	0,1294	0,0742	68,87
795,17	95	4,62	811	3,75	2,1599	1751,7	0,129	0,0736	62,75
812,80	100	4,2	807,8	3,39	2,1782	1759,5	0,1286	0,0731	57,44
830,61	105	3,83	804,5	3,08	2,1965	1767,1	0,1283	0,0726	52,81
848,56	110	3,51	801,3	2,82	2,2147	1774,7	0,1279	0,0721	48,75
866,74	115	3,23	798,1	2,58	2,233	1782,1	0,1276	0,0716	45,17
885,10	120	2,99	794,8	2,37	2,2513	1789,3	0,1272	0,0711	42
903,60	125	2,78	791,7	2,19	2,2695	1796,5	0,1268	0,0706	39,17
922,33	130	2,57	788,3	2,03	2,2878	1803,5	0,1265	0,0701	36,65
941,19	135	2,4	785,1	1,88	2,306	1810,4	0,1261	0,0697	34,39
960,28	140	2,24	781,8	1,75	2,3243	1817,1	0,1257	0,0692	32,35
979,56	145	2,1	778,5	1,63	2,3426	1823,8	0,1254	0,0687	30,51
998,97	150	1,97	775,3	1,53	2,3608	1830,3	0,125	0,0683	28,84
1018,61	155	1,85	772	1,43	2,3791	1836,6	0,1247	0,0679	27,32
1038,43	160	1,75	768,7	1,34	2,3974	1842,9	0,1243	0,0674	25,94
1058,40	165	1,65	765,4	1,27	2,4156	1849	0,1239	0,067	24,67
1078,58	170	1,57	762,2	1,19	2,4339	1855	0,1236	0,0666	23,51
1098,95	175	1,49	758,9	1,13	2,4522	1860,9	0,1232	0,0662	22,45
1119,46	180	1,41	755,6	1,07	2,4704	1866,7	0,1228	0,0658	21,47
1140,20	185	1,34	752,3	1,01	2,4887	1872,3	0,1225	0,0654	20,56
1161,12	190	1,28	749,1	0,96	2,507	1877,8	0,1221	0,065	19,72
1182,17	195	1,22	745,8	0,91	2,5252	1883,2	0,1217	0,0646	18,95
1203,46	200	1,17	742,5	0,87	2,5435	1888,5	0,1214	0,0643	18,22
1224,88	205	1,12	739,2	0,83	2,5617	1893,6	0,121	0,0639	17,55
1246,53	210	1,08	735,9	0,79	2,58	1898,6	0,1207	0,0635	16,93
1268,36	215	1,03	732,6	0,76	2,5983	1903,5	0,1203	0,0632	16,35
1290,33	220	0,993	729,3	0,72	2,6165	1908,3	0,1199	0,0628	15,8
1312,53	225	0,956	726	0,69	2,6348	1913	0,1196	0,0625	15,29
1334,91	230	0,921	722,7	0,67	2,6531	1917,5	0,1192	0,0622	14,81
1357,42	235	0,888	719,5	0,64	2,6713	1921,9	0,1188	0,0618	14,36
1380,17	240	0,857	716,2	0,61	2,6896	1926,2	0,1185	0,0615	13,94
1403,10	245	0,829	712,9	0,59	2,7079	1930,3	0,1181	0,0612	13,54
1426,16	250	0,802	709,6	0,57	2,7261	1934,4	0,1177	0,0609	13,17
1472,93	260	0,752	703	0,53	2,7627	1942,1	0,117	0,0603	12,48
1520,39	270	0,708	696,4	0,49	2,7992	1949,4	0,1163	0,0597	11,87
1568,57	280	0,669	689,8	0,46	2,8357	1956,2	0,1156	0,0591	11,32
1617,48	290	0,634	683,3	0,43	2,8722	1962,5	0,1148	0,0585	10,83



## Anexo B.

### Análisis termodinámico de los dos sistemas

#### B.1. Anexo: Tabla de análisis termodinámico de los dos sistemas térmico.

<b>Circuito de vapor</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidades</b>
Entalpia del Vapor a la salida de la Caldera	<b>2762,8</b>	KJ/kg
Temperatura del Vapor a la salida de la Caldera	<b>438,15</b>	K
Presión del Vapor a la salida de la Caldera	<b>234,24</b>	kPa
Entalpia del vapor a la entrada del Rodillo	<b>2665,36</b>	KJ/kg
Temperatura del Vapor a la entrada del Rodillo	<b>366,75</b>	K
Presión del vapor a la entrada del Rodillo	<b>627,36</b>	kPa
Entalpia del Vapor a la salida del Rodillo	<b>381,25</b>	KJ/kg
Temperatura del Vapor a la salida del Rodillo	<b>363,65</b>	K
Presión del Vapor a la salida del Rodillo	<b>77,46</b>	kPa
<b>Circuito de Aceite térmico</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidades</b>
Entalpia del Aceite a la salida de la Caldera	<b>1568,57</b>	KJ/kg
Temperatura del Aceite a la salida de la Caldera	<b>553,15</b>	K
Presión del Aceite a la salida de la Caldera	<b>688,68</b>	kPa
Entalpia del Aceite a la entrada del Rodillo	<b>812,80</b>	KJ/kg
Temperatura del Aceite a la entrada del Rodillo	<b>370,85</b>	K
Entalpia del Aceite a la salida del Rodillo	<b>812,80</b>	KJ/kg
Temperatura del Aceite a la salida del Rodillo	<b>365,85</b>	K

<b>Circuito de vapor</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidades</b>
Eficiencia de la Caldera de Vapor	<b>69</b>	%
Costo Global de Operación por Año por Rodillo	<b>\$ 68.873.114</b>	COP
Energía de Transferencia por Rodillo	<b>203.82</b>	kW
Capacidad Térmica del Rodillo de Vapor	<b>327.02</b>	kW
Capacidad utilizada de la Caldera de Vapor	<b>78.9</b>	%
<b>Circuito de Aceite térmico</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidades</b>
Eficiencia de la Caldera de Aceite Térmico	<b>80</b>	%
Costo Global de Operación por Año por Rodillo	<b>\$ 10.249.557</b>	COP
Energía de Transferencia por Rodillo	<b>21.86</b>	kW
Capacidad utilizada de la Caldera de Aceite Térmico	<b>66</b>	%
Costos de Ahorros por cambio de Tecnología por Año	<b>\$ 58.623.557</b>	COP



