



**Diseño de fuente de alimentación de energía térmica para un sistema de aceite
térmico independiente al proceso de combustión en planta de generación eléctrica**

Diego Felipe Barrios Araujo

11131027702

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Electromecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá D.C., Colombia

2022

**Diseño de fuente de alimentación de energía térmica para un sistema de aceite
térmico independiente al proceso de combustión en planta de generación eléctrica**

Diego Felipe Barrios Araujo

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

Ingeniero Electromecánico

Director:

I.M., M.Sc., Ph.D., Nicolás Giraldo Peralta

Línea de Investigación:

Energía y ciencias térmicas.

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Electromecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá D.C., Colombia

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado
Diseño de fuente de alimentación de energía térmica para
un sistema de aceite térmico independiente al
proceso de combustión en planta de generación
eléctrica,
Cumple con los requisitos para optar al título de
Ingeniero electromecánico.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Bogotá, 10 mayo 2022.

Contenido

| | Pág. |
|--|-------------|
| Glosario..... | VIII |
| Preliminares..... | XV |
| Resumen..... | 1 |
| Abstract..... | 2 |
| Introducción | 3 |
| 1. Características del proyecto | 8 |
| 1.1 Antecedentes | 8 |
| 1.2 Objetivos | 8 |
| 1.3 Justificación..... | 10 |
| 1.4 Metodología | 11 |
| 1.4.1 Levantamiento de información..... | 12 |
| 1.4.2 Análisis de información..... | 12 |
| 1.4.3 Diseño..... | 13 |
| 1.4.4 Ubicación del diseño | 13 |
| 1.4.5 Elaboración del documento | 14 |
| 2. Descripción del sistema termomecánico del aceite térmico | 15 |
| 2.1 Sistema termomecánico de planta 1 | 16 |
| 2.1.1 Calentamiento del sistema de aceite térmico..... | 16 |
| 2.1.2 Calentamiento del sistema combustible | 19 |
| 2.1.3 Calentamiento del sistema lubricante..... | 23 |
| 2.1.4 Calentamiento del sistema de lodos..... | 25 |
| 2.1.5 Medios de transferencia térmica en los fluidos de proceso | 26 |
| 2.2 Sistema termomecánico planta 2..... | 28 |
| 2.2.1 Calentamiento del sistema de aceite térmico..... | 28 |
| 2.2.2 Calentamiento del sistema de combustible..... | 30 |
| 2.2.3 Calentamiento del sistema de aceite lubricante..... | 30 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.2.4 | Calentamiento del sistema de lodos..... | 31 |
| 2.2.5 | Medios de transferencia térmica en los fluidos de proceso | 31 |
| 3. | Análisis de energía térmica en el sistema actual | 33 |
| 3.1 | Cálculo de coeficientes de convección..... | 33 |
| 3.2 | Cálculo de resistencia térmica..... | 38 |
| 3.3 | Cálculo de pérdidas de energía en tuberías. | 41 |
| 3.4 | Levantamiento de energía transferida | 42 |
| 3.4.1 | Purificadoras de aceite lubricante..... | 42 |
| 3.4.2 | Purificadoras de combustible..... | 42 |
| 3.4.3 | Calentadores de combustible | 43 |
| 3.4.4 | Tanques..... | 43 |
| 3.4.5 | Pit de lodos | 43 |
| 3.5 | Consumo de energía calórica de la planta..... | 43 |
| 3.6 | Condición actual de la planta | 45 |
| 4. | Alternativas de ganancia de calor | 46 |
| 4.1 | Soluciones operativas..... | 46 |
| 4.2 | Aprovechamiento de puntos calientes..... | 47 |
| 4.3 | Equipos con quemador | 48 |
| 4.4 | Calentador resistivo..... | 48 |
| 5. | Calentador resistivo..... | 50 |
| 5.1 | Resistencia blindada..... | 51 |
| 5.1.1 | Funda | 52 |
| 5.1.2 | Material aislante | 53 |
| 5.1.3 | Hilo resistivo..... | 53 |
| 5.1.4 | Elemento sellador | 54 |
| 5.1.5 | Elementos de fijación | 55 |
| 5.2 | Tanque de circulación | 56 |
| 5.3 | Conexión eléctrica..... | 56 |
| 6. | Selección del equipo calefactor | 57 |
| 6.1 | Cálculo prototipo A..... | 58 |
| 6.2 | Cálculo prototipo B | 60 |
| 6.3 | Selección del prototipo..... | 61 |
| 7. | Diseño del calentador resistivo | 64 |
| 7.1 | Cálculo del diámetro del hilo resistivo..... | 66 |
| 7.2 | Cálculo de longitud del hilo resistivo..... | 68 |
| 7.3 | Cálculo de tubo blindado..... | 69 |
| 7.4 | Cálculo de elemento resistivo | 70 |

| | | |
|--|--|------------|
| 7.5 | Cálculo de racor y terminales..... | 72 |
| 7.6 | Cálculo de cilindro calentador..... | 74 |
| 7.7 | Conexión eléctrica..... | 80 |
| 7.7.1 | Generalidades | 80 |
| 7.7.2 | Acometida principal de baja tensión para el tablero..... | 82 |
| 7.7.3 | Parciales, grupos de resistencias..... | 83 |
| 7.7.4 | Circuito resistencia individual | 84 |
| 7.7.5 | Cálculo de secciones con factores de corrección..... | 84 |
| 7.7.6 | Tablero de protección TPG-CA..... | 86 |
| 7.7.7 | Ductos para conductores..... | 86 |
| 7.7.8 | Sistema de puesta a tierra. | 87 |
| 7.7.9 | Distancias de seguridad | 87 |
| 7.8 | Análisis energético del equipo instalado..... | 87 |
| Conclusiones | | 90 |
| Recomendaciones | | 95 |
| Referencias Bibliográficas..... | | 98 |
| Anexos | | 102 |

Lista de Figuras

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1–1: Diagrama metodología..... | 11 |
| Figura 2–1: Esquema general planta Puerto Gaitán. | 15 |
| Figura 2–2: Caldera o recuperador de calor. | 17 |
| Figura 2–3: Colector de alta y baja temperatura..... | 18 |
| Figura 2–4: Enfriador de aceite térmico. | 18 |
| Figura 2–5: Tanque de almacenamiento de combustible. | 20 |
| Figura 2–6: Purificadora de combustible..... | 20 |
| Figura 2–7: Tanque de servicio diario de combustible..... | 21 |
| Figura 2–8: Módulo de pre-presión de combustible..... | 22 |
| Figura 2–9: Motor y equipos auxiliares..... | 22 |
| Figura 2–10: Calentador de combustible..... | 23 |
| Figura 2–11: Purificadora de aceite lubricante..... | 24 |
| Figura 2–12: Tanque de lodos. | 26 |
| Figura 2–13: Intercambiador de calor de purificadoras..... | 27 |
| Figura 2–14: Bombas del sistema de aceite térmico. | 28 |
| Figura 2–15: Caldera o recuperador de calor planta 2..... | 29 |
| Figura 3–1: Diámetros de tubería aislada. | 39 |
| Figura 5–1: Tipos de calentadores..... | 50 |
| Figura 5–2: Tipos de resistencia. | 51 |
| Figura 5–3: Resistencias de inmersión y paso..... | 52 |
| Figura 5–4: Elemento tubular. | 54 |
| Figura 6–1: Resistencia tipo horizontal. | 59 |
| Figura 6–2: Diseño de prototipo A. | 60 |
| Figura 6–3: Diseño prototipo B. | 61 |
| Figura 7–1: Resistencia con elementos en triple vuelta. | 71 |
| Figura 7–2: Esquema elemento blindado calculado. | 72 |
| Figura 7–3: Área de curvas del elemento. | 73 |
| Figura 7–4: Terminal de elemento tubular. | 74 |

| | | |
|--------------------|--|----|
| Figura 7-5: | Temperaturas de aceite térmico en purificadoras de combustible. | 77 |
| Figura 7-6: | Esquema del cilindro calentador. | 78 |

Lista de tablas

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 4-1: Alternativas de fuentes de calor..... | 46 |
| Tabla 6-1: Elementos de prototipo A según relación $d \cdot l$ | 59 |
| Tabla 6-2: Elementos del prototipo B..... | 61 |
| Tabla 6-3: Comparación prototipo A y B. | 62 |
| Tabla 7-1: Carga térmica según diámetros de tubería..... | 70 |
| Tabla 7-2: Cuadro de carga del calentador. | 82 |
| Tabla 7-3: Resumen intensidades para elección de secciones. | 85 |
| Tabla 7-4: Conductores y protección eléctrica..... | 86 |
| Tabla 7-5: Selección de ducto..... | 87 |

Glosario

Aceite térmico: Aceite con ciertas características térmicas utilizado para llevar calor de un lugar determinado hasta otro, después de haber obtenido una ganancia térmica por algún medio.

Aire de combustión: Se refiere al aire comprimido que se utiliza en la reacción dentro de la cámara de combustión. El flujo de este aire es lo que determina el aumento de potencia en los motogeneradores.

Bomba de circulación: Dispositivo cuya función es incrementar la presión de fluidos de proceso. Las hay para el sistema de combustible, para el aceite térmico y para el aceite lubricante.

Bomba de inyección: Dispositivo cuya función es incrementar la presión de combustible al ritmo de los inyectores, para lograr la dosificación del combustible en la cámara de combustión. Están sincronizados por medio de un árbol de levas con el cigüeñal.

Bowl: Hace referencia al tazón o espacio de las purificadoras donde se separan los sólidos y el agua del fluido, bien sea combustible o aceite lubricante, gracias a la fuerza centrífuga.

Caldera: En el léxico de la planta se refiere a los equipos instalados donde se realiza el intercambio de calor entre los gases de combustión y el aceite térmico, siendo este último el que adquiere la ganancia térmica para aprovecharse en otros puntos de proceso. Hay un equipo por cada motor instalado por fuera de la sala de máquinas. En el presente documento también nos referimos a este equipo como recuperador de calor.

Calentador de combustible: Equipo que permite la transferencia de calor entre el aceite térmico y el combustible hasta obtener la viscosidad ideal para ser inyectado en los motogeneradores.

Cámaras de combustión: Espacio de los motores donde se realiza la mezcla de aire carburante y combustible produciendo la reacción de combustión.

Camión de vacío: Vehículo destinado a la recolección de fluidos en el campo petrolero y destinarlos a puntos especificados por el cliente. Tienen acoplados bombas para la succión y capacidades de almacenamiento entre 90 y 100 barriles.

Casa de tratamiento: Área donde se encuentra el conjunto de equipos que intervienen en el proceso de tratamiento y purificación del combustible y los equipos de bombeo para aceite lubricante. Es común para la planta 1 y 2.

Colector de alta temperatura: Depósito en forma cilíndrica dispuesto horizontalmente en la zona de bombeo de aceite térmico, cuya función es contener el aceite que ha recibido ganancia térmica en las calderas o intercambiadores de calor. Las bombas de distribución de aceite térmico se alimentan de este depósito para impulsar el aceite hacia toda la planta y lograr el intercambio de calor con los demás fluidos.

Colector de baja temperatura: Depósito en forma cilíndrica dispuesto horizontalmente en la zona de bombeo de aceite térmico, cuya función es contener el aceite que ha perdido energía térmica en los diferentes procesos de la planta. Las bombas de circulación de aceite térmico se alimentan de este depósito para impulsar el aceite hacia la caldera o intercambiador de calor y lograr ganancia térmica y finalmente retornar al colector de alta temperatura.

Cliente: Entidad dueña de la infraestructura de la planta de generación eléctrica, de los insumos utilizados en el proceso y quien dispone de la energía generada para su uso en diferentes campos de producción.

Crudo: Componente de los hidrocarburos y residuo de la refinería del petróleo con alta viscosidad y mezclado con diferentes proporciones de *Fuel Oil 4* para mejorar sus propiedades y poder utilizarse en la combustión en la moto generadores.

Dumping cooler: Conjunto de dispositivos que regulan la temperatura del aceite térmico de la planta 1 gracias al intercambio de calor entre este y agua de enfriamiento.

Damper: Se refiere al actuador instalados en los recuperadores de calor o calderas, que al articular direccionan los gases residuales de la combustión bien sea hacia el ambiente o hacia

los espirales de aceite térmico ubicados en su interior. Gracias a esa articulación se regula la temperatura del sistema de aceite térmico de la planta 2.

Fuel Oil 4: Producto obtenido del proceso de destilación atmosférica del petróleo crudo que contiene parafinas, olefinas y nafteros en diferentes proporciones, además de otros compuestos. En la planta de generación es utilizado en los arranques y paradas de los motogeneradores para minimizar el impacto ambiental cuando se genera a bajas potencias y limpiar internamente los ductos por donde ha circulado el crudo.

Gases residuales: Se refiere a los gases resultantes de la combustión en cada una de las cámaras de combustión en los motogeneradores. Estos son aprovechados para potenciar el aire de combustión por medio de los turbos compresores acoplados al motor y utilizados después para el calentamiento del aceite térmico.

Liqueos: Se refiere al combustible que no es quemado en las cámaras de combustión de cada motor. Los liqueos de cada planta son depositados en tanques locales y luego son direccionados al tanque de recibimiento de combustible para ser procesados nuevamente.

Pit: Depósito de aguas y aceites residuales del proceso de generación eléctrica, ubicados en diferentes zonas de las plantas. Los fluidos de estos depósitos son direccionados con bombas neumáticas hacia el tanque de lodos para su posterior evacuación.

Planta de generación eléctrica: Área donde se encuentra el conjunto de plantas interconectadas y la subestación eléctrica, que suministran energía eléctrica a equipos de bombeo en el campo petrolero.

Planta 1 (Fase 1): Área donde se encuentra el conjunto de equipos que intervienen en la generación eléctrica, incluyendo tanto la sala de máquinas, casa de tratamiento y la zona de patios. Esta planta tiene una capacidad instalada de generación de 22.5 MW.

Planta 2 (Fase 2): Área donde se encuentra el conjunto de equipos que intervienen en la generación eléctrica, incluyendo tanto la sala de máquinas, casa de tratamiento y la zona de patios. Esta planta tiene una capacidad instalada de generación de 32 MW.

Pre-presión: Equipo que cuenta con bombas que succionan el combustible desde el tanque de servicio diario sometiéndolo a un proceso de filtrado y lo direcciona finalmente hacia la sala de máquinas. También cuenta con bombas para *fuel oil* 4.

Purificadora: Equipo que utiliza la fuerza centrífuga para separar sólidos y agua de los fluidos que previamente han obtenido una ganancia de energía térmica. Las hay para combustible y para aceite lubricante.

Sala de máquinas: Zona donde se encuentra los motores de combustión acoplados a los generadores y equipos auxiliares de bombeo de fluidos.

Shutdown: Apagado de la planta

Sistema de aceite térmico: Conjunto de equipos y ductos por donde circula aceite térmico para la transferencia de calor en los diversos subprocesos de la planta.

Tanque de almacenamiento: Tanque que almacena el combustible no tratado o purificado proveniente del cliente.

Tanque de licores: Tanque que almacena el combustible residual del proceso de combustión de cada moto generador. Su capacidad es de 1 m³ y es calentado con aceite térmico para su fácil evacuación.

Tanque de lodos: Tanque donde convergen los lodos de procesos de las tres plantas de generación.

Tanque de servicio diario: Tanque que almacena el combustible ya purificado y de donde se alimentan el proceso de combustión de los motogeneradores.

Zona de patios: Área que abarca toda la zona exterior a casa de máquinas y donde se encuentra el conjunto de tanques de fluidos, equipos de enfriamiento de agua y la planta de purificación de agua.