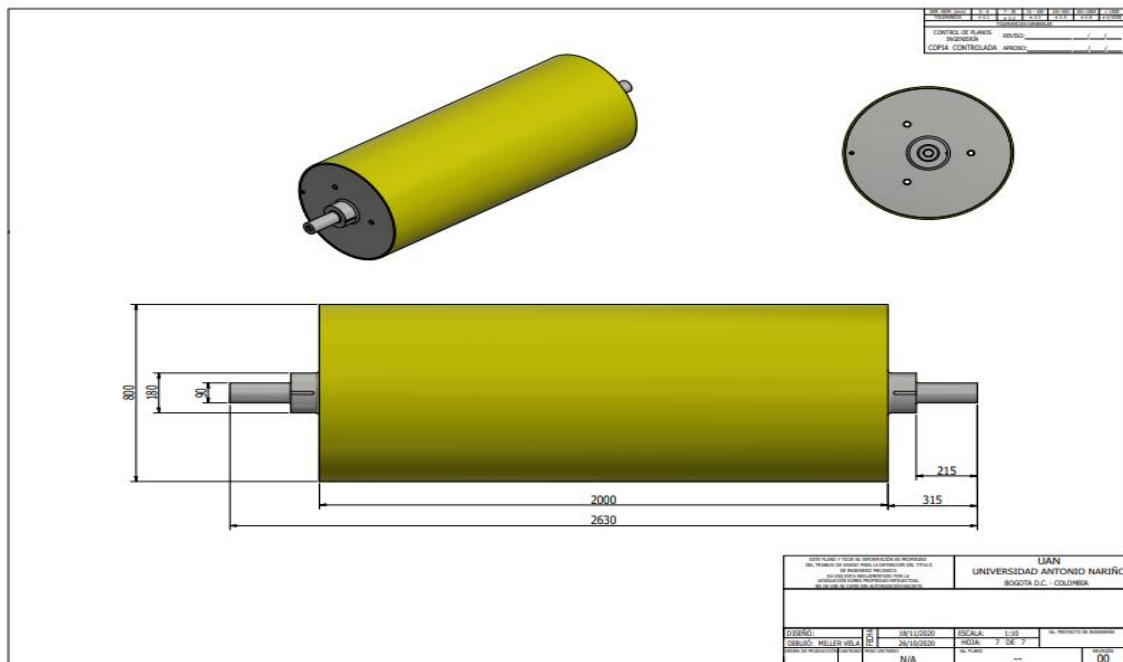
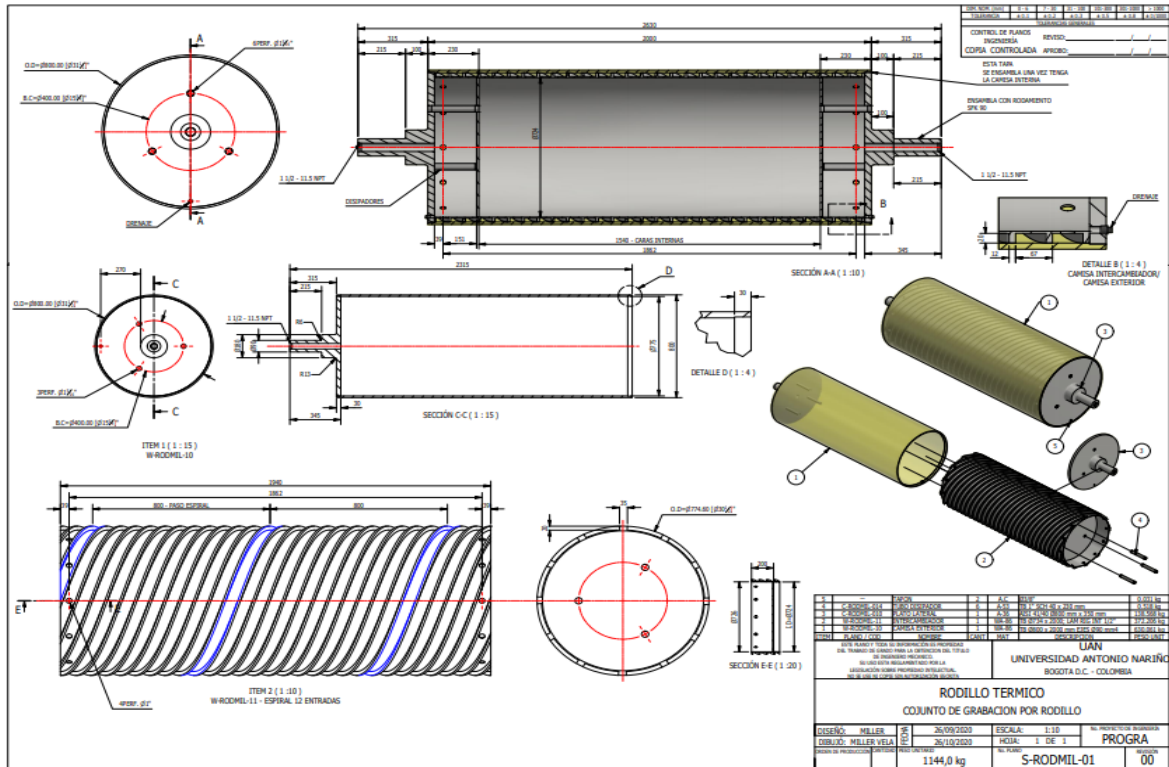
## C.2. Anexo: Resultados de tensiones y estrés para el material.

Resumen de resultados del análisis de reacciones y de estrés dado por el software de diseño Autodesk® Inventor® student.

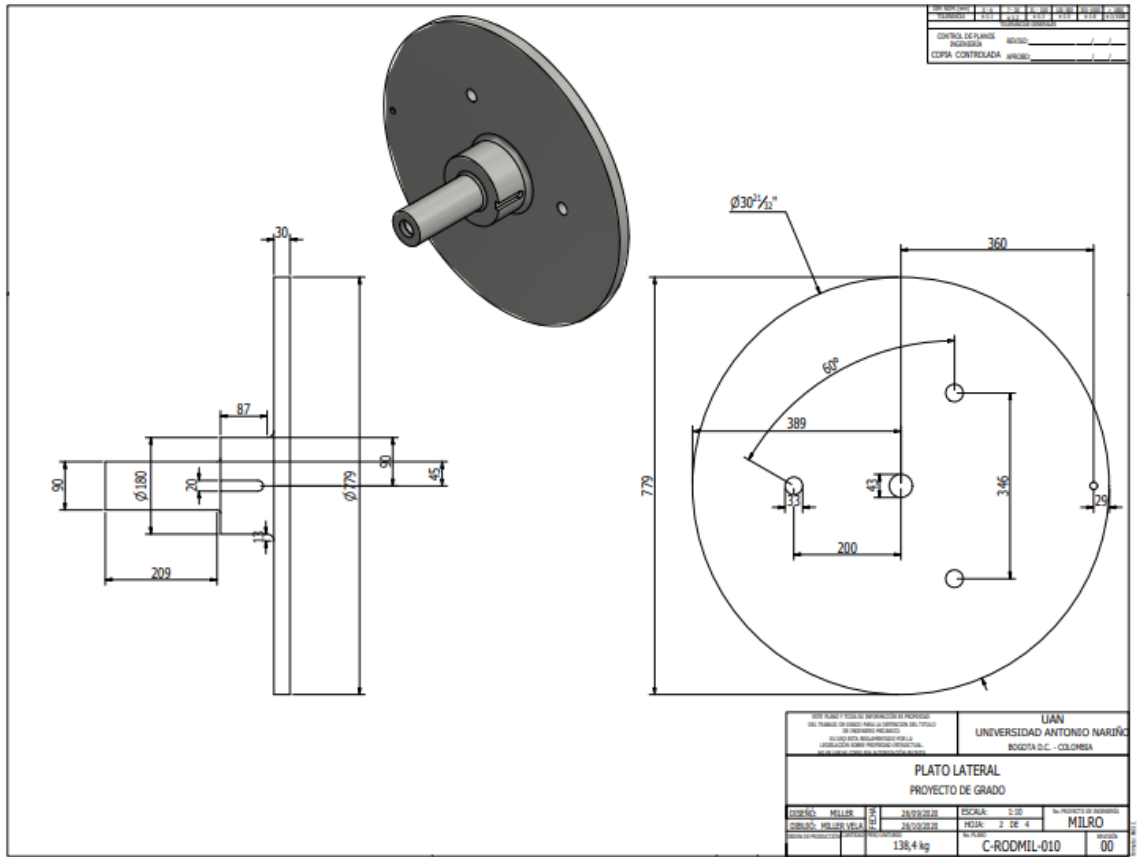
nombre	mínimo	máximo
volumen	145508000 mm <sup>3</sup>	
masa	1143,69 kg	
Estrés de Von Mises	0,000127479 MPa	34,7249 MPa
1er estrés principal	-7,6425 MPa	43,495 MPa
3er estrés principal	-45,4779 MPa	9,38518 MPa
desplazamiento	0 mm	0,00640548 mm
Factor de seguridad	5.96115 ul	15 ul
Estrés XX	-42,2953 MPa	40,8506 MPa
Tensión XY	-4,61118 MPa	4,81665 MPa
Tensión XZ	-12,9035 MPa	14,0475 MPa
Estrés YY	-15,1456 MPa	14,818 MPa
Estrés YZ	-1,39672 MPa	1,87817 MPa
ZZ de estrés	-10,7427 MPa	12,2302 MPa
X Desplazamiento	-0,00224038 mm	0,00222365 mm
Desplazamiento Y	-0,000343889 mm	0,000384644 mm
Desplazamiento Z	-0,00640547 mm	0,0000509377 mm
Cepa equivalente	0,000000000525136 ul	0,000149407 ul
1ª Cepa principal	-0,000000029228 ul	0,000170636 ul
3ª cepa principal	-0,000178335 ul	0,0000000131235 ul
Cepa XX	-0,000160018 ul	0,00015549 ul
Cepa XY	-0,0000267239 ul	0,0000279147 ul
Cepa XZ	-0,0000747818 ul	0,0000814117 ul
Tensión YY	-0,0000130566 ul	0,0000101838 ul
Tensión YZ	-0,00000809464 ul	0,0000108849 ul
Cepa ZZ	-0,0000406898 ul	0,0000545069 ul
Presión de contacto	0 MPa	4,03883 MPa
Presión de contacto X	-2.07232 MPa	2.365 MPa
Presión de contacto Y	-1.6168 MPa	1.0418 MPa
Presión de contacto Z	-3.7848 MPa	1.92785 MPa

# Anexo D. Diseño mecánico del rodillo térmico para aceite.

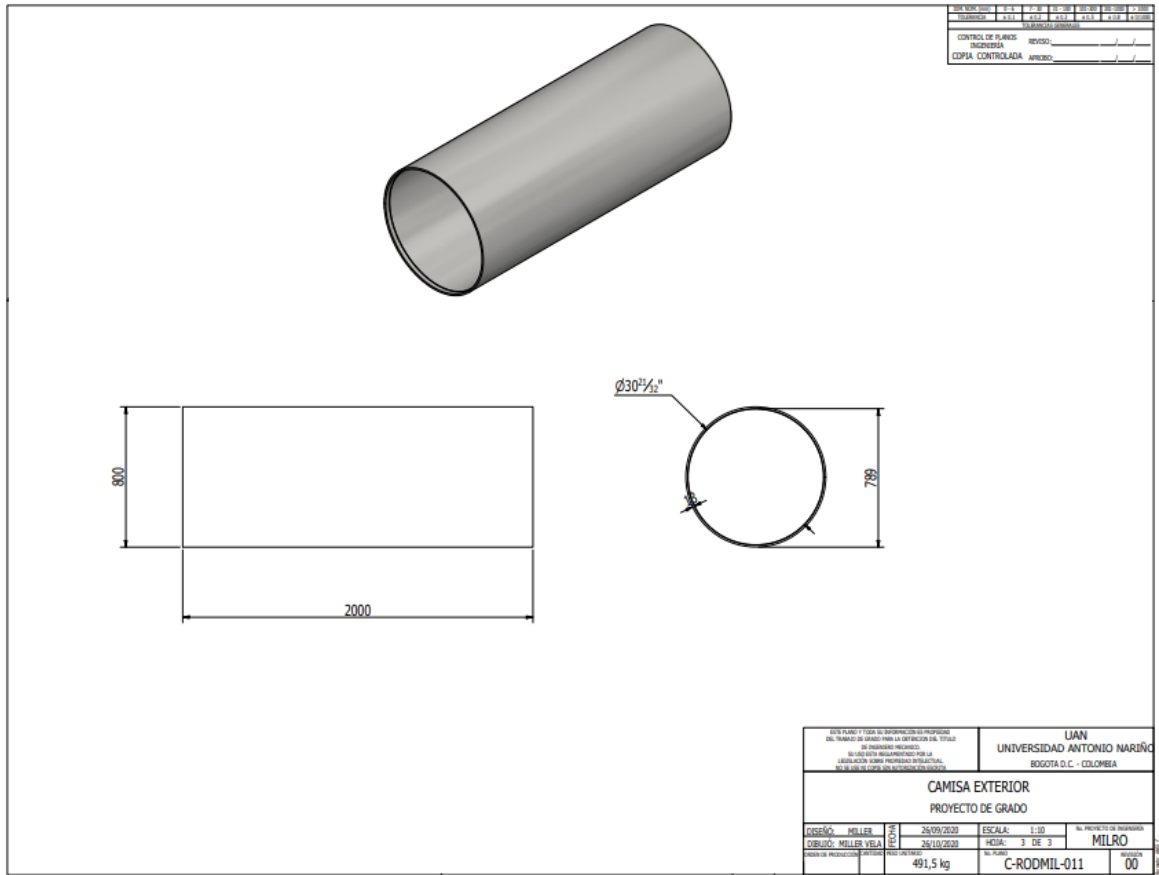
## D.1. Anexo: Plano de diseño y ensamble del rodillo.



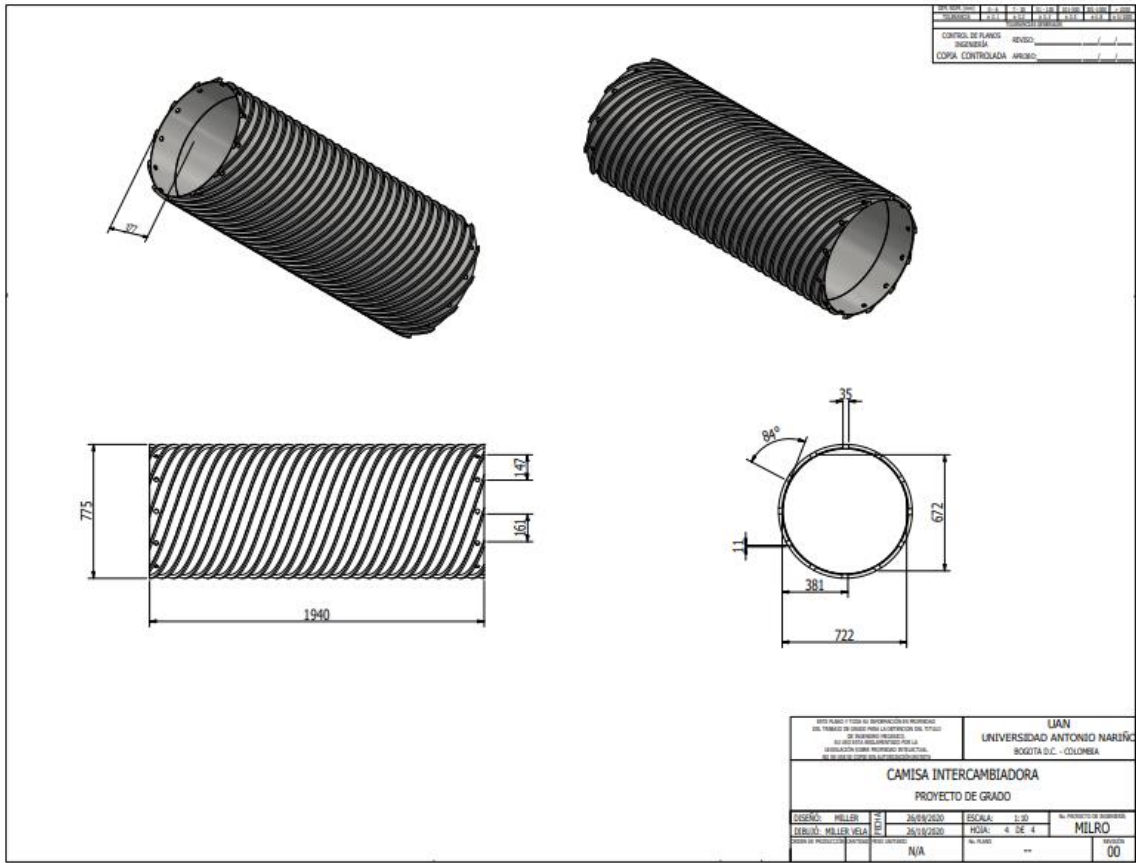
## D.2. Anexo: Pieza 1 Platos laterales.



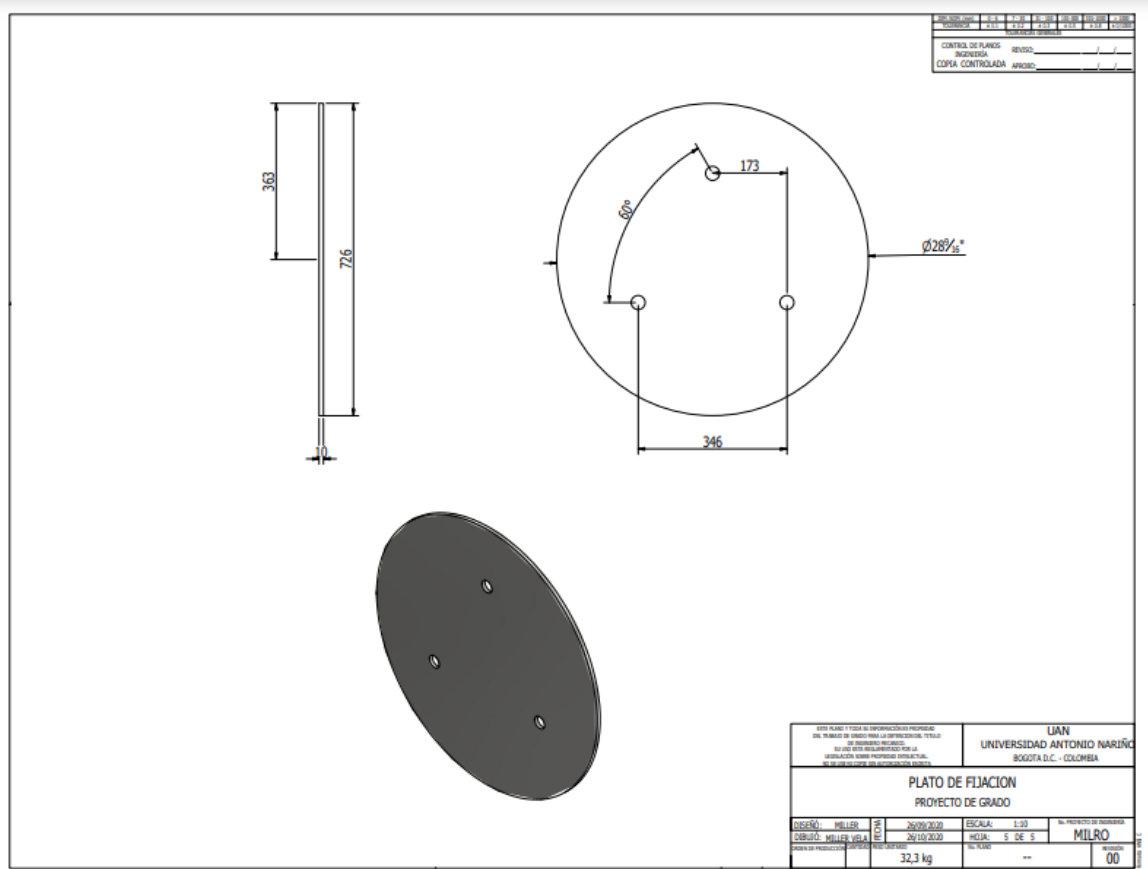
### D.3. Anexo: Pieza 2 Camisa exterior.