Lista de Símbolos y Abreviaturas

Símbolos con letras latinas

| Símbolo | Término | Unidad SI | Definición |
|------------|--|------------------------------|--------------------------|
| A | Área | m^2 | $\iint dx dy$ |
| A_{BET} | Área interna del sólido | $\frac{m^2}{g}$ | Ver DIN ISO 9277 |
| A_c | Area de sección transversal | m^2 | $\iint dx dy$ |
| C | Celsius | | K-273.15 |
| C_p | Calor específico | $\frac{J}{kg \cdot K}$ | [1, p. 7] |
| d | Diámetro | m | Ec. 34 |
| h | Coefficiente de transferencia por convección | $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ | Ec. 6 |
| I | Intensidad de corriente | A | Ec. 21 |
| k | Conductividad térmica | $\frac{W}{m \cdot K}$ | [1, p. 21] |
| K | Kelvin | K | Ver 26 ^a CGPM |
| L | Longitud | m | Ver 17 ^a CGPM |
| \dot{m} | Gasto o flujo másico | $\frac{kg}{s}$ | Ec. 32 |
| n | Número de tuberías | | Ec. 1 |
| P | Presión | $\frac{N}{m^2}$ | Ver 14 ^a CGPM |
| R | Resistencia | $\frac{^\circ C}{W \cdot m}$ | Ec. 12 |
| \dot{q} | Carga térmica | $\frac{W}{cm^2}$ | Ec. 17 |
| \dot{Q} | Razón de transferencia de calor | W | Ec. 13; 31 |
| T_{prom} | Temperatura promedio | $^\circ C$ | Ec. 7 |

| Símbolo | Término | Unidad SI | Definición |
|-----------|---------------------|----------------------------|------------|
| v | Velocidad | $\frac{m}{s}$ | Ec. 2 |
| V_L | Voltaje de línea | V | Ec. 20 |
| \dot{v} | Flujo volumétrico | $\frac{m^3}{h}$ | Ec. 33 |
| a | Difusividad térmica | $\frac{k}{\rho \cdot C_p}$ | Ec. 4 |

Símbolos con letras griegas

| Símbolo | Término | Unidad SI | Definición |
|---------|-----------------------|------------------|--------------|
| ν | Viscosidad cinemática | $\frac{m^2}{s}$ | [1, p. 382] |
| ρ | Densidad | $\frac{kg}{m^3}$ | Ver 11ª CGPM |

Subíndices

| Subíndice | Término |
|-----------|-----------------------------|
| Cal | Calentador |
| Curv | Curvatura |
| F | Fase |
| L | línea |
| Ais | Aislamiento |
| Mín | Mínimo |
| Prom | Promedio |
| Pur.A | Purificadora de aceite |
| Pur.C | Purificadora de combustible |
| Tanq. | Tanque |
| Temp | Temperatura |
| Tub | Tubería |

Superíndices

Superíndice Término

| | |
|---|---------------------|
| n | Exponente, potencia |
|---|---------------------|

Abreviaturas

Abreviatura Término

| | |
|---------------|---|
| <i>AWG</i> | American Wire Gauge |
| <i>CA</i> | Corriente alterna |
| <i>DN</i> | Diámetro Nominal |
| <i>EMT</i> | Electrical metallic Tubing |
| <i>IDEAM</i> | Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales |
| <i>NC</i> | No calentada |
| <i>NEMA</i> | National Electrical Manufacturers Association |
| <i>Nu</i> | Número de Nusselt |
| <i>Pr</i> | Número de Prandtl |
| <i>PT</i> | Platino |
| <i>Re</i> | Número de Reynolds |
| <i>NTC</i> | Norma técnica colombiana |
| <i>RETIE</i> | Reglamento técnico de instalaciones eléctricas |
| <i>RTD</i> | Resistance temperature detector |
| <i>SCMC</i> | Segundo-centímetro-Celsius |
| <i>SPT</i> | Sistema de puesta a tierra |
| <i>TGP-CA</i> | Tablero de potencia y control de calentador |
| <i>THHN</i> | Termoplástico de alta resistencia al calor cubierto de nailon |

Preliminares

A mi madre y abuelo quienes confiaron en mí y dieron todo de sí para lograr ser el profesional que soy ahora.

A mi esposa e hijastras quienes sacrificaron mucho para apoyarme y poder cumplir mi meta de ser ingeniero.

Y sobre todo a Jehová nuestro Dios, por guiarme cada día a que mis logros sean fuente para bien y ayuda a quienes los necesiten.

Agradecimientos

Un especial agradecimiento a los directivos de la Universidad Antonio Nariño por hacer posible mi desarrollo como estudiante y profesional y por hacerme parte de esta excelente institución.

Agradezco sinceramente a todos los tutores que hicieron parte de mi formación. Gracias a ese amor por la enseñanza, sentí un gran apoyo durante todo el tiempo como estudiante y en especial en el desarrollo de este proyecto.

Un agradecimiento también al grupo de operaciones de la planta de generación aquí mencionada, quienes con su experiencia y conocimientos me apoyaron en el planteamiento de esta propuesta.

Por último y no menos importante, un agradecimiento al ingeniero Nicolás Giraldo Peralta, director de la tesis, quien me apoyó con su conocimiento, entusiasmo y ánimo para cumplir con mis objetivos de este trabajo de grado.

Resumen

En el presente documento se describe el diseño de una fuente de energía térmica para calentar aceite térmico que reemplace los gases de escape como fuente de calor. El fin es transferir energía térmica hacia algunos equipos para realizar procesos críticos necesarios aunque la planta de generación eléctrica se encuentre fuera de servicio.

Inicialmente se levanta información de temperaturas, flujos, distancias y parámetros de proceso para obtener un panorama lo mas real posible de la energía utilizada y sus pérdidas y establecer los requerimientos del diseño.

Se evalúan diferentes factores para escoger el mejor prototipo y se analiza la necesidad real de energía térmica para las características de diseño finales.

Con ayuda de herramientas de cálculo e información obtenida de fabricantes através de visitas, catálogos y libros, junto con información de otros temas anexados en el documento, se diseña el equipo termomecánico y su circuito eléctrico de potencia.

Palabras clave: Fuente de energía térmica, generación de calor, resistencia industrial, calentador eléctrico, sistema de aceite térmico.

Abstract

This document describes the design of a thermal energy source to heat thermal oil that replaces exhaust gas as a heat source. The objective is to transfer thermal energy to some equipment, to carry out critical processes that are necessary, even if the electricity generation plant is out of service.

Initially, will be presented data about temperatures, flows, distances, and process parameters, to get a panorama as real as possible about the amount of energy used and its losses to establish the design requirements.

Then, its evaluated different factors to choose the best prototype and its analyze the actual need for thermal energy to get the characteristics of the final design.

With the help of calculation tools and the information collected from manufacturers through visits, catalogs, books, and information on other related topics annexed in this document, the thermomechanical equipment and its electrical power circuit are designed.

Key words: Thermal energy source, heat generation, industrial resistor, electric heater, thermal oil system.

Introducción

La transferencia de calor por medio del aceite térmico es un método utilizado por diferentes industrias y especialmente por la industria de hidrocarburos debido a los altos valores de temperaturas que se obtienen y diferentes valores de viscosidad según el tipo de fluidos utilizados como por ejemplo aceites, residuos, lodos y combustible crudo entre otros, además de que es un sistema eficiente y seguro.

Este proyecto pretende diseñar una fuente de energía térmica por un sistema de aceite térmico ya instalado que se pueda adecuar a las necesidades propias de la planta en mención y contribuya a mejorar las propiedades de los fluidos empleados en el proceso de generación de energía eléctrica y al adecuado uso de los equipos que intervienen en dichos procesos.

Con este proyecto se busca realizar una mejora al proceso actual de calentamiento del sistema de aceite térmico, el cual depende totalmente de que los motores acoplados a los generadores eléctricos estén en servicio y con ello disminuir los factores de riesgo y fallas en los equipos asociados al proceso, aprovechando también los recursos utilizados para el funcionamiento de los motores de combustión.

El proceso de generación eléctrica de la planta ubicada en Puerto Gaitán (Meta) es producido por la acción de motores reciprocantes de gran capacidad y tamaño acoplados cada uno a un generador eléctrico. Hay 11 unidades motoras distribuidas en 3 plantas, cada una de ellas con sus propios sistemas auxiliares de aceite lubricante, de combustible, de refrigeración con agua, y de transferencia de calor por medio de aceite térmico. Estos

sistemas auxiliares procesan los fluidos que intervienen en la combustión hasta obtener las propiedades ideales que permitan la mayor eficiencia posible.

La energía calórica que reciben los sistemas de aceite lubricante y combustible, se transfiere con la ayuda de un aceite térmico el cuál se distribuye a través de un sistema de tubería aislada hacia toda la planta. A su vez dicho aceite térmico obtiene su energía calórica gracias a los gases residuales liberados de la combustión.

Cuando estos gases son expulsados de la cámara de combustión convergen en un ducto común ubicado a cada lado de los motores y se aprovecha su energía para hacer girar los turbocompresores del motor que comprimen el aire que ingresa a todas las cámaras de combustión. Cumplida esa función dichos gases, antes de salir al ambiente, son direccionados hacia las calderas o recuperadores de calor instaladas en cada motor en cuyo interior tienen instalado un sistema de tuberías donde circula aceite térmico. En esta fase se logra un intercambio de calor eficiente con el aceite térmico, obteniendo este último ganancia térmica suficiente para ser aprovechado en otros subprocesos.

La problemática planteada y base de este proyecto surge cuando de las 3 plantas de generación disponibles una de ellas está apagada, bien sea por mantenimientos o por disposición del cliente, quien determina la necesidad de energía eléctrica en sus circuitos.

Puntualmente uno de los problemas surge en la puesta en servicio de la planta o de alguno de sus motores. Para la puesta en marcha de los motores se necesitan los fluidos como el aceite lubricante y combustible a temperaturas óptimas. Pero si no hay motores en servicio tampoco hay gases de escape que puedan suministrar energía térmica al aceite

térmico para calentar los fluidos que intervienen en la maniobra. Todo ello genera un proceso que requiere tiempo y genera un gasto de recursos en exceso para obtener las temperaturas ideales sugeridas por los manuales de los fabricantes, a saber Pielstick y Caterpillar, y conseguir una combustión estable que garantice la generación eléctrica confiable.

Un segundo problema surge debido al choque térmico que reciben los ductos de aceite térmico que, estando la planta fuera de servicio, se encuentran a temperatura ambiente. Cuando entra en servicio la planta o motor se produce una expansión térmica a medida que la temperatura del aceite térmico aumenta creando una presión interna que combinado al estado regular de las tuberías, causado por el paso de los años, se han producido fisuras que resultan en fugas con pérdidas considerablemente altas. Esto ha obligado a las máquinas a permanecer en estado no apto para generar, con un riesgo alto de afectación al medio ambiente y a la integridad del personal operativo. Cabe mencionar que este fluido es escaso por el stock en mínimas cantidades que existen y por las demoras administrativas para adquirirla.

Otro problema está asociado a los riesgos de falla que se presentan cuando las piezas internas del motor no se encuentran prelubricadas a temperaturas mayores a 50°C antes de la puesta en servicio. La falta de temperatura puede ocasionar escasa cobertura de lubricación debido a la alta viscosidad del aceite, y puede llegar el caso que en una puesta en marcha urgente de los motores haya afectación a la integridad del equipo por rayaduras en cigüeñales que afecte su resistencia de diseño y con consecuencias costosas para el cliente como por ejemplo rectificación o cambios del componente, afectación en bielas por

sobrecalentamientos, o eventos de mayor magnitud que afecten a la integridad del personal operativo.

Un último inconveniente se observa en el sistema de combustible de la planta. Las tres plantas utilizan la energía térmica para poder mantener las temperaturas ideales en el proceso de almacenamiento, purificación e inyección en los motores. La temperatura óptima usualmente empleada para la inyección es entre 125 y 135°C, según el tipo de mezcla empleada, para sostener una viscosidad entre 12 y 13 cSt. Cuando una de esas plantas está fuera de servicio inclusive si se trata de solo un motor, su contribución de energía térmica merma tanto para el proceso de inyección, y de purificación del combustible, inclusive también para su almacenamiento pues requiere temperaturas mayores a 50°C en esta etapa. Cuando existe esta condición las otras plantas en servicio deben ser capaces de generar suficiente energía térmica para garantizar el tratamiento del combustible, pero si estas plantas no funcionan a su capacidad total este proceso no es eficiente. Ello obliga en ocasiones a modificar parámetros en los equipos purificadores para que permanezcan en servicio en condiciones subestandar, sacrificando así la calidad de purificación y ocasionando fallas de proceso como por ejemplo saturación frecuentes en los filtros de todo el sistema de combustible y aumento de la frecuencia de paradas de motores debido a pérdidas de presión y flujo por componentes sucios. Otra práctica que se lleva a cabo para evitar que las pérdidas de temperatura en el sistema térmico general sigan aumentando es cortar el suministro de aceite térmico hacia los tanques de almacenamiento de combustible, afectando así sus propiedades desde esa primera etapa del proceso.

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente documento describe en el primer capítulo las características principales del proyecto. El segundo capítulo explica el comportamiento térmico en los diferentes procesos de la planta de generación eléctrica. En el capítulo tercero se determina el consumo de energía térmica en los equipos y tanques de la planta 1, así como las pérdidas térmicas por recorrido en tuberías. Luego, en el cuarto capítulo se evalúan algunas alternativas de ganancia de calor para escoger el más acorde. Una vez se resume información general de los componentes del tipo de equipo escogido y plasmado en el quinto capítulo, se recoge algunos datos técnicos en el capítulo sexto para su diseño y se evalúan dos prototipos de este. Continuando, en el séptimo capítulo se desarrollan los cálculos pertinentes al diseño final y se realiza un análisis térmico de los resultados. Finalmente, en las conclusiones se sintetizan los objetivos cumplidos del proyecto.

Como se evidencia, debido a que el sistema térmico está estrechamente relacionado a un motor en funcionamiento se necesita una fuente de energía térmica externa que no dependa de los gases de combustión generados por el motor. Un sistema que genere suficiente energía y que pueda mantener los fluidos en sus temperaturas ideales de forma constante. De esa forma al entrar en servicio una planta no se requerirá invertir tantos recursos para garantizar una generación estable, rápida y segura, sobre todo en los momentos urgentes. Ello permitirá también mantener las condiciones óptimas en los equipos de purificación garantizando las propiedades del combustible dentro de sus parámetros ideales.

1. Características del proyecto

1.1 Antecedentes

Ha sido variada la información referente a la transferencia de calor con aceite térmico, de los cuales resaltan algunos. Uno de ellos es una guía de utilización del aceite térmico en un sistema de transferencia de calor, mostrando detalles técnicos para la instalación de un sistema y su mantenimiento [2].

Se destaca un proyecto para instalar un calentador de aceite térmico para una planta de ácido bórico [3].

Por otro lado una tesis realiza una comparación de diferentes tipos de intercambiadores de calor como método de mejora para el transporte de crudo desde una central de bombeo hasta la zona del uso del recurso [4].

Desde hace unos años en Colombia se adelanta la elaboración del Reglamento Técnico de Sistemas e Instalaciones Térmicas cuyo contenido consolida iniciativas como el Reglamento Técnico de Calderas y la promoción de Distritos Térmicos y cuyos objetivos se centran en la seguridad, el desempeño energético, la protección del medio ambiente y el aseguramiento de los requerimientos de los servicios del sistema o instalación [5].

Por su parte, el Ministerio de Salud de Colombia se ha promulgado ante las tecnologías para transferencia de calor con algunos requerimientos sobre la utilización de calderas y recipientes sometidos a presión [6].

1.2 Objetivos

Teniendo presente la información anterior este proyecto tiene como objetivo general diseñar una fuente de alimentación de energía térmica externa al proceso de combustión de

los motores de la planta de generación eléctrica, con el fin de responder de manera oportuna, segura y confiable a la demanda de energía eléctrica solicitada por el cliente.