### D.4. Anexo: Pieza 3 Camisa intercambiadora.

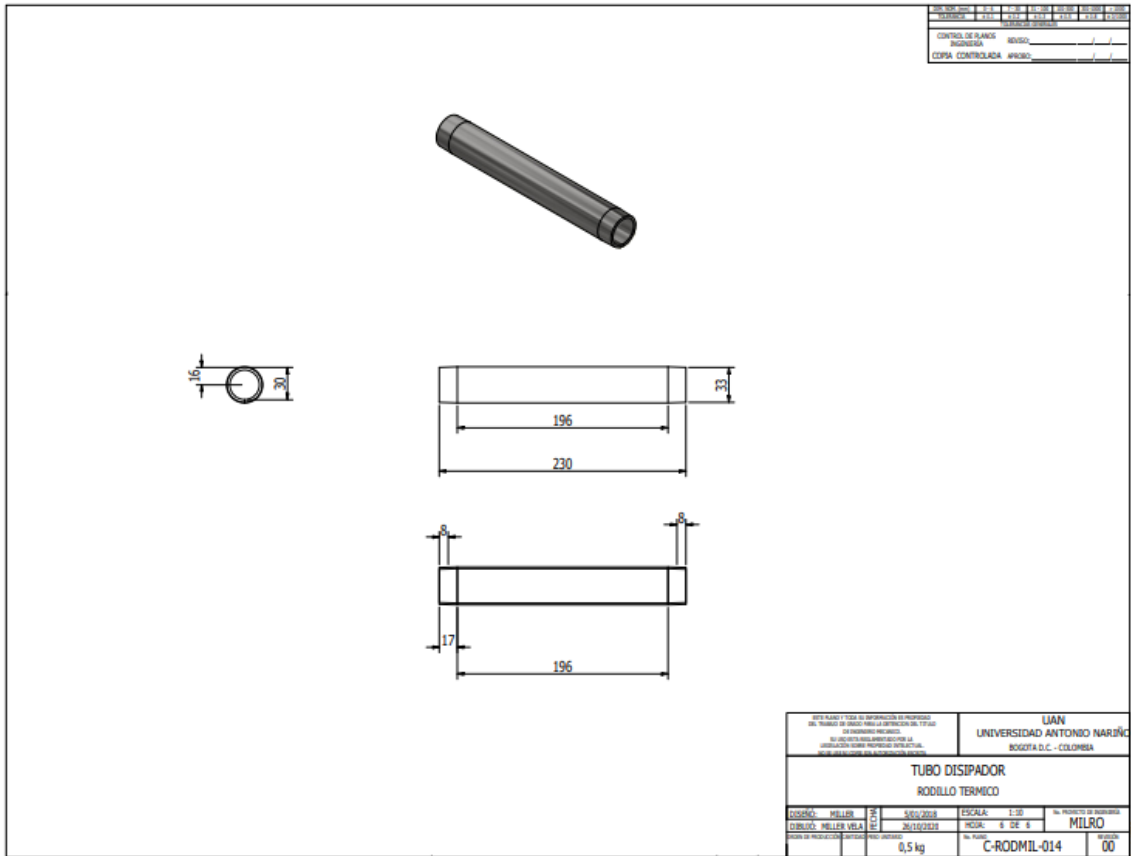


## D.5. Anexo: Pieza 4 Platos de fijación lateral.





## D.6. Anexo: Pieza 5 Tubos disipadores.

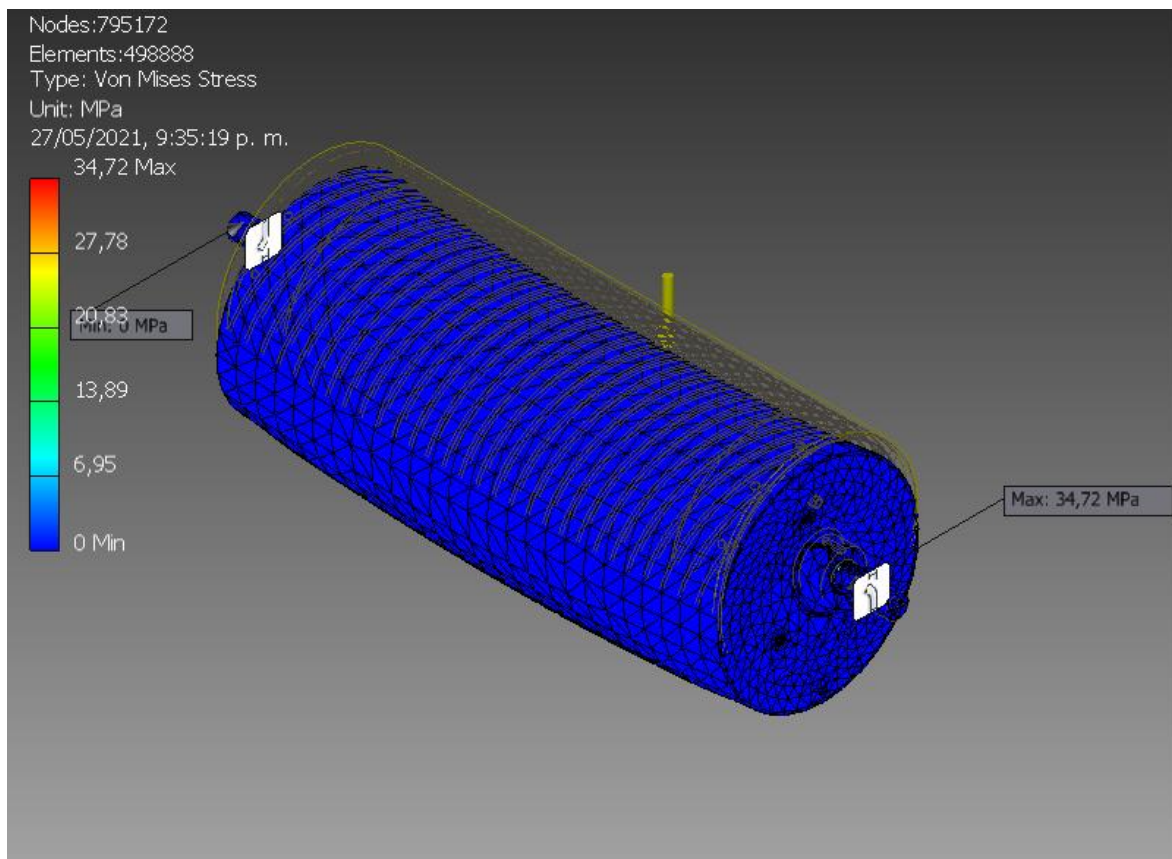


## Anexo E.

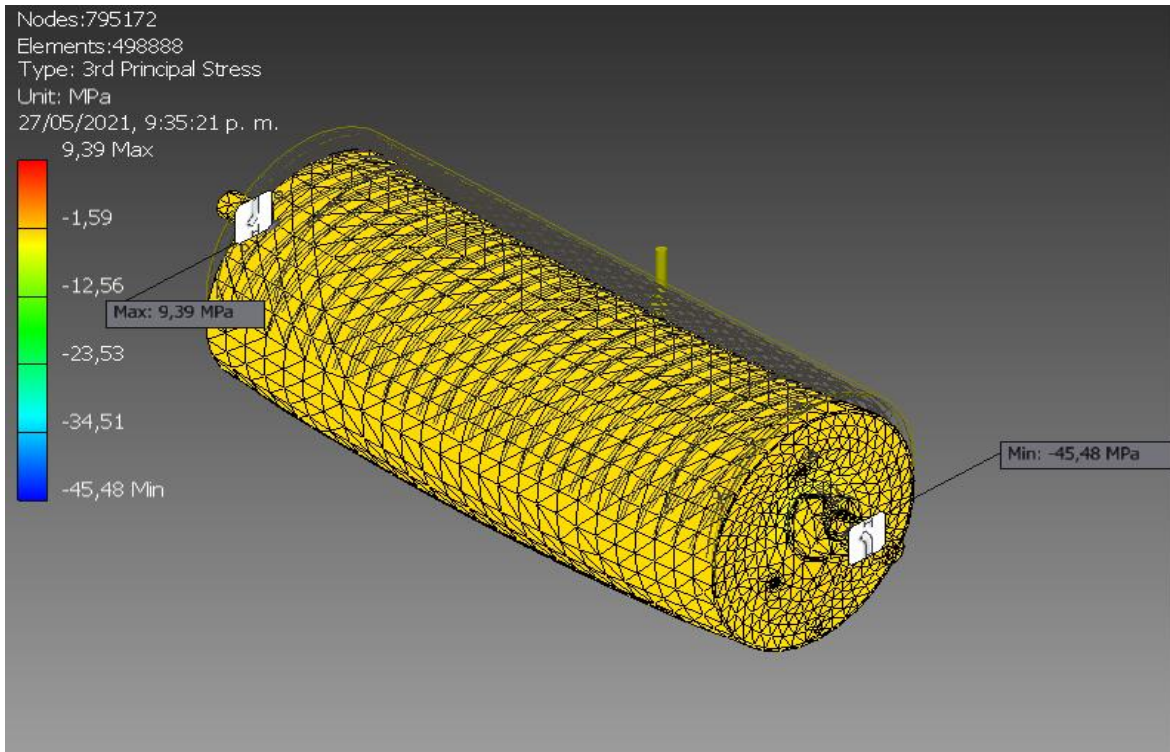