Como objetivos específicos se encuentran los siguientes:

- Determinar el funcionamiento termomecánico actual del sistema de calentamiento de aceite térmico en la primera planta, la cual genera 6.45 MW y elevan la temperatura de dicho aceite a valor promedio de 180°C para mantener la temperatura promedio del combustible entre 125°C y 135°C al inyectarse en cada motor y para el almacenamiento y purificación del fluido.
- Determinar el funcionamiento termomecánico actual del sistema de calentamiento de aceite térmico de la segunda planta, la cual genera 16.5 MW teniendo en cuenta que la temperatura del aceite térmico en su sistema alcanza un valor promedio de 180°C para mantener la temperatura promedio del combustible entre 125°C y 135°C al inyectarse en cada motor y para el almacenamiento y purificación del fluido.
- Determinar el funcionamiento termomecánico del sistema de calentamiento de aceite térmico general teniendo en cuenta que la planta con la condición apagada mantiene el aceite térmico a temperatura ambiente de 24°C sin circulación en el sistema, temperatura no apta para calentar el aceite lubricante de motores y el combustible para su almacenamiento y purificación.
- Establecer los requerimientos de diseño termomecánico del sistema de calentamiento del sistema de aceite térmico.

- Establecer dos opciones de diseño del sistema termomecánico de calentamiento del sistema de aceite térmico.
- Realizar el proceso de selección del diseño definitivo teniendo en cuenta que cumpla de manera más eficiente los requerimientos del sistema.
- Diseñar en detalle el sistema termomecánico teniendo en cuenta el mejor diseño escogido anteriormente y los requerimientos de diseño establecidos.
- Realizar un análisis del sistema diseñado para verificar el cumplimiento de los requerimientos de diseño y operativos del sistema.
- Realizar la escogencia de la fuente de energía térmica y demás dispositivos eléctricos y mecánicos requeridos dentro del diseño.
- Realizar los planos, mecánicos, eléctricos y térmicos requeridos.
- Realizar la compilación de la documentación necesaria para el desarrollo del diseño y el material a entregar.

1.3 Justificación

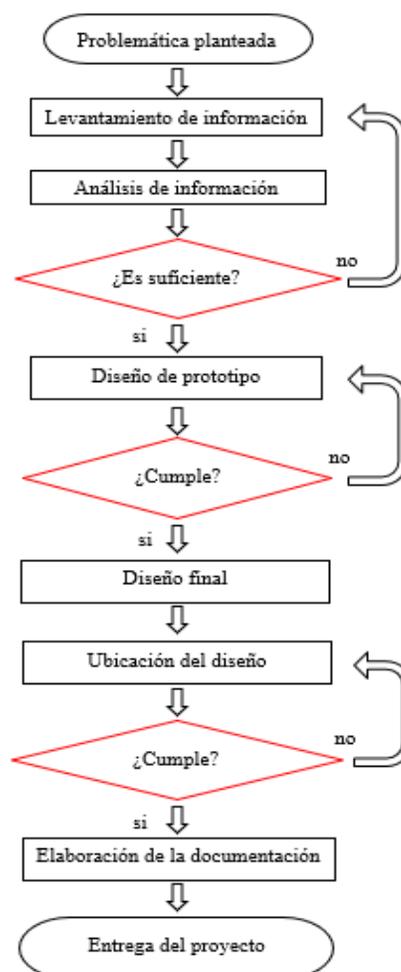
El diseño que se plantea en este proyecto es con el fin de aminorar los factores de fallas y las afectaciones consecuentes que se producen en la puesta en servicio de los motores en las condiciones mencionadas. También es con el fin de disminuir los mantenimientos correctivos que suelen ser de gran envergadura por el tipo y tamaño de los motores. Igualmente se pretende aminorar las fallas de procesos y en los equipos que intervienen por todo el sistema de combustible, los cuales se presentan como consecuencia de los valores subestándar en las propiedades del fluido utilizado debido a las pérdidas de temperatura en el proceso.

Por lo tanto, este planteamiento garantiza en gran medida la confiabilidad de la planta de generación eléctrica, permitiendo suministrar la energía que solicite el cliente de forma rápida y con la seguridad de que tanto los equipos como el personal involucrado y el medio ambiente no presenten riesgo alguno de daño o afectación.

1.4 Metodología

La Figura 1–1 muestra con un diagrama de flujo la metodología a seguir en este proyecto.

Figura 1–1. Diagrama metodología.



Nota. Fuente propia

1.4.1 Levantamiento de información

Se consultará información del fabricante y/o proveedores por medio de manuales físicos o digitales, sobre los parámetros de trabajo ideales de los diferentes fluidos que intervienen en el proceso de puesta en marcha de los motores y durante su operación normal.

Se compilará información de variables que intervienen en el proceso térmico actual, con las condiciones de trabajo habituales, en la primera planta teniendo en cuenta las condiciones críticas de déficit térmico para los otros procesos. Se obtendrán datos pertinentes en puntos específicos del sistema.

Se compilará información de variables que intervienen en el proceso térmico actual con las condiciones de trabajo habituales en la segunda planta teniendo en cuenta el aporte térmico que realiza al proceso de generación. Se obtendrán datos pertinentes en puntos específicos del sistema.

Se compilará información de variables en diferentes puntos del sistema general de calentamiento del aceite térmico cuando la planta esté en condición apagada o pocos motores en servicio y los parámetros termomecánicos tengan desviaciones por dicha condición.

1.4.2 Análisis de información

De acuerdo con la información obtenida se identificará los puntos de desviación y zonas críticas donde se deben concentrar los esfuerzos del diseño. Para tal fin, utilizaremos esquemas de la configuración actual de los sistemas en mención.

Se comparará con la información de fabricante y/o proveedores los valores a ideales a obtener y en base a ello se establecerán los parámetros del diseño de la fuente de energía térmica.

1.4.3 Diseño

Se evaluarán los diseños termomecánicos que se adapten más a la necesidad planteada y a la configuración del sistema actual de la planta. Para escogerlo se tendrá en cuenta la facilidad de instalación, los recursos disponibles, mano de obra entre otros.

Una vez escogido el diseño, se realizará los cálculos pertinentes para obtener los valores ideales recomendados por el fabricante enfocándonos inicialmente a cubrir la primera necesidad en arranques seguros y confiables de los motores.

Se evaluará por medio de análisis y cálculos si la ganancia térmica obtenida en el diseño inicial es suficiente para garantizar también las mejoras en el sistema de combustible.

Con los resultados de la anterior evaluación se planteará el diseño general, identificando las zonas del proceso que aún requieren más ganancia térmica, los puntos más lejanos del proceso, y las pérdidas de energía en el sistema.

1.4.4 Ubicación del diseño

Se identificarán los puntos estratégicos de ubicación de la fuente de energía térmica, teniendo en cuenta la estructura, el espacio disponible de la planta y los puntos de menor pérdida de energía.

Se realizará un análisis del sistema diseñado en su ubicación final. Se revisará que los cálculos aplicados satisfagan la necesidad de ganancia térmica.

Con los valores obtenidos de ubicación y resultados finales del diseño. Se calcularán las variables faltantes para la fuente de energía térmica y demás dispositivos mecánicos y eléctricos que serán necesarios para el diseño.

1.4.5 Elaboración del documento

Conformación de los entregables.

Se elaborarán los planos mecánicos y eléctricos correspondientes al diseño a través de software.

Se documentará los resultados de los análisis y cálculos realizados tanto escrito como en material digital.

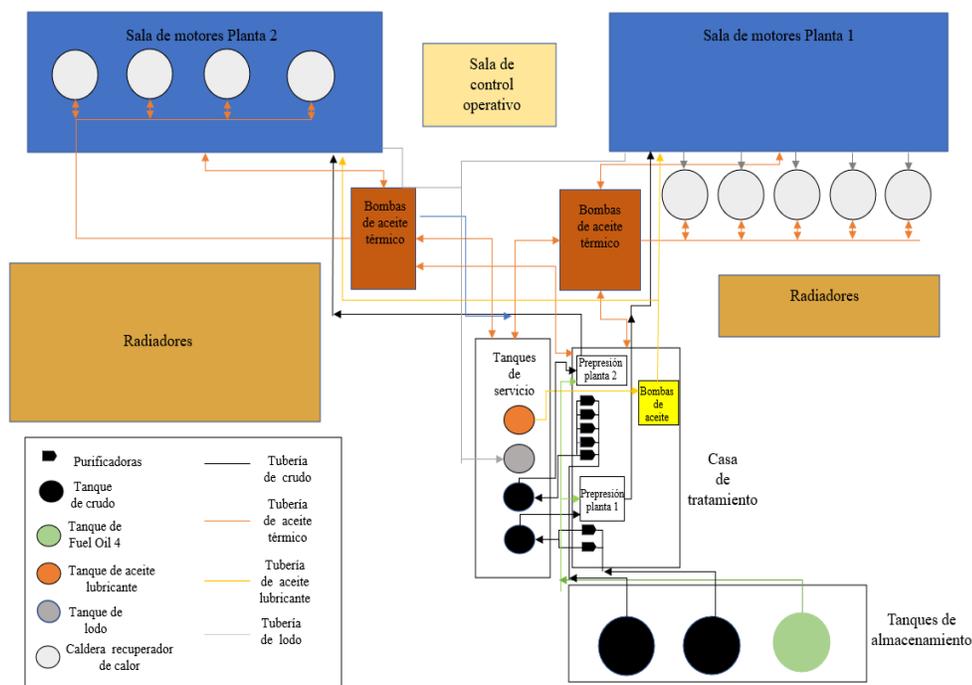
Se redactará el documento final durante todo el proceso del diseño.

2. Descripción del sistema termomecánico del aceite térmico

En el proceso de generación de la planta ubicada en Puerto Gaitán, Meta el sistema de aceite térmico obtiene ganancia de energía térmica aprovechando los gases residuales de la combustión de los motores que llevan a cabo la generación eléctrica. Una vez obtenida la ganancia térmica se direcciona hacia los diferentes subprocesos como lo son el de tratamiento de combustible, de almacenamiento de lodos y de aceite lubricante, para luego retornar con menor temperatura a un punto común y de nuevo realizar el ciclo de recuperación de energía.

En la Figura 2–1 podemos ver un esquema general de ambas plantas que nos servirá de guía mientras describimos los subprocesos en cada una.

Figura 2–1. Esquema general planta Puerto Gaitán.



Nota. Fuente propia

2.1 Sistema termomecánico de planta 1

A continuación, se describen los diferentes subprocesos que requieren energía térmica en la planta de generación de interés para este proyecto.

2.1.1 Calentamiento del sistema de aceite térmico

Los motores de la planta 1 generan una potencia de 4.5 MW cada uno. Hay cinco motores dispuestos en la planta, cada uno con su sistema de combustible, de aceite lubricante, de agua de enfriamiento y de aceite térmico con su respectiva caldera o recuperador de calor. Cada caldera tiene una tasa de transferencia de energía de 250 KW.

Los gases de combustión al salir de cada una de las 16 cámaras de combustión distribuidos a cada lado del motor llegan a un ducto común con una temperatura operativa de hasta 620°C y ejercen una función inicial de mover los turbocompresores que se encuentran acopladas al mismo motor para presurizar el aire de combustión que se inyecta en dichas cámaras. Una vez que los gases residuales utilizan su energía para tal objetivo se direccionan con una temperatura límite de 700°C hacia la caldera o recuperador de calor, tal como lo muestra la Figura 2-2, en cuyo interior hay dispuesta una tubería en forma de espiral donde circula el aceite térmico. En este punto el aceite térmico recupera su energía térmica alcanzando un valor de temperatura entre 160 y 180°C en condiciones ideales, dependiendo de la potencia generada. Los gases después de calentar el aceite térmico son expulsados al ambiente.

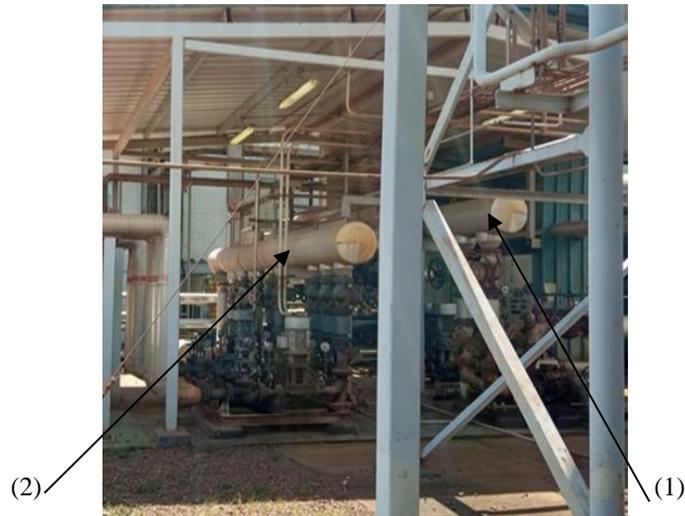
Figura 2–2. Caldera o recuperador de calor.



Nota. (1) Ductos de gases de combustión. (2) Tubería de aceite térmico. Tomado en zona de patios, planta de generación en el Meta.

En la zona de bombeo de aceite térmico mostrada en la Figura 2–3, se encuentran dos colectores. Un colector de aceite recibe el fluido que ha perdido energía térmica después que ya ha recorrido todos los sistemas del proceso. Existen cinco bombas de circulación de aceite térmico, que se activan cuando su motor correspondiente entra en servicio y direccionan aceite térmico desde el colector de baja temperatura hacia la caldera o recuperador de dicho motor, con un flujo de $48 \text{ m}^3/\text{h}$ para el intercambio de calor y luego converge hacia el colector de alta temperatura. Desde aquí, el aceite con ganancia térmica es distribuido a diferentes zonas de la planta. Cuando el aceite realiza todo el recorrido a las diferentes zonas retorna al colector de baja temperatura para ser circulado nuevamente hacia las calderas y recuperar energía térmica.

Figura 2–3. Colector de alta y baja temperatura.



Nota. (1) Colector de alta temperatura. (2) Colector de baja temperatura. Tomado en zona de patios, planta de generación del Meta.

La temperatura del aceite térmico en cada motor es controlada por un sistema automático que acciona una válvula tres vías regulando el paso de aceite hacía unos enfriadores con agua industrial y manteniendo el valor fijado. Cada motor tiene su sistema de enfriamiento de aceite térmico como se muestra en la Figura 2–4.

Figura 2–4. Enfriador de aceite térmico.



Nota. (1) Ducto de aceite térmico. (2) Ducto de agua de enfriamiento. (3) Válvula reguladora de aceite térmico. Tomado en zona de patios, planta de generación del Meta.

Cuando todos los motores están en funcionamiento la energía térmica obtenida es suficiente para todos los procesos de la planta. Sin embargo, si hay pocos motores en funcionamiento hay que cortar el suministro de aceite térmico hacia algunas zonas para poder aprovechar la energía en los procesos más críticos. Se puede visualizar todo el sistema de calentamiento de aceite en el anexo 1.

2.1.2 Calentamiento del sistema combustible

El sistema de combustible de la planta es uno de los más críticos en el proceso de generación. El combustible que utilizan los motores es una mezcla de crudo y *Fuel Oil 4* en diferentes proporciones según disponga el cliente. Esta mezcla requiere un tratamiento térmico para obtener el valor de viscosidad ideal para inyectarse dentro de las cámaras de combustión de cada motor.

Antes de ingresar a sala de máquinas, el combustible ya tiene unas condiciones desde el momento en que se recibe en la planta. Se puede ver el recorrido de este en la Figura 2–1. Inicialmente cuando el cliente suministra el combustible se deposita en un tanque de almacenamiento con una capacidad de 300 m³ como el mostrado en la Figura 2–5, en cuyo fondo se distribuye una tubería en forma de serpentín donde circula aceite térmico que permite obtener una temperatura alrededor de los 50°C y facilitar la succión para la siguiente etapa del proceso.

El combustible es succionado por las purificadoras donde obtiene una ganancia térmica y es sometido a un proceso de centrifugado para separar sólidos y agua del fluido. La planta cuenta con dos purificadoras de combustible de tipo S876, reacondicionados como las visualizadas en la Figura 2–6, del fabricante Alfa Laval con un intercambiador de calor

en cada equipo para la transferencia térmica. La temperatura de purificación de combustible es de 98°C y es controlado por una válvula automática que regula el paso del aceite térmico hacia el intercambiador para sostener el valor fijado.

Figura 2–5. Tanque de almacenamiento de combustible.



Nota. Capacidad de 300 m³. Tomado en zona de patios, planta de generación del Meta.

Figura 2–6. Purificadora de combustible.



Nota. (1) Intercambiador de calor. (2) Bomba de combustible. (3) Bowl. Tomado en casa de tratamiento, planta de generación del Meta.

Una vez purificado el combustible se direcciona hacia el tanque de servicio o de suministro diario con capacidad de 50 m³ mostrado en la Figura 2–7, donde se almacena el fluido. Este tanque también contiene un sistema de tubería tipo serpiente con flujo de aceite térmico en su base para mantener caliente la mezcla.

Figura 2–7. Tanque de servicio diario de combustible.



Nota. Capacidad de 50 m³. Tomado en zona de patios, planta de generación del Meta.

Luego, el combustible es succionado desde este tanque por unas bombas en el módulo de pre-presión mostrado en la Figura 2–8.

En este módulo el combustible es presurizado para ser enviado a la sala de motores y circula por un filtro automático que se encarga de desechar las partículas muy finas. En el sitio también se encuentran las bombas para fuel *oil 4*, las cuales se activan cuando va a salir de servicio o en la puesta en marcha de algún motor de cualquiera de las plantas. Además, cuenta con una facilidad de conectarse al circuito de pre-presión de la planta 2 para sostener las presiones de trabajo cuando se requiera.

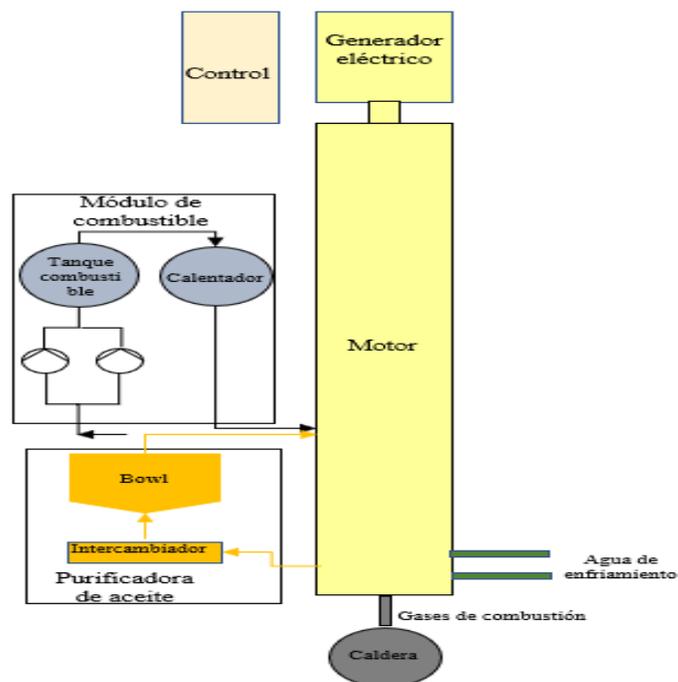
Figura 2–8. Módulo de pre-presión de combustible.



Nota. (1) Bombas. (2) Filtro de combustible. Tomado en casa de tratamiento, planta de generación del Meta.

En sala de máquinas cada motor cuenta con un módulo de combustible como lo muestra el esquema de la Figura 2–9.

Figura 2–9. Motor y equipos auxiliares.

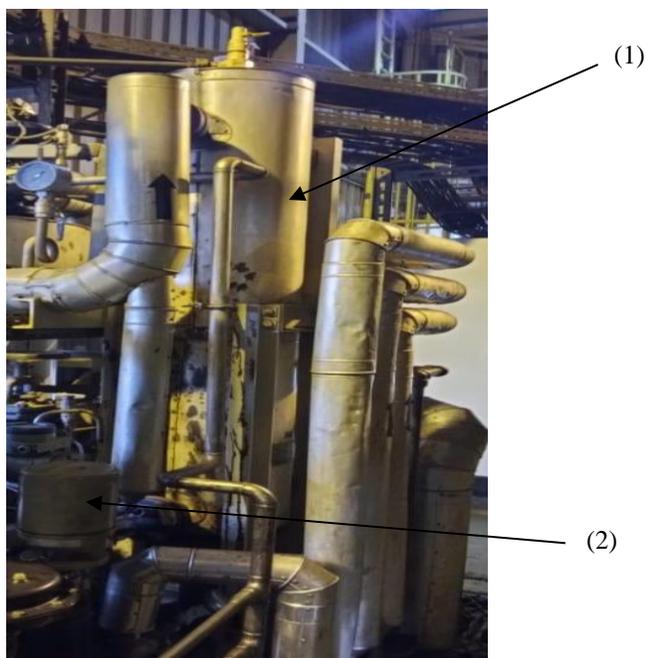


Nota. Fuente propia.

El combustible para ser inyectado debe contar con una viscosidad entre 12 y 13 cSt. Al ingresar al módulo se aumenta la presión del fluido, que ya ha recorrido un tramo bastante largo desde los patios, con la ayuda de una bomba que hace circular el combustible por un calentador. Dicho calentador consta de un intercambiador tipo carcasa con tubos dispuestos en forma de U en su interior. Con el valor fijado de viscosidad, un sistema automático controla el accionamiento de una válvula que regula el paso de aceite térmico hacia el calentador para mantener dicho valor.

Se puede observar un ejemplar del calentador de combustible en la Figura 2–10

Figura 2–10. Calentador de combustible.



Nota. (1) Calentador. (2) Válvula reguladora de aceite térmico. Tomado en sala de máquinas de fase 1, planta de generación del Meta.

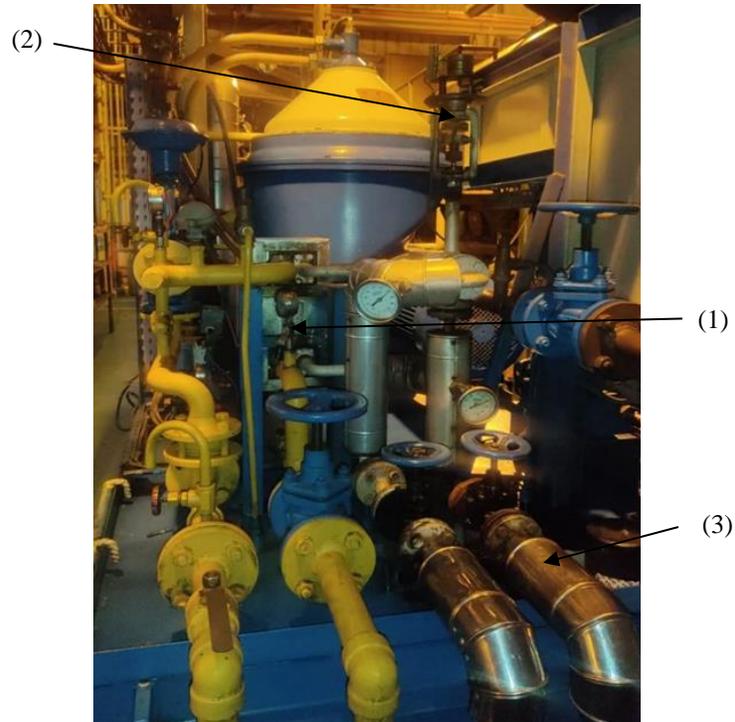
2.1.3 Calentamiento del sistema lubricante.

El aceite lubricante tiene varias funciones dentro del motor. La principal es eliminar los rozamientos metálicos de sus componentes y eliminar el calor producido por este,

refrigerar en el pistón, proteger las piezas de corrosión y de los gases de combustión y mantener en suspensión los residuos de la combustión. Debido a ello el sistema de lubricación es un proceso crítico en el funcionamiento del motogenerador por lo que cada motor tiene un equipo de purificación de este fluido, mostrado también en el esquema de la Figura 2–9.

Las purificadoras de aceite lubricante son referencia LOPX 707 SI D34 60 del fabricante Alfa Laval. Estos equipos requieren mantener el aceite a temperatura cerca de 95°C gracias a un intercambiador para la transferencia térmica y una válvula reguladora de aceite térmico que sostiene el valor de temperatura fijado. El equipo efectúa la separación de los sólidos centrifugándolo y una vez limpio retorna al motor. Ver Figura 2–11.

Figura 2–11. Purificadora de aceite lubricante.



Nota. (1) Intercambiador de calor. (2) Válvula reguladora de aceite térmico. (3) Tubería de aceite térmico. Tomado en sala de máquinas de fase 1, planta de generación del Meta.

2.1.4 Calentamiento del sistema de lodos

El sistema de lodos de la planta no es un proceso crítico porque no interviene dentro del proceso directo en la generación de energía, pero tampoco es menos importante. En la planta hay varios puntos de recolección de aguas y aceites residuales también denominado *pit* de lodos que deben ser evacuados constantemente para no sobrepasar los niveles seguros y evitar un impacto ambiental. Todos los *pits* tienen en el fondo una distribución de tuberías tipo serpentín con circulación de aceite térmico. Gracias a ello el fluido caliente se puede direccionar fácilmente con bombas neumáticas de diafragma hacia un tanque general de recolección de lodos con capacidad de 50 m³ mostrado en la Figura 2-12.

El tanque de lodos igualmente tiene la misma distribución de tubería para aceite térmico. Así se facilita su evacuación cuando sus niveles son altos con una bomba neumática de mayor capacidad hacia un punto de recibimiento de lodos central del campo petrolero.

En ocasiones la evacuación de lodos de esta forma se dificulta debido a la falta de energía térmica cuando la planta está apagada o hay pocos motores en servicio. Dicha condición obliga a utilizar la energía térmica solo para los procesos críticos. Por ello el cliente opta por contratar camiones de vacío con entidades externas para bajar los niveles del tanque y evitar impactos ambientales.

Figura 2–12. Tanque de lodos.



Nota. Capacidad de 50 m³. Tomado en zona de patios, planta de generación del Meta.

2.1.5 Medios de transferencia térmica en los fluidos de proceso

En cada uno de los procesos descritos anteriormente para lograr una ganancia térmica en los fluidos de cada equipo y en los tanques se cuenta con una línea de entrada de aceite térmico que proviene del colector de alta temperatura y una vez cumplida su función retorna hacia el colector de baja temperatura visualizados en la Figura 2–3. La tubería por donde circula el aceite térmico es de acero al carbono Schedule 40 en todos los casos, con diversos diámetros y con una conductividad térmica de 60.5 W/m K. Las tuberías están protegidas con un aislamiento de fibra de vidrio tipo cañuela con valor de conductividad térmica de 0.049 W/m K que impide la pérdida de energía térmica hacia el ambiente.

Los intercambiadores de calor utilizados en las purificadoras están compuestos internamente por placas corrugadas de acero inoxidable soldadas formando un paquete. El aceite lubricante fluye por cada cierto espacio entre las placas mientras que el aceite térmico

fluye en dirección opuesta logrando así la máxima eficiencia durante la transferencia de calor. Estos intercambiadores, como el mostrado en la Figura 2–13, se encuentran aislados para el aprovechamiento de la energía térmica transferida en su interior.

Figura 2–13. Intercambiador de calor de purificadoras.



Nota. Tomado en sala de máquinas fase 1, planta de generación del Meta.

Tal como lo muestra la Figura 2–14, hay dos bombas de distribución de aceite térmico con flujo de $150 \text{ m}^3/\text{h}$, una en servicio y otra como respaldo, que direccionan aceite térmico hacia los calentadores de combustible y hacia las purificadoras de aceite lubricante en la sala de motores. También hay dos bombas con flujo de $80 \text{ m}^3/\text{h}$, una en servicio y otra como respaldo, que direccionan aceite térmico hacia los patios de la planta para los procesos de almacenamiento, purificación del combustible y también hacia los *pits* de lodos de proceso.

Figura 2–14. Bombas del sistema de aceite térmico.



Nota. (1) Bombas para procesos en sala de máquinas. (2) Bombas para procesos en patios. Tomado en zona de patios fase 1, planta de generación del Meta.

2.2 Sistema termomecánico planta 2

El objeto de este proyecto se centra en la planta 1 sin embargo, se describirán las características más importantes de la planta 2 puesto que comparte zonas comunes con la planta 1 y en ocasiones brinda energía térmica para algunos equipos de esta.

Se observa en la Figura 2–1 que el sistema termomecánico de la planta 2 está configurado de manera similar a la planta 1. Los motores que realizan la combustión en esta planta generan una potencia nominal de 8 MW cada uno. Hay cuatro motores dispuestos en la planta cada uno con su sistema de combustible, de aceite lubricante, de agua de enfriamiento, de recolección de lodos y de aceite térmico con su caldera o recuperador de calor. Las diferencias más notorias de los sistemas se describen a continuación.

2.2.1 Calentamiento del sistema de aceite térmico

En la Figura 2–15 se muestra un ejemplar de las calderas de esta planta las cuales tienen una tasa de transferencia de energía de 500 kW y están dispuestas horizontalmente.

La temperatura del sistema térmico es regulada por un sistema automático que abre y cierra el *dámper* de cada caldera. Este automatismo regula el paso de gases de combustión hacia los serpentines donde circula aceite térmico en el interior de cada recuperador según el valor de temperatura fijado.

Cada motogenerador cuenta con una bomba de circulación de aceite térmico que se acciona solo cuando el motor entra en servicio. Estas recirculan el aceite térmico desde el colector de baja temperatura a un flujo de 32 m³/h hacia cada una de las calderas para obtener energía calórica, y posteriormente depositarse en el colector de alta temperatura. Desde allí se distribuye a las diferentes zonas de la planta de manera muy similar a la planta 1.

Figura 2–15. Caldera o recuperador de calor planta 2.



Nota. (1) Ducto de gases de combustión. (2) *Damper*. Tomado en zona de patios fase 2, planta de generación del Meta.

2.2.2 Calentamiento del sistema de combustible

El combustible que utilizan los motores es la misma mezcla de crudo y *Fuel Oil 4* que se usa en la planta 1. Para su tratamiento térmico cada unidad motora cuenta con un calentador que intercambia energía con el aceite térmico. Igual que en la planta 1 una válvula automática regula el paso de aceite térmico hacia el calentador para mantener el valor de viscosidad entre 12 y 13 cSt.

La planta cuenta también con un tanque de almacenamiento de combustible donde se recibe la mezcla por parte del cliente con una capacidad de 300 m³ con un serpentín en su base para el calentamiento del fluido. Desde este tanque es direccionado hacia las cinco purificadoras del fabricante Alfa Laval disponibles según se requiera. Una vez purificado el combustible se direcciona al tanque de servicio diario también de 50 m³ donde se mantiene caliente. También cuenta con bombas de pre-presión que someten el combustible a un proceso de filtración antes de enviarlo a la sala de máquinas.

2.2.3 Calentamiento del sistema de aceite lubricante

El sistema de aceite lubricante de la planta difiere con la planta 1, en que tiene menos equipos purificadores. Solo cuenta con cuatro purificadores de aceite del fabricante Alfa Laval, uno por motor, cada uno con su intercambiador para la transferencia térmica y una válvula automática de aceite térmico para regular el paso de aceite térmico y mantener el valor de temperatura fijado de 95°C.

2.2.4 Calentamiento del sistema de lodos

Igual que en la planta 1, hay un *pit* de recolección de aguas y aceites residuales. Este también tiene en el fondo una distribución de tuberías tipo serpentín donde circula aceite térmico.