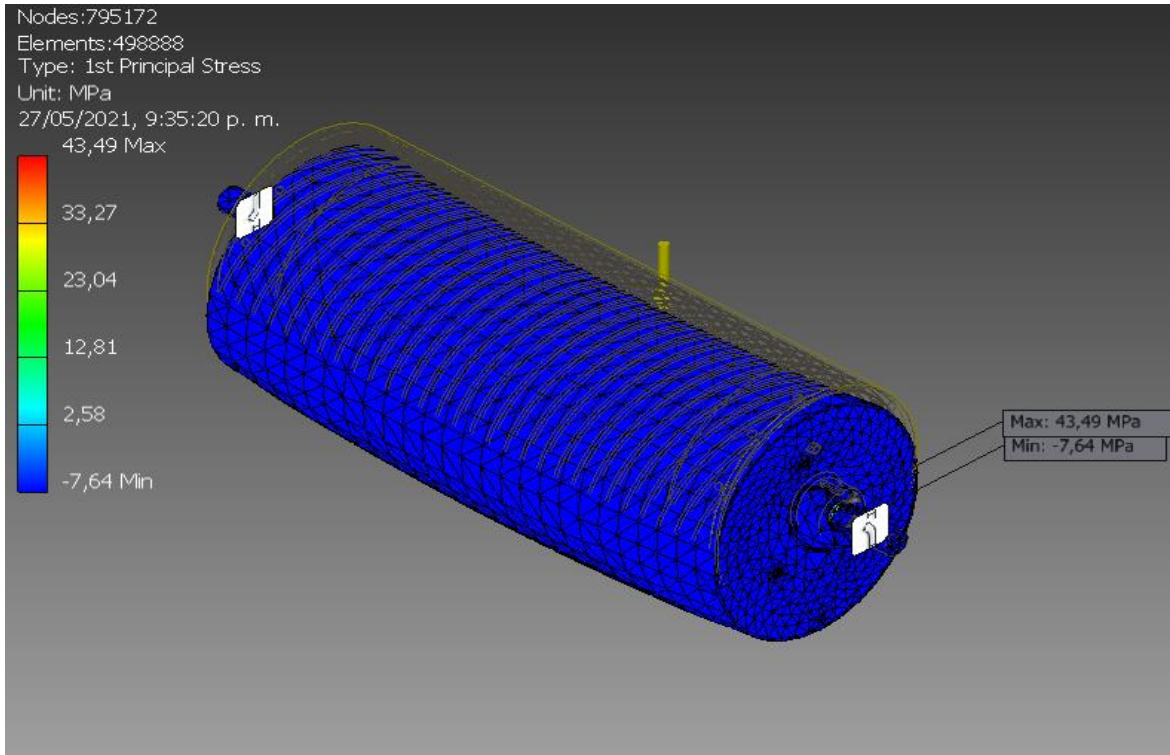
### Simulación mecánica del rodillo.

#### E.1. Anexo: Esfuerzo máximo de Von Mises.

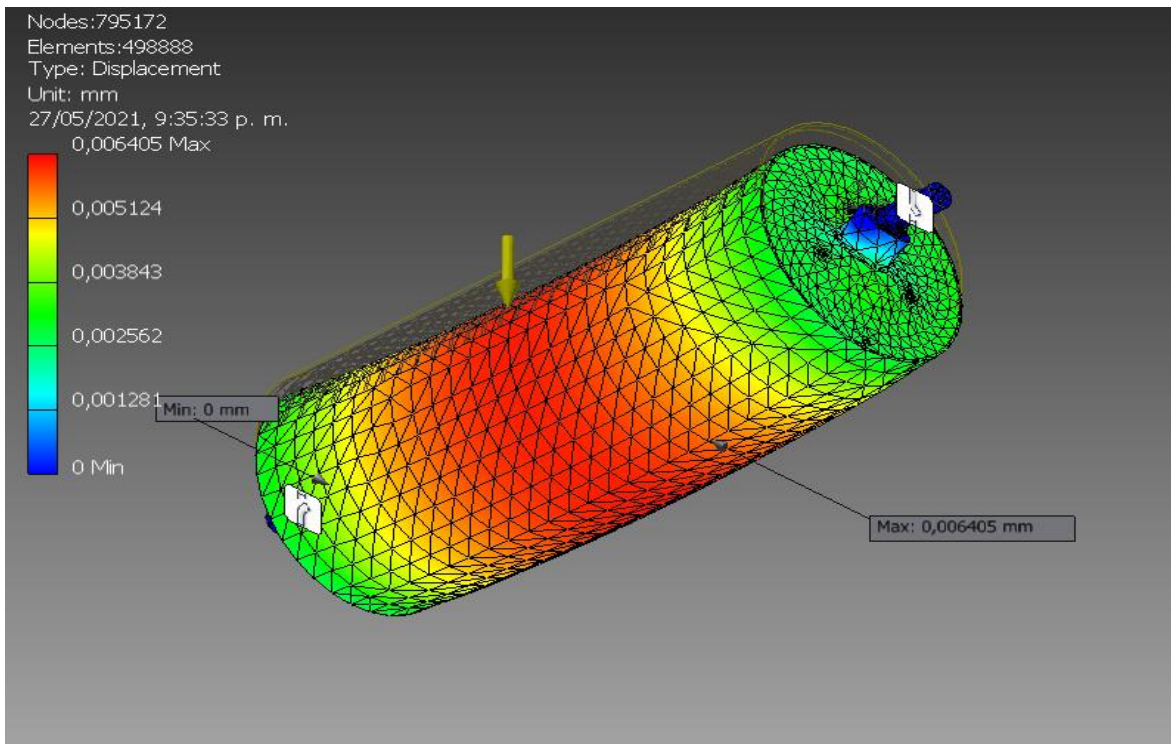
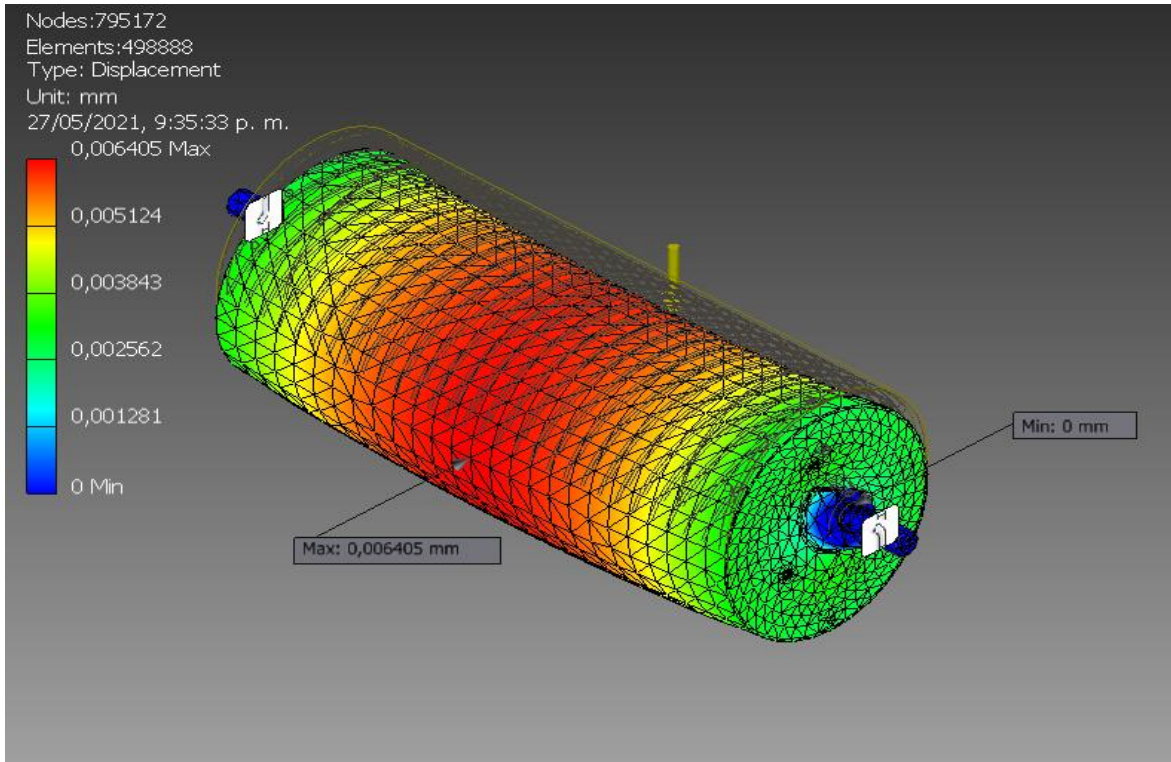
Resultados de simulación obtenidos por el software de diseño Autodesk® Inventor® student.