A diferencia de la planta 1 no hay un tanque general de lodos por lo que todas las aguas aceitosas se direccionan por medio de bombas neumáticas de diafragma hacia el tanque de la planta 1.

2.2.5 Medios de transferencia térmica en los fluidos de proceso

De manera similar a la planta 1 para lograr una ganancia térmica en los fluidos de cada equipo o tanques de almacenamiento se cuenta con una línea de entrada de aceite térmico que proviene del colector de alta temperatura. Una vez cumplida su función retorna hacia el colector de baja temperatura. Igualmente, la tubería por donde circula el aceite térmico es de acero al carbono Schedule 40, con diversos diámetros y el mismo tipo de aislamiento de fibra de vidrio tipo cañuela.

Los intercambiadores de calor de las purificadoras también son de placas corrugadas de acero inoxidable soldadas y del fabricante Alfa Laval, visualizadas en la Figura 2-13, con el mismo mecanismo de intercambio de calor usado en la planta 1. Estos intercambiadores también se encuentran aislados para el aprovechamiento de la energía térmica transferida en su interior.

En cuanto a las bombas de distribución de aceite térmico hay dos bombas con flujo de 82 m³/h, una en servicio y otra como respaldo que direccionan el fluido hacia la sala de

motores. También cuenta con dos bombas con flujo de $46 \text{ m}^3/\text{h}$, una en servicio y otra como respaldo, que direccionan el aceite térmico hacia los patios de la planta.

3. Análisis de energía térmica en el sistema actual

Como se observa en las anteriores descripciones de los diferentes sistemas hay puntos de transferencia de calor en los equipos para los que se requiere un alto consumo de energía. En este apartado se valorará cuanta energía demanda el proceso en cada uno de estos equipos, pero primero se evaluará las pérdidas que se presentan durante el recorrido del aceite térmico en todo el sistema a través de las tuberías a pesar que se encuentren aisladas.

3.1 Cálculo de coeficientes de convección

Para el análisis térmico se tiene en cuenta algunas características y propiedades del aceite térmico utilizado en el sistema a saber, Mobiltherm 605 tomados de hojas de seguridad y ficha técnica del fabricante, ambos contemplados en el anexo 2 y 3.

Entre esas propiedades se destacan las siguientes:

Densidad (ρ): 855 kg/m³

Conductividad térmica (k)_{180°C}: 2.8×10^{-4} Cal / SCMC = 0.119 W/ m K

Calor específico (C_p)_{180 °C}: 2.612 kJ / kg K

Viscosidad (ν)_{100°C}: 52×10^{-6} m²/s

Los valores del flujo de aceite térmico en la planta de interés para este proyecto es de 150 m³/h para la zona de sala de máquinas y 80 m³/h para la zona de patios. Se tendrá en cuenta que el aceite circula por un número finito de tuberías dispuestas paralelamente hasta los puntos de transferencia de calor. Existe una metodología para el cálculo de flujos en paralelo determinando sus valores en base al diámetro y longitud de tubería, cumpliendo el principio de continuidad o conservación de masa [7, p. 233].

$$Q_1 = Q_T \cdot \frac{\frac{d_1^{5/2}}{\sqrt{l_1}}}{\sum_{i=1}^n \frac{d_1^{5/2}}{\sqrt{l_1}}} \quad (1)$$

Donde

$Q_1 = \dot{V}$ = Flujo en la tubería en estudio (m^3/h)

d_1 = Diámetro de la tubería en estudio (m)

l_1 = Longitud de la tubería en estudio (m)

Q_T = Flujo en todo el sistema (m^3/h)

n = Número de tuberías del sistema

Se observa que se necesitan los valores de diámetros y longitudes de tubería que conforman el sistema de aceite térmico. El levantamiento de todos esos valores se encuentra plasmados en las figuras de los anexos 4 y 5 correspondiente a las tuberías que direccionan el aceite hacia sala de motores y patios respectivamente.

Con el uso de hoja de cálculo se obtienen los valores de flujo según los distintos diámetros de tuberías relacionados en el anexo 6.

En adelante se emplean una serie de ecuaciones que serán útiles en el desarrollo de este proyecto [1, p. 506]. Se tomará como referencia los valores de la tubería DN150 para calcular las siguientes variables:

$$V_{\text{prom}} = \frac{\dot{V}}{Ac} \quad (2)$$

$$V_{\text{prom}} = \frac{127.5 \cdot m^3/h}{\frac{\pi \cdot (0.150m)^2}{4}} = 2 \text{ m/s}$$

Con el valor de dicha velocidad promedio se obtiene el número de Reynolds:

$$Re = \frac{V_{prom} \cdot d_{tubo}}{\nu} \quad (3)$$

$$Re = \frac{2 \text{ m/s} \cdot 0.150 \text{ m}}{5.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 57811 \quad \text{Flujo turbulento (Re > 4000)}$$

Se puede visualizar que el valor hallado es mayor a 4000 por lo que el sistema es catalogado como turbulento. Paralelamente se obtiene el valor de número de Prandtl:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\nu}{\frac{k}{\rho \cdot Cp}} \quad (4)$$

$$Pr = \frac{5.2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}{\frac{0.1189 \frac{\text{W}}{\text{m K}}}{855 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2.612 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}}} = 0.10$$

Con los resultados hallados se obtiene el valor del número de Nusselt:

$$Nu = 0.023Re^{0.8} \cdot Pr^{0.3} \quad (5)$$

$$Nu = 0.023(57811)^{0.8} \cdot (0.10)^{0.3} = 73.8$$

Para obtener el valor del coeficiente de convección h_1 se procede:

$$h_1 = \frac{k \cdot Nu}{d} \quad (6)$$

$$h_1 = \frac{0.1189 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \cdot 73.83}{0.150 \text{ m}} = 58.5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

En el anexo 7 se relaciona los valores de los números adimensionales y coeficientes de convección h_1 , calculados con el mismo procedimiento descrito anteriormente, para los diferentes diámetros de tubería por donde circula el aceite térmico hacia zona de patios y sala de motores. También se relaciona el coeficiente de convección para las secciones de tubería no aislada.

Hay un segundo valor de coeficiente de convección h_2 relacionado al contacto con la atmósfera que tiene la tubería aislada. Esta convección que produce el aire también ejerce un efecto en la pérdida de energía térmica. Para calcularlo se tiene en cuenta los siguientes factores:

Diámetro de tubería aislada: 0.277 m

Temperatura en la superficie: 35°C (308.15 K)

Temperatura en el aire: 28.5°C (301.65 K)

Velocidad del aire: 2.1 m/s

Presión de aire: 1 atm.

Los valores de diámetro de tubería aislada DN150 fueron datos anteriormente tomados. El valor de temperatura en la superficie es un promedio de varias medidas tomadas en diferentes puntos en la tubería aislada y compilados en el anexo 8. El valor de temperatura ambiente y velocidad del aire fueron datos climáticos del día que se levanta la información en la planta a saber, el 22 de agosto de 2021 a las 04:30 p.m. El anexo 9 registra esta información.

$$T_{\text{prom}} = \frac{T_{\text{superficie}} + T_{\text{ambiente}}}{2} \quad (7)$$

$$T_{\text{prom}} = \frac{(308.15 + 301.65) \text{ K}}{2} = 304.9 \text{ K} = 305 \text{ K}$$

Haciendo uso de la tabla de propiedades del aire ubicada en el anexo 10, se obtiene los valores de la conductividad térmica para el aire, el número de Prandtl y la viscosidad del aire a la temperatura promedio hallada.

Utilizando gráficos con la herramienta Excel mostrados en el anexo 11, se obtienen los siguientes valores:

$$k_{305\text{ K}} = 0.02603 \text{ W / m K}$$

$$\text{Pr}_{305\text{ K}}: 0.7276$$

$$v_{305\text{ K}}: 1.627 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

Para hallar el número de Reynolds se acude nuevamente a la ecuación 3.

$$\text{Re} = \frac{v_{\text{aire}} \cdot d_{\text{tubo}}}{v_{\text{aire}}} = \frac{(2.1 \text{ m/s}) (0.277\text{m})}{1.627 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 35753$$

Aquí se hace uso de la propuesta de Churchill- Bernstein para hallar el número de Nusselt promedio referente al flujo cruzado sobre un cilindro [1, p. 434].

$$\text{Nu} = 0.3 + \frac{0.62 \cdot \text{Re}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}}}{[1 + (0.4/\text{Pr})^{\frac{2}{3}}]^{\frac{1}{4}}} [1 + (\text{Re}/282000)^{5/8}]^{4/5} \quad (8)$$

$$\text{Nu} = 0.3 + \frac{0.62 \cdot (35753)^{\frac{1}{2}} (0.7276)^{\frac{1}{3}}}{[1 + (0.4/0.7276)^{\frac{2}{3}}]^{\frac{1}{4}}} [1 + (35753/282000)^{5/8}]^{4/5} = 113$$

Por último, hallamos el valor del coeficiente de convección del aire h_2 .

$$h_2 = \frac{k \cdot \text{Nu}}{d} = \frac{0.02603 \text{ W / m K} \cdot 113}{0.277 \text{ m}} = 10.61 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

En el anexo 12 se relacionan los valores de los números adimensionales y coeficientes de convección del aceite térmico h_2 , calculados con el mismo procedimiento descrito anteriormente, para los diferentes diámetros de tubería aislada.

Para las tuberías DN 25 que se encuentran sin aislamiento se halla un valor diferente del coeficiente de convección h_2 . Para calcularlo se tiene en cuenta los siguientes factores:

Temperatura de superficie: 127°C (400.15 K). valor más alto medido en las purificadoras

Diámetro externo de tubería DN 25: 0.034 m

Temperatura en el aire: 28.5°C (301.65 K)

Velocidad del aire: 2.1 m/s

Presión de aire: 1 atmosfera

$$T_{\text{prom}} = \frac{T_{\text{superficie}} + T_{\text{ambiente}}}{2} = \frac{(400.15 + 301.65) \text{ K}}{2} = 351 \text{ K}$$

Realizando el mismo procedimiento para hallar el coeficiente h_2 en la tubería aislada y haciendo uso de los valores hallados del anexo 10 y 11, se obtiene para una temperatura promedio de 351 K:

$$k_{351 \text{ K}} = 0.02942 \text{ W / m K}$$

$$\text{Pr}_{351 \text{ K}} = 0.7151$$

$$v_{351 \text{ K}} = 2.077 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Re} = \frac{2.1 \text{ m/s} \cdot 0.034 \text{ m}}{2.077 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 3437.65$$

$$\text{Nu} = 0.3 + \frac{0.62 \cdot (3438)^{\frac{1}{2}} \cdot (0.7151)^{\frac{1}{3}}}{[1 + (0.4/0.7151)^{\frac{2}{3}}]^{\frac{1}{4}}} [1 + (3438/282000)^{5/8}]^{4/5} = 30.30$$

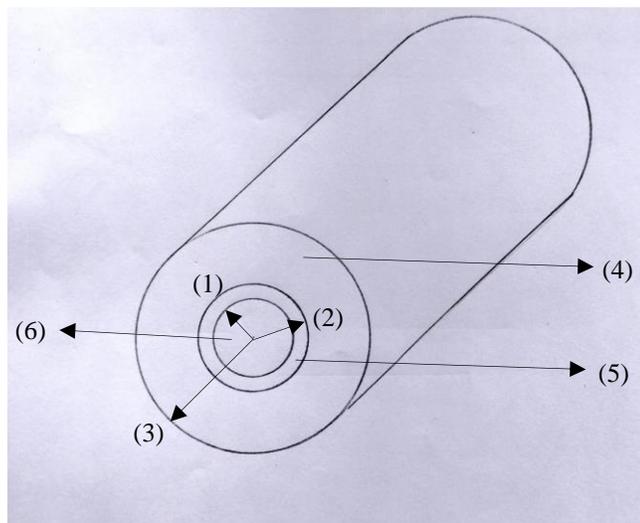
$$h_2 = \frac{k \cdot \text{Nu}}{D} = \frac{0.02942 \text{ W / m K} \cdot 30.30}{0.034 \text{ m}} = 26.22 \text{ W/m}^2\text{K}$$

3.2 Cálculo de resistencia térmica

Una vez obtenido los valores de coeficientes de convección se procede a calcular la resistencia total por metro de longitud de tubería, para determinar las pérdidas de energía térmica durante toda su longitud. Para ello se utilizan los valores de resistencia interna del fluido, la resistencia del tubo, la resistencia del aislamiento y resistencia externa a la tubería.

Para hallar la resistencia interna se utiliza el resultado obtenido del coeficiente de convección interna h_1 y el área superficial donde fluye el aceite térmico, todas ellas en función de los diámetros de la tubería DN 150 como se muestra en la Figura 3-1.

Figura 3-1. Diámetros de tubería aislada.



Nota. (1) Radio 1. (2) Radio 2. (3) Radio 3. (4) Aislamiento. (5) Tubo de acero. (6) Fluido de aceite térmico.

$$R_{\text{interior}} = \frac{1}{h_1 \cdot A_1} = \frac{1}{h_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot L} \quad (9)$$

$$R_{\text{interior}} = \frac{1}{58.53 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 0.471 \text{ m} \cdot 1\text{m}} = 3.63 \cdot 10^{-2} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Para el valor de resistencia de la tubería se tiene presente los diferentes valores de diámetro para cada tubería y su aislamiento registradas en el anexo 12 y la conductividad térmica del material del tubo, que en este caso es acero al carbono y su valor es $k = 60.5 \text{ W} / \text{m K}$. Ver anexo 4 y 5.

Se obtiene el siguiente resultado:

$$R_{\text{tubería}} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{tub}} \cdot L} \quad (10)$$

$$R_{\text{tubería}} = \frac{\ln(0.084\text{m}/0.075\text{m})}{2 \cdot \pi \cdot 60.5 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \cdot 1 \text{ m}} = 3.03 \cdot 10^{-4} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Para obtener el valor de la resistencia del aislamiento se tiene en cuenta el radio del aislamiento y su valor de conductividad térmica a saber de 0.049 W/m°C correspondiente al rango de valores de temperatura de trabajo del prototipo a diseñar que es entre 100° y 140°C del fabricante Fiberglass. Ver anexo 13.

El valor de resistencia de aislamiento obtenido es:

$$R_{\text{aislamiento}} = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{ais}} \cdot L} \quad (11)$$

$$R_{\text{aislamiento}} = \frac{\ln(0.139\text{m}/0.084\text{m})}{2 \cdot \pi \cdot 0.049 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \cdot 1 \text{ m}} = 1.62 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

El valor de resistencia del aire externo se obtiene utilizando el coeficiente de convección h_2 hallado para DN 150.

$$R_{\text{exterior}} = \frac{1}{h_2 \cdot A_2} = \frac{1}{10.61 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0.139 \text{ mm}^2} = 0.11 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

La resistencia total se obtiene con la sumatoria de todas las resistencias halladas en un metro de longitud.

$$R_{\text{total}} = R_{\text{interior}} + R_{\text{tubería}} + R_{\text{aislamiento}} + R_{\text{exterior}} \quad (12)$$

$$R_{\text{total}} = (3.63 \cdot 10^{-2} + 3.03 \cdot 10^{-4} + 1.62 + 0.11) \frac{\text{K}}{\text{W}} = 1.76 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

3.3 Cálculo de pérdidas de energía en tuberías.

Para hallar la energía perdida se utilizaras la analogía electrotérmica la cual parte de propiedades constantes en los elementos que intervienen como lo son los valores de k, h, Q y R. Se tiene en cuenta el valor de la temperatura del aceite térmico que circula en la tubería de 180°C (453.15 K) y la temperatura tomada en la superficie externa del tubo.

$$Q = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{\text{total}}} \quad (13)$$

$$Q = \frac{(453.15 - 301.65)K}{1.76 \frac{K}{W}} = 86 \text{ W/m}$$

Al multiplicar por la longitud total se obtiene el valor de la pérdida total en la tubería de DN 150.

$$Q = 86 \text{ W/m} \cdot 48.89 \text{ m} = 4201W = 4.2 \text{ kW}$$

En el anexo 14 se relacionan los valores de resistencia y pérdidas de energía calculados con el procedimiento descrito anteriormente para los diferentes diámetros de tubería por donde circula aceite térmico en la planta utilizando el mismo método de cálculo en el caso de DN150.

En los valores tabulados también se incluyen los sectores de tubería que no tiene aislamiento y que corresponden a las zonas de conexión con los intercambiadores de los diferentes dispositivos.

La sumatoria de todas las pérdidas según lo tabulado en el anexo 14 es de 14.42 kW. Sin embargo, este resultado sólo contempla el valor de pérdidas en las tuberías donde circula aceite térmico con alta temperatura o con ganancia térmica obtenida en los recuperadores de calor. Las tuberías de retorno donde circula el aceite térmico que ya perdió energía están

ubicadas en puntos de difícil acceso, pero de forma paralela y simétrica con las tuberías de aceite de alta temperatura. Por ello se asumirá el mismo valor de pérdidas que la tubería de alta temperatura, siendo consciente que está por encima del real. Por tanto, se duplica el valor de pérdidas calculado para el planteamiento del diseño.

$$Q_{\text{total tuberías}} = 14.42 \cdot 2 \text{ kW} = 28.84 \text{ kW}$$

Según los resultados tabulados, la pérdida total de energía térmica durante el recorrido del aceite térmico por la tubería es de 28.84 kW.

3.4 Levantamiento de energía transferida

En adelante se destacarán los valores de tasa de transferencia total en los diferentes puntos de intercambio de calor de los equipos ya mencionados en el capítulo 2. Esta información es tomada de documentación técnica del fabricante y en el anexo 15 se visualizan los valores que a continuación se describe.

3.4.1 Purificadoras de aceite lubricante

Según la información encontrada en documentación de la planta, cada intercambiador que se utiliza para la transferencia térmica tiene una tasa de 30 kW. Cada motor cuenta con un dispositivo purificador, por lo tanto, son 5 intercambiadores que suman un total de tasa de transferencia de calor de 150 kW.

3.4.2 Purificadoras de combustible

Los intercambiadores de estos equipos descritos en el capítulo 2, son de tipo placa y transfieren de la misma manera que los de aceite lubricante. Sin embargo, su tasa de transferencia es de 150 kW cada uno, según la documentación técnica. La planta cuenta con

dos equipos de purificación de combustible por lo que la tasa de transferencia de calor total para la purificación de combustible es de 300 kW.

3.4.3 Calentadores de combustible

La tasa de transferencia de cada calentador es de 75 kW y la suma de los 5 dispositivos existentes resultan en un total de tasa de transferencia de calor de 375 kW.

3.4.4 Tanques

En cuanto a los tanques de combustible el tanque de recibimiento cuenta con una tasa de transferencia de calor de 50 kW para mantener la temperatura adecuada y pueda fluir el combustible al siguiente punto de proceso. El tanque de servicio diario de combustible en cambio requiere una tasa de 10 kW.

El tanque de lodos requiere una tasa de transferencia de calor de 10 kW para disponer su contenido hacia los vertederos y luego ser despachados hacia los depósitos del cliente.

Por su parte el tanque de licores de combustible que se encuentra a subnivel del suelo tiene una tasa de 5 kW.

3.4.5 Pit de lodos

Los *pits* o depósitos de aguas aceitosas que se encuentran en diferentes zonas de la planta son cuatro en total, cada uno con una tasa de transferencia de 5 kW para un total de 20 kW.

3.5 Consumo de energía calórica de la planta

La sumatoria de tasas de todos los puntos de transferencia de calor es:

$$Q_{\text{transferencia total}} = (Q_{\text{Pur.A}} + Q_{\text{Pur.C}} + Q_{\text{cal}} + Q_{\text{Tanq}} + Q_{\text{pits}}) \text{kW}$$

$$Q_{\text{transferencia total}} = (150 + 300 + 375 + 75 + 20) \text{kW} = 920 \text{ kW}$$

Sumando los valores de las pérdidas y de las transferencias en los dispositivos obtenemos el valor de tasa de energía consumida en la planta.

$$Q_{\text{total}} = (28.84 + 920) \text{kW} = 948.84 \text{ kW} = 949 \text{ kW}$$

Este valor de tasa de transferencia es el total de la planta en condiciones ideales.

Las calderas o recuperadores de calor son los que aportan ganancia de energía al sistema de aceite térmico. Cuando la planta está en servicio con su capacidad total de generación brindan un aporte de 250 kW por cada recuperador, lo que resulta en un máximo de 1250 kW de energía aportada al sistema. Por tanto:

$$\% \text{ calor consumido} = \frac{Q_{\text{total}}}{Q_{\text{ganancia}}} \quad (14)$$

$$\% \text{ Calor consumido} = \frac{949 \text{ kW}}{1250 \text{ kW}} \cdot (100) = 75.9\%$$

$$\% \text{ Calor perdido} = \frac{Q_{\text{pérdidas tubería}}}{Q_{\text{ganancia}}} \quad (15)$$

$$\% \text{ Calor perdido} = \frac{28.84 \text{ kW}}{1250 \text{ kW}} (100) = 2.3 \%$$

Hay que enfatizar que los valores de tasa de los recuperadores son tomados por placas en el equipo y según documentación, dependen de la potencia generada por los motores. Tampoco se tiene en cuenta el grado de deterioro por el paso de los años del equipo y tuberías.

3.6 Condición actual de la planta

En el momento que se hizo el levantamiento de la información, la planta de generación solamente tenía 2 unidades moto generadoras en servicio. La primera generando 1.5 MW y la segunda 4.5 MW lo que equivale a un 26.6 % de su capacidad de generación. Ello significa que el proceso de calentamiento del aceite térmico no era lo suficiente para hacer la transferencia térmica deseada. En vista de la poca energía térmica generada en el momento solo había una purificadora de aceite lubricante en servicio con baja temperatura de proceso para concentrar la energía en los calentadores de combustible.

Por otro lado, los tanques de almacenamiento de combustible y el tanque servicio de combustible también se encontraban sin circulación de aceite térmico. De hecho, la bomba distribuidora de aceite térmico para la zona de patios donde están estos equipos se encontraba apagada porque eso implicaría una pérdida de energía considerable. En el momento solo había una purificadora de combustible procesando gracias a una facilidad de flujo de aceite térmico de la planta contigua por una tubería pequeña adaptada. Esta opción se utiliza solamente en casos extremos mientras no haya más equipos purificadores. Si existen otros equipos purificadores esta opción se descarta pues requiere que la planta contigua tenga todos sus motores en servicio con sus recuperadores de calor y funcionando con máxima eficiencia.

En cuanto a las pérdidas por recorrido de tubería solamente hay pérdidas en el tramo de tuberías que van hacia sala de máquinas para la purificación de aceite y el calentador de combustible.

4. Alternativas de ganancia de calor

En la Tabla 4–1 se analizan algunos factores al momento de evaluar las diferentes alternativas de ganancia de calor que son explicados en este apartado.

Tabla 4–1. Alternativas de fuentes de calor.

| Criterio | Alternativas de ganancia de calor | | | Calentador resistivo |
|--------------------------|---|---|---|----------------------|
| | Maniobras operativas | Puntos calientes | Quemadores | |
| Riesgos ambientales | Derrames | No | Requiere acometida para combustible | No |
| Afectación a producción | Parada de planta | No | No | No |
| Afectación a equipos | Mantenimientos frecuentes | No | No | No |
| Independiente al proceso | Requiere motores en funcionamiento | Requiere motores en funcionamiento. | Requiere un proceso de tratamiento al crudo | Si |
| Suficiencia energética | Requiere tiempo para obtener los resultados | No se obtiene las temperaturas deseadas | Si | Si |
| Facilidad de suministros | No | Requiere motores en funcionamiento | No hay facilidad de gas o <i>fuel oil 4</i> | Si |

4.1 Soluciones operativas

Como se mencionó anteriormente, cuando las condiciones son extremas y no hay suficiente ganancia de calor en el sistema de aceite térmico se realizan algunas maniobras

operativas para impedir que este fluido circule hacia los procesos no críticos. Por ejemplo, las bombas de distribución hacia la zona de patios dónde están los tanques y las purificadoras de combustible se apagan y el operador de la planta debe cerrar las válvulas que direccionan aceite hacia los *pits* de lodos y hacia los tanques de combustible para garantizar que no haya ninguna transferencia. Aunque es la maniobra más frecuente realizada en la planta requiere tiempo alcanzar las temperaturas ideales si la planta está totalmente apagada.

Otra maniobra que ya se mencionó es utilizar la facilidad de una tubería adaptada donde circula aceite térmico de la planta 2. Normalmente se realiza la maniobra para un sólo equipo purificador de combustible o para dos equipos si no hay más purificadoras disponibles en la planta. Sin embargo, esa facilidad es un punto crítico porque de no hacerse la maniobra correctamente el aceite térmico de la planta prestadora puede pasarse por completo a la otra quedando expuesta a que se active una protección que lleve a un *shutdown* de la planta, bien sea por bajo nivel o por bajo flujo de aceite térmico, sin mencionar el impacto ambiental por derrame de fluido y afectación al personal operativo.

En otras ocasiones también se regulan los parámetros de temperatura de la separación de combustible a temperaturas inferiores al 90°C, sacrificando así una buena limpieza con las consecuencias en los equipos por una mala purificación.

4.2 Aprovechamiento de puntos calientes

Existen otros puntos calientes dentro del proceso como es el caso del sistema de enfriamiento de la máquina con agua, donde se pueden alcanzar temperaturas hasta de 80°C. Dentro del estudio que se hizo se contempló la posibilidad de transferir calor desde estos puntos sin embargo esos valores de temperatura son inferiores a los 95°C que requieren las

purificadoras de aceite. Además de ello, las bombas del sistema de enfriamiento, a diferencia de otras plantas, tienen la particularidad de estar fijadas al motor gracias a una transmisión acoplada al cigüeñal internamente y requieren que estén en servicio el motor para funcionar.

4.3 Equipos con quemador

Otra opción que se contempló fue utilizar una fuente de energía térmica alimentada con combustible para calentar el aceite térmico, algo muy común en varias plantas de la zona. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el combustible con que se cuenta y utilizado para los motores es una mezcla de crudo y *Fuel oil 4*, en diversas proporciones, que para poder pulverizarse requiere un tratamiento térmico, por lo que no podemos usarlo para tal objetivo. La planta tampoco tiene facilidad para el uso de gases combustibles que puedan utilizarse en un equipo con quemador. Por otro lado, el combustible *Fuel oil 4* solamente está reservado para el arranque y apagado de los motores con el fin de aminorar los impactos ambientales cuando se genera energía por debajo del 50% de la potencia y mientras se efectúa un barrido del crudo en el equipo. Como es poco el consumo de *fuel oil 4*, hay un stock limitado de ese combustible para las plantas.

4.4 Calentador resistivo

De todas las opciones que se contempló esta es la más acorde a la facilidad que tiene la planta pues es totalmente independiente al proceso de la planta, se minimiza el impacto ambiental, no afecta el funcionamiento de normal de la planta ni a sus equipos y solamente requeriría hacer una modificación en cuanto a conexiones de tubería aprovechando el mismo sistema térmico ya instalado y utilizando en lo posible los mismos equipos de bombeo para este diseño.

Otra razón de peso es que se facilita la fuente de alimentación del calentador eléctrico por estar en una planta generadora de energía eléctrica. Gracias a un acople entre el barraje eléctrico de las plantas se pueden energizar equipos de la planta 1 con lo generado por la planta 2 y viceversa. En la planta hay diferentes puntos de conexión a 220 y 460 voltios dónde podemos alimentar la fuente de generación de calor planteada.

Por todas estas razones el calentador resistivo será la opción de diseño de este proyecto.

A continuación, se mencionarán características del calentador resistivo, se analizarán dos prototipos y luego se realizarán los cálculos pertinentes al diseño de este.

5. Calentador resistivo

Revisando las diferentes clases de calentadores en el mercado, se encuentran de varios tipos como los mostrados en la Figura 5-1.

Figura 5-1. Tipos de calentadores.



Nota. (1) Calentador vertical. (2) Calentador horizontal. [8]

En la Figura 5-2 se puede contemplar diversos tipos de resistencias para diferentes usos, como por ejemplo para hornos, aire, líquidos de paso, inmersión, etc.

Figura 5–2. Tipos de resistencia.



Nota. Fuente. [9]

En adelante se describirán las partes que componen el calentador.

5.1 Resistencia blindada

Es el elemento que transfiere la energía térmica al fluido. En su interior se aloja el hilo resistivo y un aislante eléctrico con buena conductividad térmica todo ello cubierto con una funda metálica que tiene contacto con el fluido a calentar. Como se observa en la Figura 5–2 existen muchas formas según la aplicación. Para el calentamiento de fluidos bien sea de inmersión o de paso, como es el caso de nuestro diseño, son muy comunes las de tipo U pues tienen mayor tasa de transferencia. Cada tramo con esa forma se le denomina elemento y puede haber varios en una sola resistencia. Para una conexión trifásica se utilizan en grupos de 3 elementos. En la Figura 5–3 se puede ver que algunos elementos en U que contienen varias vueltas para abarcar mayor área de transferencia en espacios reducidos.

Figura 5–3. Resistencias de inmersión y paso.



Nota. (1) Resistencias con brida. (2) Resistencia con racor. [10]

5.1.1 Funda

Es el cubrimiento metálico de la resistencia blindada que tiene contacto con el fluido a calentar. Se caracteriza por su alta resistencia mecánica y a vibraciones. En el mercado hay de diversos materiales como el cobre, titanio y el acero inoxidable. Para el calentamiento del aceite térmico es frecuente el uso del acero inoxidable AISI 304, 304L, 316, 316L además de otros en la industria. Son sometidos a un tratamiento de recocido para poder ser moldeados según la necesidad. En cuanto a sus calibres los encontramos de diversos diámetros como por ejemplo 5/8, 1/2, 7/16, 5/16 y 1/4 de pulgada.

Para este diseño se utilizará funda de acero inoxidable AISI 316 que se caracteriza por su alta resistencia a la corrosión causada por cloruros y solventes industriales gracias al contenido de 3% de molibdeno. Es el segundo tipo de acero inoxidable más usado en la industria y muy frecuente en sectores petroleros.

5.1.2 Material aislante

Lo que se requiere del material aislante es una alta resistencia eléctrica, Esta característica es muy importante ya que debe garantizar que no haya corrientes de fuga desde el hilo resistivo que afecten la salud de las personas [11]. Igualmente debe tener una alta conductividad térmica para que no obstaculice el flujo de calor desde el hilo resistivo hasta el fluido. El material más común para este elemento es el óxido de magnesio (MgO) en forma de gránulos o polvo el cual cumple con ambas condiciones. Algunas de sus características se visualizan en el anexo 16.

5.1.3 Hilo resistivo

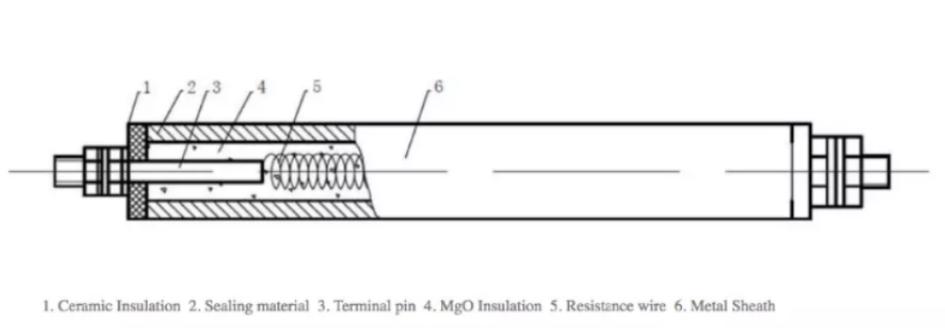
Podría decirse que es la vida del calentador pues es el elemento transformador de la energía eléctrica en energía calórica gracias al efecto Joule producido por el paso de la corriente eléctrica en toda su longitud.