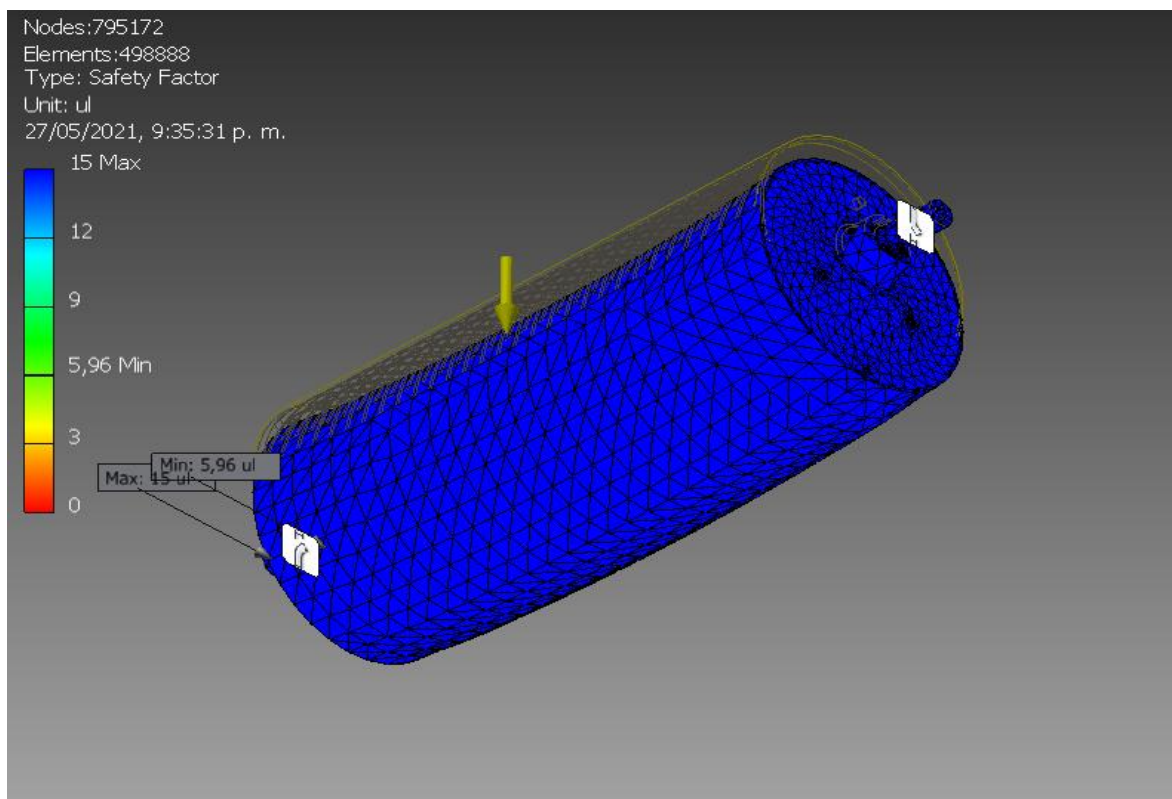
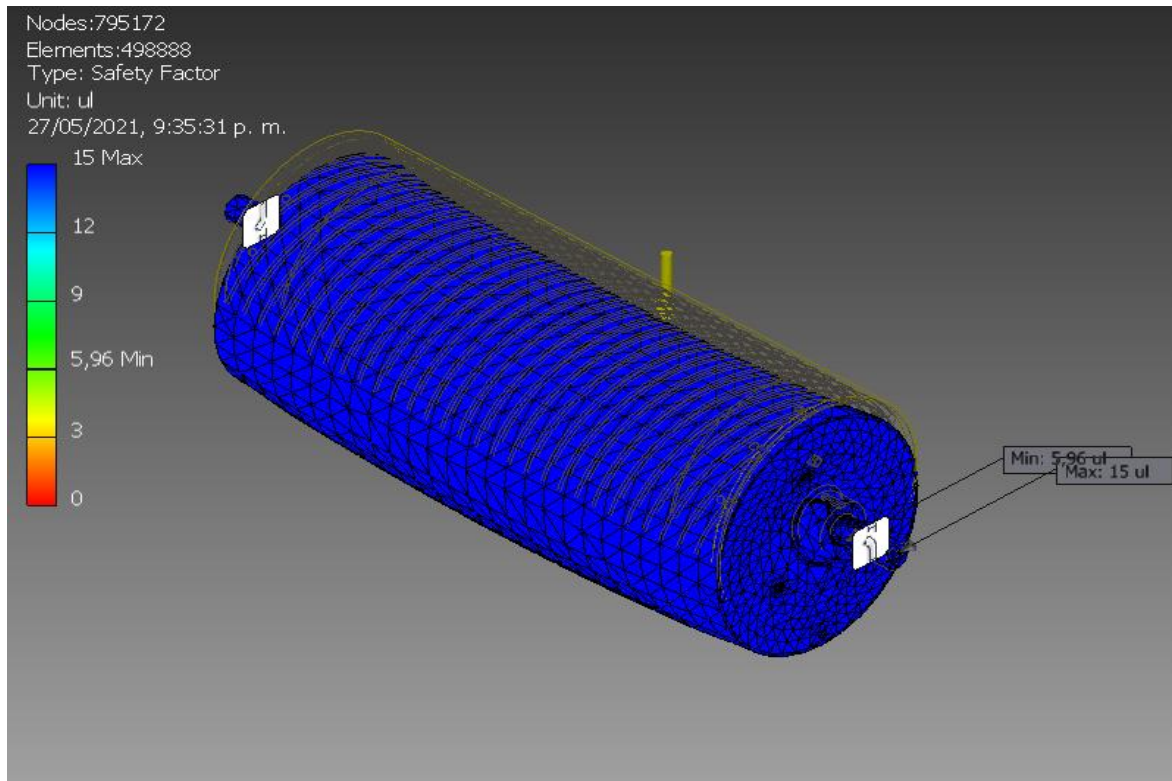
## E.2. Anexo: estrés principal.