Según el ambiente, la temperatura máxima alcanzada y la técnica de construcción se puede fabricar con diversas aleaciones como Cobre-Níquel, Níquel-Cromo, Hierro-Cromo-Aluminio y Hierro-Níquel, siendo las tres últimas las más utilizadas en el calentamiento de fluidos térmicos por las altas temperaturas obtenidas. En el diseño a efectuar se usará un hilo resistivo de níquel (80%) y cromo (20%), llamado comúnmente Nicrom, el cual se caracteriza entre otras cosas por una resistividad más alta y una buena resistencia a la oxidación bajo calor con muy buenas características mecánicas a altas temperaturas. También permite grandes variaciones de temperatura en atmósferas agresivas por lo que puede ser útil en ambientes sulfurosos y carbonosos, común en zonas petroleras, además de

la larga vida que las caracteriza [12]. En el anexo 17 y 18 se puede visualizar algunas características térmicas y eléctricas de interés.

La forma del hilo resistivo en el interior de la tubería es importante pues es bobinado para efecto de aprovechamiento de toda la longitud y para absorber los efectos de la expansión térmica. También se encuentra algo estirada con el fin de evitar sobrecalentamientos en el hilo resistivo y mantener su vida útil. Se recomienda una relación de diámetro de la bobina entre 3 y 6 veces el diámetro del hilo y una relación de estiramiento 3:1 [13]. La Figura 5-4 muestra un ejemplar del elemento en su interior.

Figura 5-4. Elemento tubular.



Nota. Fuente [14]

5.1.4 Elemento sellador

El elemento sellador en general son siliconas de diversos grados que impide que la resistencia tenga contacto con la humedad alargando la vida útil de esta y permite aislar el pin de contacto eléctrico con la funda. Además, cuenta con un separador para aislar los cables terminales de la funda.

5.1.5 Elementos de fijación

Entre los más comunes se encuentran los racores. Estos solo son útiles hasta ciertos diámetros. Debido a que la fijación de estos requiere tuercas internas en el cilindro calentador, no son ventajosas para los equipos con varias resistencias a la hora de un mantenimiento que implique reparación o cambio. Algunas veces, cuando es posible, se puede roscar el agujero del tanque donde va instalada o adaptar una tuerca del mismo material soldada externamente. También se consiguen tapones con la misma finalidad del racor y se escogen dependiendo del tamaño de las resistencias blindadas, pero hay poca variedad de tamaños igual que el racor.

Las bridas ciegas son otros elementos de fijación. Estos llevan soldadas los elementos blindados en su diámetro interno y a su vez son fijados en el tanque con tornillos. Las hay de acero al carbono y acero inoxidable según la aplicación. Resultan provechosas en aplicaciones de mayor tamaño por su variedad en el mercado. Es el elemento que se empleará en este proyecto.

Una anotación importante es que el sistema de aceite térmico por ser cerrado no debe tener contacto con el oxígeno del ambiente para evitar oxidación de la sustancia. Tal caso produce la descomposición de la sustancia creando depósitos de lodos en el sistema. Tener oxígeno en el sistema también aumenta la probabilidad que, durante un sobrecalentamiento con condiciones de punto de inflamación y autoignición, se produzca una combustión. Por tal motivo la fijación de la resistencia debe impedir el flujo de aire al compartimiento donde circula el aceite térmico.

5.2 Tanque de circulación

Es el dispositivo que alberga el fluido a calentar. Puede estar dispuesto de manera vertical u horizontal y puede usarse bien sea como tanque de almacenamiento del fluido para ser calentado o como medio calentador a medida que pasa el fluido impulsado por bombas.

En el diseño de este proyecto el calentador será de paso y tendrá una disposición horizontal. Los cálculos se efectuarán con una longitud máximo disponible en la zona de instalación de 4 m y un diámetro interno aproximado de 0.45 m. El calentador se fabricará con el mismo material instalado en los colectores de alta y baja temperatura, a saber, acero P235GH TC1 especial para altas presiones.

5.3 Conexión eléctrica

Los dispositivos calentadores cuentan con bornes donde se realiza la conexión eléctrica entre los extremos de los elementos resistivos y la fuente eléctrica. La conexión puede ser monofásica o trifásica y pueden ir conectadas en triángulo o en estrella. Dicha conexión se realiza directamente a los terminales de cada elemento en U de cada resistencia del calentador. Además de ello se puede implementar una caja para control y monitoreo de variables para mayor precisión y seguridad del sistema. La planta de generación eléctrica donde se instalará este dispositivo cuenta con facilidades de conexión trifásica tanto en 220 y 460 V.

6. Selección del equipo calefactor

En este apartado se evaluará dos prototipos de calentador. El primero con una sola resistencia que permita suministrar la potencia demandada por los equipos a utilizar. El segundo con varias resistencias que sumadas brinden la tasa de transferencia deseada.

En la descripción de las tasas de transferencia en diferentes equipos del proceso, cuando la planta está idealmente en servicio, se observó que la suma de ellas resultaba en alrededor de 948 kW. Pero en el caso más extremo en que la planta esté apagada se necesita menor tasa de transferencia solo para el servicio de purificación de aceite y de combustible.

Ya se mencionó que las purificadoras de aceite son utilizados con planta apagada o si un motor está apagado para pre lubricar el cigüeñal girándolo dos vueltas con aceite a una temperatura de 50°C, obtenidos gracias el intercambiador de placas. La razón de esta maniobra es para mantener una película de aceite internamente y proteger el cigüeñal de cualquier tipo de contaminación producida por el ambiente. Con ello también se evita deformidades en el cigüeñal y en los asientos del rodamiento del generador debido al peso de estos componentes.

El aceite con este valor de temperatura fluye fácilmente y penetra por todos los compartimientos internos. Así se garantiza que en una puesta en marcha urgente no se produzcan afectaciones a los componentes internos del motor que puedan inhabilitarlo y permite que el arranque sea menos forzado y más rápido. Esta maniobra será el interés inicial en el uso de energía térmica de este proyecto.

Cómo se mencionó los intercambiadores de calor de cada purificadora de aceite trabajan con una tasa de transferencia de 30 kW por lo que la sumatoria de los 5 equipos

resulta en el valor inicial de diseño para el cálculo de la resistencia a saber, 150 kW. Las pérdidas generadas por recorrido del aceite térmico hacia sala de máquinas según el anexo 14 es de 7967.5 W, pero se duplica al asumir el mismo valor de pérdidas en la tubería de retorno del aceite.

$$P = VI = (150 + 15.93) \text{ kW} = 166 \text{ kW} \quad (16)$$

El flujo de aceite térmico será el provisto por las bombas de circulación de aceite térmico ya instalado puesto que conectan el circuito formado por el colector de alta y de baja temperatura.

Si bien es cierto, cada fabricante de resistencias según su experiencia y materiales usados tienen valores estipulados de carga térmica necesaria para el calentamiento del aceite térmico, todos concuerdan en que dicho valor debe ser bastante bajo para evitar deterioro del aceite por sobrecalentamiento. Se recomienda para calentadores de paso mantener la carga térmica entre 2 y 4 W/cm² [15]. Para el caso de los prototipos a evaluar se tomará como valor de flujo de calor de 4 W/cm².

6.1 Cálculo prototipo A

$$\dot{q} = \frac{E \text{ generado}}{A \text{ hilo}} = \frac{E \text{ generado}}{\pi \cdot d \cdot L} \quad (17)$$

$$d \cdot L = \frac{E \text{ generado}}{\pi \cdot \dot{q}} = \frac{166000 \text{ W}}{\pi \cdot 4 \text{ W/cm}^2} = 13210 \text{ cm}^2$$

De la relación diámetro y longitud de la resistencia blindada se tiene en cuenta los diámetros comerciales de tubería de acero inoxidable para este tipo de resistencias y se halla las longitudes correspondientes. Anteriormente se había mencionado que hay una longitud disponible para el calentador de 4 m, pero se planteará inicialmente una longitud de

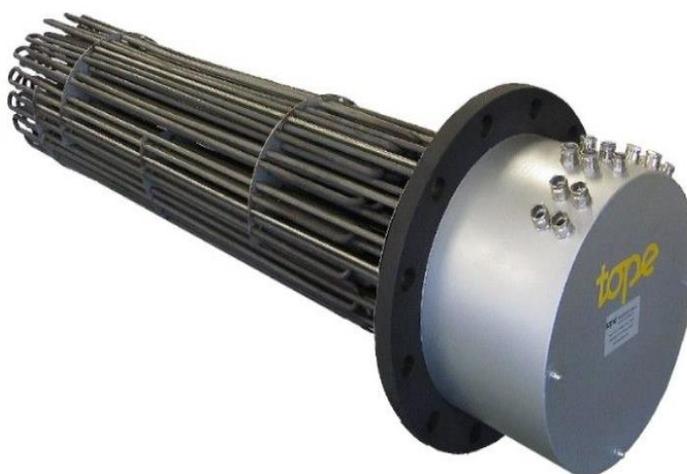
resistencia máxima de 290 cm para obtener el número de elementos. En la Tabla 6–1 se recogen los valores resultantes según los diámetros de tubería comerciales.

Debido a que la conexión eléctrica de estas resistencias será trifásica en estrella se escogen números de elementos múltiplos de tres, por lo que se puede tomar un valor de 18 elementos de la resistencia con tubería de diámetro 1/2 de pulgada. En la Figura 6–1 se muestra un ejemplo de este tipo de resistencia.

Tabla 6–1. Elementos de prototipo A según relación $d \cdot l$.

| Diámetro comercial pulgada | Diámetro cm | Longitud cm | Longitud máxima cilindro cm | Número de elementos |
|----------------------------|-------------|-------------|-----------------------------|---------------------|
| 5/8 | 1.59 | 8321 | | 14 |
| 1/2 | 1.27 | 10402 | | 18 |
| 7/16 | 1.11 | 11888 | 290 | 20 |
| 5/16 | 0.79 | 16643 | | 29 |
| 1/4 | 0.64 | 20803 | | 36 |

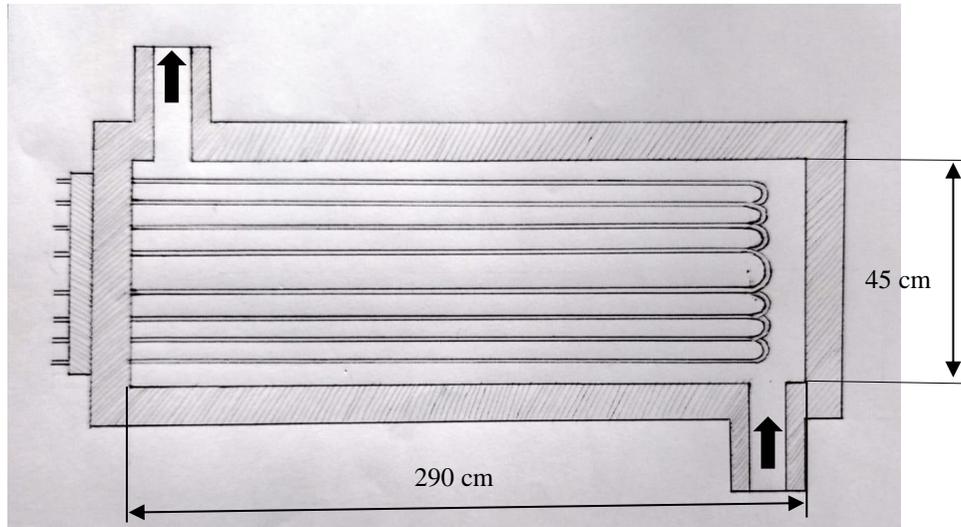
Figura 6–1. Resistencia tipo horizontal.



Nota. Fuente [16]

En la Figura 6–2 se puede observar un esquema del diseño del prototipo A.

Figura 6–2. Diseño de prototipo A.



Nota. Prototipo con 18 elementos en forma de U. Fuente propia.

6.2 Cálculo prototipo B

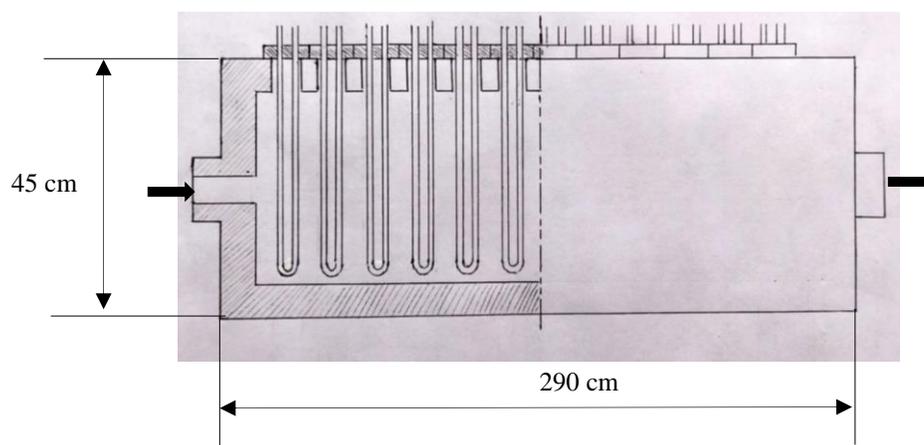
Con la misma relación diámetro y largo de la resistencia blindada y en base a los diámetros de acero inoxidable contemplados en la Tabla 6–2, se hace el cálculo con una longitud de la resistencia vertical máxima de 45 cm, que es el valor aproximado del diámetro interno del cilindro, y se obtiene el número de elementos con la cantidad de resistencias necesarias para la potencia demandada.

En este prototipo para una tubería de 1/2 pulgada se obtiene 110 elementos en forma de U distribuidos en 37 resistencias, o también 18 resistencias con doble vuelta y 12 resistencias con triple vuelta, que se instalan verticalmente en el cilindro tal como se muestra en la Figura 6–3.

Tabla 6–2. Elementos del prototipo B.

| Diámetro comercial pulgada | Diámetro cm | Longitud cm | Longitud máxima cilindro cm | Número de elementos | 1 vuelta | 2 vueltas | 3 vueltas |
|----------------------------|-------------|-------------|-----------------------------|---------------------|----------|-----------|-----------|
| 5/8 | 1.59 | 7920 | | 88 | 29 | 15 | 10 |
| 1/2 | 1.27 | 9900 | | 110 | 37 | 18 | 12 |
| 7/16 | 1.11 | 11314 | 45 | 126 | 42 | 21 | 14 |
| 5/16 | 0.79 | 15840 | | 176 | 59 | 29 | 20 |
| 1/4 | 0.64 | 19800 | | 220 | 73 | 37 | 24 |

Nota. Los valores contemplados en las últimas tres columnas son las cantidades de resistencias verticales resultantes según el número de vueltas aplicados a los elementos.

Figura 6–3. Diseño prototipo B.

Nota. Prototipo con 12 resistencias en forma de triple U. Fuente propia

6.3 Selección del prototipo

A continuación, en la Tabla 6–3 se hará una comparación de ambos prototipos, según criterios técnicos, y se escogerá el más ventajoso para el diseño a efectuar.