## E.3 Anexo: De desplazamiento.

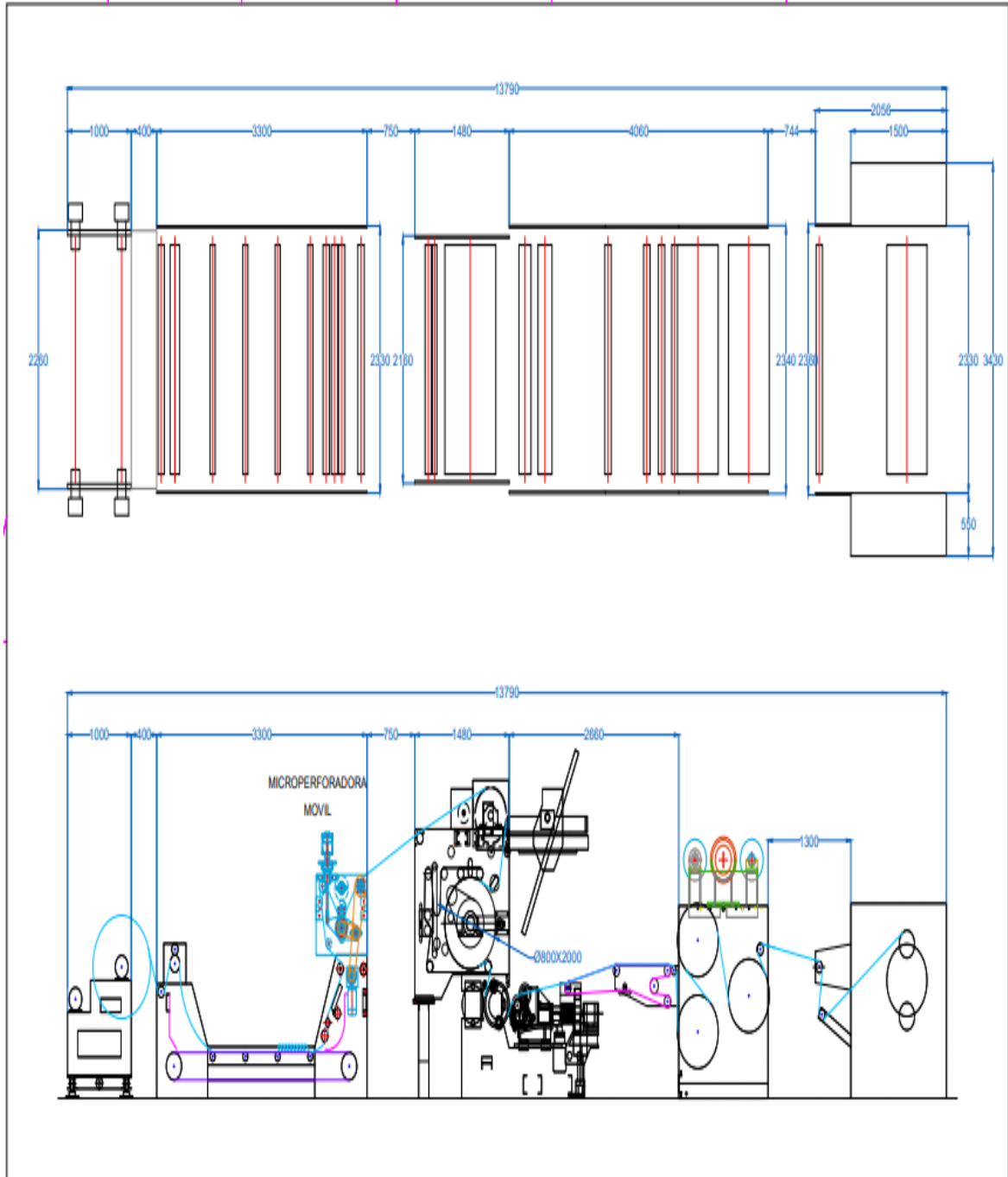


## E.4. Anexo: Factor de seguridad.




## Anexo F.

### F.1. Anexo: Plano de la Máquina con el Sistema de Grabar.



## Anexo G.

### G.1. Anexo: Información del aceite térmico que se trabaja en PROQUINAL S.A.S.



Mobiltherm 600 Series  
Mobil Industrial, Colombia  
Aceites de transferencia de calor

**Descripción del product**

Los aceites de transferencia de calor Mobiltherm son productos de alto desempeño destinados a usarse en instalaciones de calentamiento indirecto cerradas. Se recomiendan para usarse en sistemas sellados con aceite frío, de calentamiento indirecto y de enfriamiento en todo tipo de procesos industriales.

Los aceites de transferencia de calor Mobiltherm están formulados con aceites base altamente refinados que son resistentes al craqueo térmico y a la oxidación química. Son muy estables térmicamente y son capaces de proporcionar una vida de servicio extremadamente larga sin formación de depósitos ni incremento en la viscosidad.

Los aceites de transferencia de calor Mobiltherm tienen buena eficiencia de transferencia de calor y sus viscosidades son tales que pueden bombearse fácilmente tanto a la temperatura de arranque como a la de operación. Demuestran valores de calor específico y de conductividad térmica que proporcionan una disipación más rápida del calor. Los puntos de inflamación de estos aceites no disminuirán significativamente en servicio debido a su resistencia al craqueo térmico a las temperaturas de operación para las que son recomendados.

**Propiedades y Beneficios**

Los aceites Mobiltherm son miembros importantes de la marca Mobil de fluidos especiales que han ganado una reputación por su desempeño y confiabilidad, inclusive en aplicaciones severas. Las técnicas de refinación modernas son un factor clave en la obtención de las excelentes características del producto.

Mobiltherm 600 proporciona los siguientes beneficios:

Propiedades	Ventajas y beneficios potenciales
Alta resistencia al craqueo y descomposición térmicos	Ausencia de depósitos de lodos y de coque, una mínima interferencia con la capacidad de transferencia de calor y mínimas necesidades de mantenimiento
Excelentes propiedades térmicas	Altas tasas de transferencia de calor, mejor eficiencia operativa y menores costos operativos
Buena estabilidad térmica y oxidativa	Larga vida de servicio libre de problemas y menor tiempo muerto
Buena fluidez a bajas	Fácil arranque de los sistemas fríos

### Aplicaciones

Consideraciones sobre las aplicaciones: Los aceites de transferencia de calor Mobiltherm no deben mezclarse con otros aceites ya que esto puede afectar a su excelente estabilidad térmica y contra la oxidación resultando en un cambio en otras propiedades y complicar los análisis destinados a determinar la vida útil del aceite. Si los aceites son usados por encima de sus temperaturas máximas recomendadas, puede resultar bloqueo por vapor a menos que el sistema esté diseñado para operar a temperatura más alta mediante la presurización con un gas inerte como el nitrógeno. A temperaturas más altas, la vida útil del fluido será acortada debido a que la tasa de degradación térmica aumenta marcadamente cuando la temperatura sube por encima del límite recomendado. En sistemas bien diseñados, la temperatura de la película del aceite que rodea el elemento calentador debería estar alrededor de 15°C a 30°C por encima de la temperatura de bulbo del aceite. Si es más alta que esto, la vida útil de servicio del aceite puede acortarse y lodos y coque pueden depositarse interfiriendo con las tasas de transferencia de calor.

Al igual que con otros aceites minerales, los aceites de transferencia de calor Mobiltherm deberían ser usados sólo en sistemas con circulación forzada. Los sistemas que dependen de la convección para la circulación del medio de transferencia de calor no proporcionan un flujo lo suficientemente rápido para prevenir el sobrecalentamiento local y el rápido deterioro del aceite. Además, estos aceites no son recomendados para usarse en sistemas abiertos donde el aceite caliente quede expuesto directamente al aire. Si producen una niebla o se escapan a través de puntos de fuga, los aceites Mobiltherm calientes pueden encenderse espontáneamente.

Los aceites Mobiltherm Serie 600 se pueden utilizar en instalaciones abiertas y cerradas, donde los intervalos de temperatura de bulbo del aceite son según se indican en la siguiente tabla.

- Mobiltherm 603: Sistemas cerrados (-15° C a 285° C), sistemas abiertos (-15° C a 150° C)
- Mobiltherm 605: Sistemas cerrados (-12° C a 315° C), sistemas abiertos (-12° C a 180° C)
- Mobiltherm 610: Sistemas abiertos (-6° C a 250° C)
- Mobiltherm 611: Sistemas abiertos (-6° C a 275° C)

### Características típicas

<b>Mobiltherm 600 Series</b>	<b>603</b>	<b>605</b>	<b>610</b>	<b>611</b>
Viscosidad, ASTM D 445				
cSt @ 40 °C	20.2	30.4	113	490
cSt @ 100°C	4.2	5.4	11.5	31.5
Punto mínimo de fluidez, °C, ASTM D 97	-15	-12	-6	-6
Punto de inflamación, °C, ASTM D 92	194	230	250	294



### Seguridad e Higiene

Con base en la información disponible, no es de esperar que este producto cause efectos adversos en la salud mientras se utilice en las aplicaciones para las que está destinado y se sigan las recomendaciones de la Ficha de Datos de Seguridad (MSDS). Las Fichas de Datos de Seguridad están disponibles a través del Centro de Atención al Cliente. Este producto no debe utilizarse para otros propósitos distintos a los recomendados. Al deshacerse del producto usado, tenga cuidado de proteger el medio ambiente.

El logotipo de Mobil, el diseño Pegaso, y Mobiltherm son marcas de fábrica de Exxon Mobil Corporation o de alguna de sus subsidiarias.

ExxonMobil de Colombia S.A.  
Calle 90 N° 21-32 , Bogota , Colombia

(571) 628 - 0460

Las características típicas son típicas de aquellas obtenidas con la tolerancia de la producción normal y no constituyen una especificación. Durante la fabricación normal y en los diferentes lugares de mezcla son esperadas variaciones que no afectan el desempeño del producto. La información aquí contenida está sujeta a cambios sin previo aviso. Todos los productos pueden no estar disponibles localmente. Para obtener más información, comuníquese con su representante local de ExxonMobil, o visite [www.exxonmobil.com](http://www.exxonmobil.com)  
ExxonMobil se compone de numerosas filiales y subsidiarias, muchas de ellas con nombres que incluyen Esso, Mobil o ExxonMobil. Nada en este documento está destinado a invalidar o sustituir la separación corporativa de entidades locales. La responsabilidad por la acción local y la contabilidad permanecen con las entidades locales afiliadas a ExxonMobil.

## Anexo H.

### H.1. Anexo: Analizador de gases de PROQUINAL S.A.S.



## H.2. Anexo: Lecturas de análisis en la caldera de vapor.

testo 330-1 LL

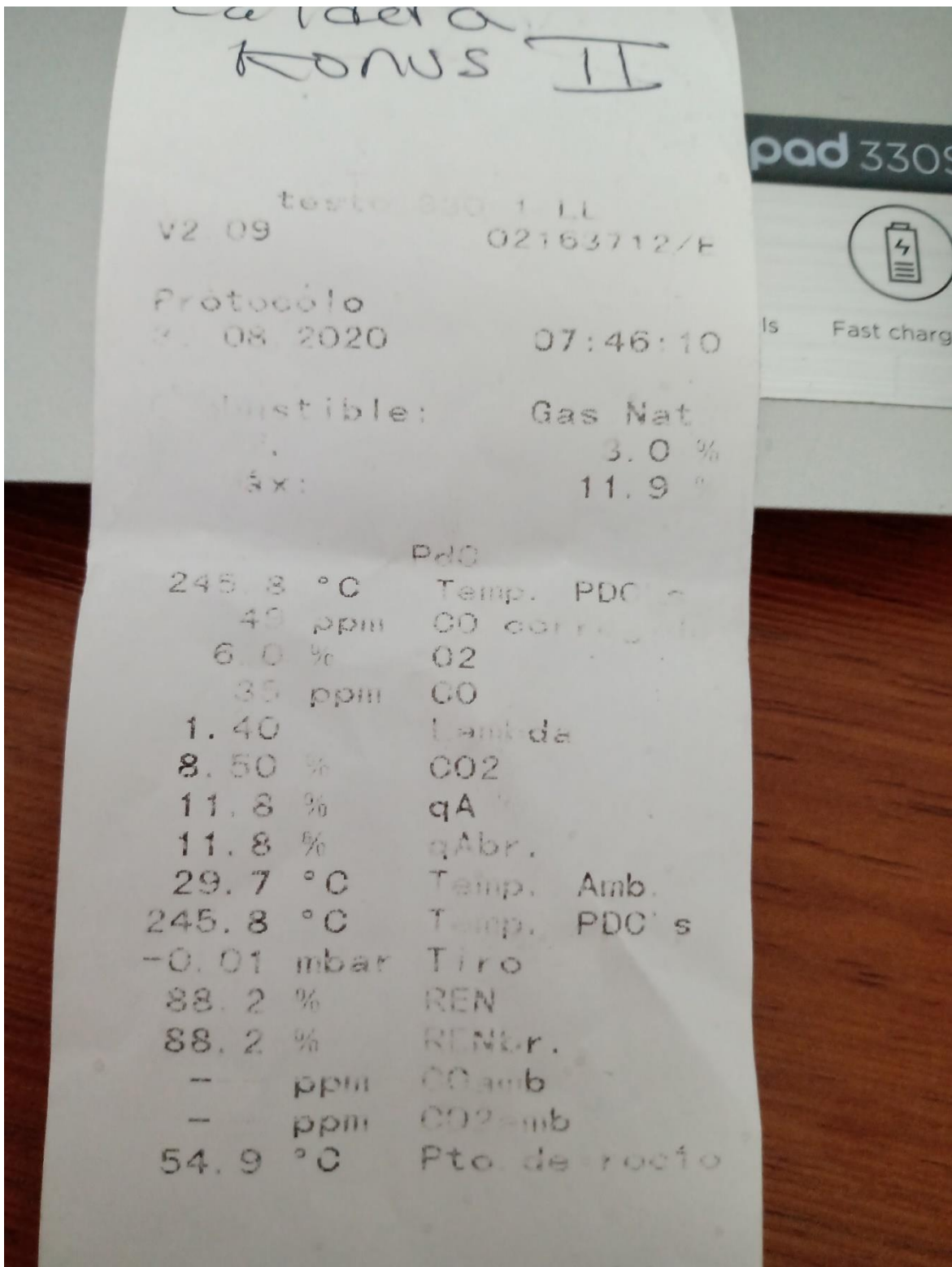
V2.09 02163712/E

Protocolo  
18.01.2021 21:51:30

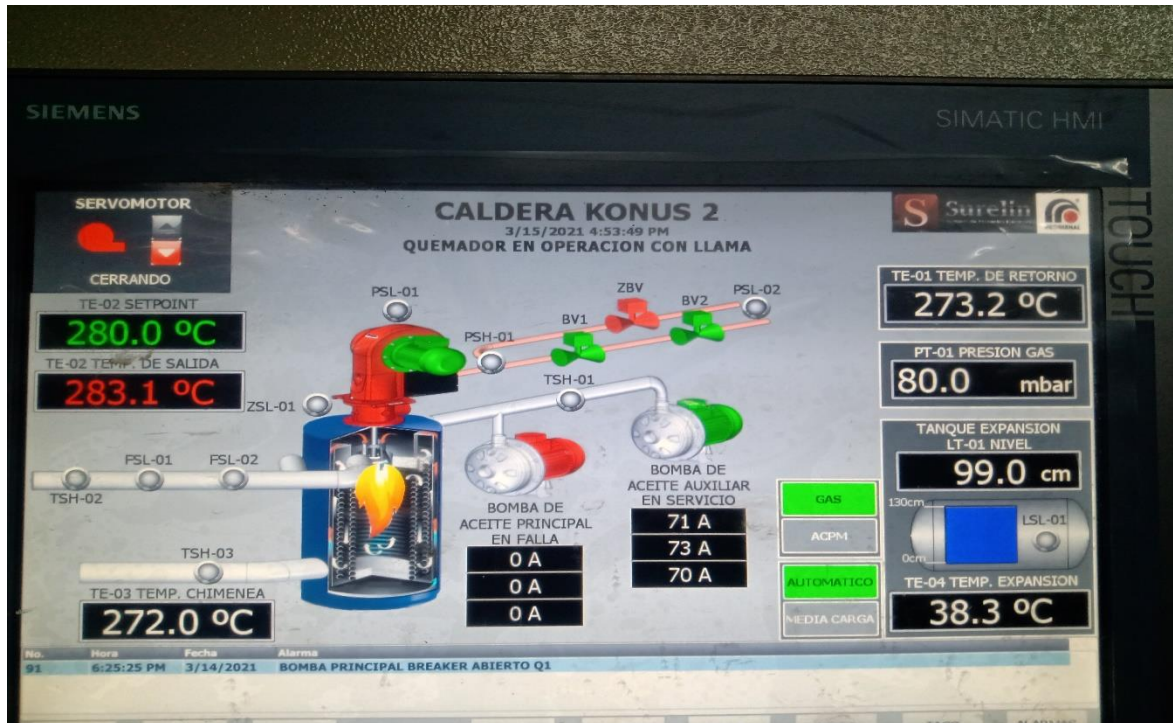
Combustible: Gas Nat.  
O2ref. 3.0 %  
CO2Máx: 11.9 %

218.9 °C	PdC	Temp. PDC's
21 ppm		CO corregido
4.8 %		O2
16 ppm		CO
1.30		Lambda
9.18 %		CO2
9.9 %		qA
9.9 %		qAbr.
24.5 °C		Temp. Amb.
218.9 °C		Temp. PDC's
0.01 mbar		Tiro
90.1 %		REN
90.1 %		RENbr.
— ppm		COamb
— ppm		CO2amb
55.1 °C		Pto. de rocío

### H.3. Anexo: Lecturas de análisis en la caldera de aceite térmico.



## H.4. Anexo: Variables de trabajo de la caldera de aceite térmico.



## Anexo I

### I.1. Anexo: Participación VI simposio internacional SISEM 2021.



Diseño de un sistema de transferencia de calor con aceite térmico para grabación por rodillo en una empresa de telas vinílicas.