Tabla 6–3. Comparación prototipo A y B.

| Criterio | Prototipo A | Prototipo B |
|-----------------------------|-------------|-------------|
| Alto costo de fabricación | Si | No |
| Alto costo de transporte | Si | No |
| Mano de obra especializada | Si | No |
| Facilidad de instalación | No | Si |
| Alto costo de Mantenimiento | Si | No |
| Seguridad de proceso | Si | Si |

Aunque ambos diseños ocupan la misma área destinada para el montaje y requieren el mismo punto de acometida eléctrica ya instalada en la zona, el prototipo B resalta por algunas ventajas:

- La fabricación requiere menos costo por ser menos complejo que el prototipo A y además se puede construir el cilindro y las resistencias con fabricantes distintos.
- El desplazamiento a la región de la planta de generación no requiere de mayor cuidado o de transporte especializado como ocurre en el prototipo A.
- El montaje y la puesta en marcha requiere de personal calificado, pero no exclusivamente del fabricante, lo cual resulta en un bajo costo de instalación.
- Es más viable la instalación, pues el área donde va ubicada no cuenta con el espacio suficiente para herramientas de izaje y no tiene la facilidad para levantamiento de cargas con vehículos algo que se requiere en el caso del prototipo A.
- El mantenimiento no es tan complejo pues se puede desmontar cualquier resistencia en caso de reparación o cambio sin afectar en gran medida el funcionamiento del equipo, a diferencia del prototipo A que requiere

inhabilitar todo el dispositivo y contar con espacio suficiente para el desarme y evaluación.

- El prototipo B permite activar secuencialmente las resistencias según a la necesidad de energía térmica que se requiera, inclusive sin un automatismo complejo.

En vista de lo anterior se elige el prototipo B para este proyecto y se procede a efectuar el diseño correspondiente en adelante.

7. Diseño del calentador resistivo

Ya seleccionado el prototipo se reevalúa los requerimientos necesarios para realizar el diseño final.

Al principio se anotó que la necesidad inicial era el calentamiento del aceite lubricante a 50°C para la prelubricación y virado de los cigüeñales de cada motor en la planta 1. Esta maniobra solo requiere transferencia una sola vez cada 12 horas en cada unidad motora.

Si se optara por hacer la prelubricación y virado del cigüeñal al mismo tiempo en las 5 unidades motoras solo se requiere 150 kW, sin contar pérdidas en las tuberías, por un periodo de 5 minutos equivalente a aproximadamente dos vueltas de este. Si se optara por hacer la maniobra en cada equipo uno a uno solo se necesitaría 30 kW, sin contar las pérdidas en tuberías, en cada unidad durante los 5 minutos.

En el caso del calentamiento del combustible, la otra necesidad planteada para este diseño, como se proyecta un caso extremo de planta apagada el consumo de combustible será nulo. Teniendo en cuenta que el proceso de purificación en estos equipos es a un flujo de 6 m³/h, requerirán aproximadamente 8 horas de purificación para llenar el tanque de servicio HT002 de 50 m³ para luego recircular al tanque de almacenamiento. Esto implica que solo se necesita un purificador de combustible en esta condición con 150 kW de tasa de transferencia.

Se tiene presente que el valor de las pérdidas calculados en las tuberías y plasmadas en el anexo 14 es de 14.42 kW por recorrido. Al incluir las pérdidas por tubería de retorno del aceite térmico resulta un total de 28.84 kW como se explicó en el ítem 3.3.

Entonces al evaluar la potencia requerida para el diseño se presentan varias opciones:

- Tomar el consumo de todas las separadoras de aceite.

$$Q = (5 \cdot Q_{\text{Pur.A}} + Q \text{ pérdidas})\text{kW}$$

$$Q = (150 + 28.84)\text{kW} = 178.84 \text{ kW}$$

- Tomar el consumo de todos los equipos mencionados.

$$Q = (5 \cdot Q_{\text{Pur.A}} + Q_{\text{Pur.C}} + Q \text{ pérdidas})\text{kW}$$

$$Q = (150 + 150 + 28.84)\text{kW} = 328.84 \text{ kW}$$

- Tomar el consumo de una purificadora de combustible y otra de aceite.

$$Q = (Q_{\text{Pur.A}} + Q_{\text{Pur.C}} + Q \text{ pérdidas})\text{kW}$$

$$Q = (30 + 150 + 28.84)\text{kW} = 208.84 \text{ kW}$$

La primera opción también servirá para hacer funcionar la purificadora de combustible. Sin embargo, obligaría a detener el proceso del combustible cada vez que necesitemos energía, aunque sea en una purificadora de aceite. Por otro lado, se debe hacer un proceso de limpieza con *fuel oil 4* en la purificadora de combustible cada vez que sale de servicio y sería un gasto no proyectado de este fluido.

El valor de la segunda opción es un poco más alto, lo que requiere un diseño de calentador de mayor capacidad, aunque su aprovechamiento total solo sería por unos minutos en la jornada.

La configuración de la última opción permitiría realizar la maniobra de virado y prelubricación en cada motor sin necesidad de discontinuar el proceso de combustible.

Con esto en mente, la potencia necesaria en las condiciones de planta apagada y como base de este proyecto será la última opción.

Se procede a efectuar el diseño:

$$Q = (Q_{\text{Pur.A}} + Q_{\text{Pur.C}} + Q_{\text{pérdidas}}) \text{kW} = (30 + 150 + 28.84) \text{kW} = 208.84 \text{kW}$$

Se tomará el valor de 210 kW y con esa potencia se garantiza energía para las purificadoras de combustible y aceite más distantes.

$$Q = P = V \cdot I = 210 \text{kW}$$

En adelante se tomarán sugerencias de algunos fabricantes para el cálculo de los diversos elementos.

7.1 Cálculo del diámetro del hilo resistivo

El diámetro del hilo se calculará para un solo elemento en U de la resistencia. Este valor será similar para todos los elementos en todas las resistencias.

El calentador a diseñar tiene una potencia redondeada de 210 kW y por las razones contempladas en el ítem 6.3 se puede distribuir ese valor en 20 resistencias de 10.5 kW cada una. Debido a que es una conexión trifásica se plantea que cada resistencia tenga 3 elementos en U que aporte 3500 W cada uno.

Se tiene presente también que el diámetro del cilindro calentador internamente tiene un máximo de 45 cm, por lo que se toma prudentemente como longitud máxima de cada elemento este mismo valor.

Cada elemento cuenta con una longitud llamada zona fría o no útil (LNC). Esta zona ubicada en los extremos de la funda se utiliza para la conexión del hilo resistivo y los

terminales exteriores. Para el prototipo se tomará una longitud recomendada por un fabricante de mínimo 40 mm en el caso de las resistencias blindadas lisas [17].

Sumando la longitud de la zona fría nos resulta una longitud de 49 cm. Duplicando el valor de la zona útil es aproximadamente la longitud de trabajo por cada elemento en forma de U, a saber 90 cm.

Se mencionó en el ítem 5.1.3 que el hilo se encuentra en forma de bobina estirada con una relación 3:1.

$$L \text{ de trabajo} = 3 \cdot (L \text{ de bobina cerrada}) = 0.9 \text{ m} \quad (18)$$

$$L \text{ de bobina cerrada} = \frac{L \text{ de trabajo}}{3} = \frac{0.9 \text{ m}}{3} = 0.3 \text{ m}$$

Para este diseño se utilizará la relación del diámetro de la bobina 6:1 por lo mencionado en el ítem 5.1.3.

$$L \text{ de bobina cerrada} = L \text{ hilo (m)} \cdot \frac{1000 \cdot d \text{ (mm)}}{\pi \cdot (d + D)(\text{mm})} = \frac{1000 \cdot d \text{ (mm)}}{\pi \cdot (d + 6d)(\text{mm})} \quad (19)$$

$$L \text{ hilo(m)} = \frac{L \text{ de bobina cerrada} \cdot 7\pi}{1000} = \frac{300 \text{ mm} \cdot 7\pi}{1000} = 6.6 \text{ m cada elemento}$$

Ahora se calculan algunos valores eléctricos. El voltaje de línea V_L que alimentará el calentador según la facilidad de la planta es de 460 V y el tipo de conexión a realizar es estrella.

$$V_L = V_F \cdot \sqrt{3} \quad (20)$$

$$V_F = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{460 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 265.6 \text{ V (por cada elemento de la resistencia)}$$

$$I = \frac{P}{V_F} = \frac{3500 \text{ W}}{265.6 \text{ V}} = 13.18 \text{ A} \quad (21)$$

$$R = \frac{V_F}{I} = \frac{265.6 \text{ V}}{13.17 \text{ A}} = 20.15 \Omega \quad (22)$$

En base a las tablas y referencias del anexo 17 se obtiene el factor de resistencia del hilo níquel cromo 80-20 en función de su temperatura de trabajo [18]. Se escoge el valor de 1.015 correspondiente a una temperatura de 200°C (473.15 K), teniendo presente que el rango de temperatura de trabajo del calentador es entre 100 y 140°C. (373.15 - 413.15) K

$$R_{20^\circ\text{C}} = \frac{R_{\circ\text{T}}}{f} = 20.15 \Omega \quad (23)$$

$$R_{\circ\text{T}} = R_{20^\circ\text{C}} \cdot f = 20.15 \Omega \cdot 1.015 = 20.46 \Omega$$

Ahora se puede hallar un valor de Ω/m .

$$\frac{\Omega}{\text{m}} = \frac{R_{\circ\text{T}}}{L_{\text{hilo}}} = \frac{20.46 \Omega}{6.6 \text{ m}} = 3.09 \Omega/\text{m}$$

Al consultar la tabla en el anexo 18 se escoge el valor más cercano de 3.014 Ω/m que corresponde a un alambre con diámetro de 0.7 mm. Se puede notar que mientras mayor es el valor Ω/m , menor será el diámetro del alambre.

7.2 Cálculo de longitud del hilo resistivo

Una vez obtenido el diámetro del hilo se corrige entonces la longitud del hilo con el valor de resistividad correspondiente según la tabla del fabricante.

$$L_{\text{hilo}} = \frac{20.46 \Omega}{3.014 \Omega/\text{m}} = 6.78 \text{ m} = 678 \text{ cm}$$

Utilizando la ecuación 17 se obtiene la carga térmica del hilo resistivo.

$$\dot{q} = \frac{E_{\text{generado}}}{\pi \cdot d \cdot L_{\text{hilo}}} = \frac{3500 \text{ W}}{\pi \cdot 0.07 \text{ cm} \cdot 678 \text{ cm}} = 23.47 \text{ W}/\text{cm}^2$$

Sin embargo, este valor es muy alto para lo recomendado. En este punto podemos modificar bien sea el diámetro del hilo o su longitud para obtener la carga térmica inferior planteada para el hilo resistivo de 12 W/cm^2 .

$$L_{\text{hilo}} = \frac{P}{\pi \cdot d \cdot p} = \frac{3500 \text{ W}}{\pi \cdot 0.07 \text{ cm} \cdot 12 \text{ W/cm}^2} = 1326.3 \text{ cm} = 13.26 \text{ m}$$

7.3 Cálculo de tubo blindado

Utilizando la ecuación 18 y 19 se tiene:

$$L \text{ de bobina cerrada (mm)} = L \text{ hilo(m)} \cdot \frac{1000 \cdot d \text{ (mm)}}{\pi \cdot (d + 6d) \text{ (mm)}} = 13.26 \text{ m} \cdot \frac{1000}{7\pi} = 603$$

$$L \text{ de trabajo} = 3 \cdot (L \text{ de bobina cerrada}) = 3 \cdot 603 \text{ mm} = 1809 \text{ mm} = 180.9 \text{ cm}$$

La longitud de trabajo será la longitud del tubo por cada elemento en U de cada resistencia. Para hallar la carga térmica superficial del tubo recurrimos a la ecuación:

$$\dot{q} = \frac{E \text{ generado}}{\pi \cdot d \cdot L_{\text{tubo}}} = \frac{3500 \text{ W}}{\pi \cdot d \cdot 180.9 \text{ cm}}$$

Como se mencionó antes, la mayoría de fabricantes de calentadores concuerdan que la carga térmica aplicada al aceite térmico debe ser baja. Algunos mencionan que en resistencias tubulares la carga específica puede alcanzar los 6 W/cm^2 [19]. Como se puede observar en la Tabla 7-1 se realiza el cálculo con los diferentes diámetros de tubería comercial de acero inoxidable y longitud de 180.9 cm para obtener los diferentes valores de carga térmica. La tubería de 7/16 de pulgada, que permitirá ocupar menos espacio y hacer las curvaturas sin inconveniente, ofrece un valor de densidad de carga de 5.54 W/cm^2 manteniéndose dentro del valor permisible para este tipo de resistencia.

Tabla 7-1. Carga térmica según diámetros de tubería.

| Diámetro comercial pulgada | Radio cm | Carga Térmica W/cm ² |
|-------------------------------|-------------|------------------------------------|
| 5/8 | 0.79 | 3.88 |
| 1/2 | 0.64 | 4.85 |
| 7/16 | 0.56 | 5.54 |
| 5/16 | 0.40 | 7.76 |
| 1/4 | 0.32 | 9.70 |

Nota. Los valores son basados en la longitud de trabajo calculada de 180.9 cm

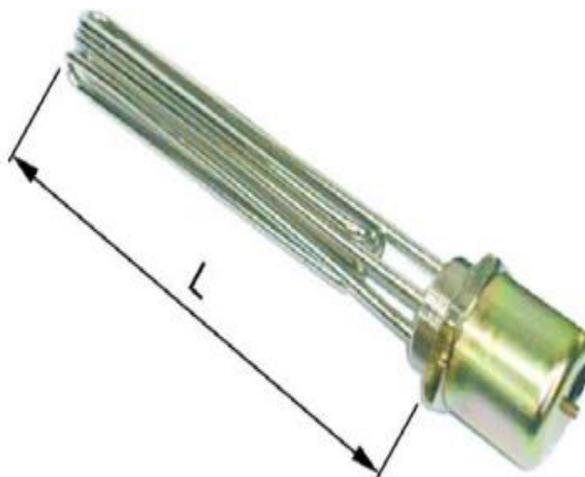
7.4 Cálculo de elemento resistivo

Con el valor de longitud de trabajo se puede hallar la longitud máxima de resistencia en forma de U.

$$L \text{ máxima de resistencia} = \frac{L \text{ de trabajo}}{2} = \frac{180.9 \text{ cm}}{2} = 90.45 \text{ cm} \quad (24)$$

Sin embargo, esta longitud implicaría aumentar el diámetro del cilindro calentador a ese valor, lo cual no es viable por el espacio reducido en el sitio de instalación. Se opta por la longitud planteada al inicio de los cálculos de 45 cm. En este punto se puede realizar el diseño utilizando elementos con doble y triple vuelta como el mostrado en la Figura 7-1.

Figura 7-1. Resistencia con elementos en triple vuelta.



Nota. Fuente [20].

Para hallar las vueltas por cada elemento:

$$\text{Cantidad de vueltas} = \frac{L \text{ de trabajo}}{2 \cdot L \text{ máxima de resistencia}} = \frac{180.9 \text{ cm}}{2 \cdot 45 \text{ cm}} = 2 \quad (25)$$

En el anexo 19 se relaciona las distintas cantidades de vueltas que se pueden configurar según el valor de carga térmica y del diámetro del hilo resistivo para la potencia de 3500 W que debe suministrar cada elemento. Según los datos obtenidos se escoge una resistencia con 3 elementos de doble vuelta para una carga térmica del hilo resistivo de 12 W/cm² y un diámetro de 0.7 mm.

Para la formación de las vueltas se sugiere un radio medio de curvatura mínimo ($r_{\text{curv mín.}}$) de 1.5 veces el diámetro del tubo [21]. Esta medida además de que protege la integridad de la funda, también impide que el hilo de níquel- cromo en condiciones muy frías corra el riesgo de romperse o agrietarse.

$$r_{\text{curv mín.}} = 1.5 \cdot D_{\text{tubo}} = 1.5 \cdot 1.11 \text{ cm} = 1.6 \text{ cm} \quad (26)$$

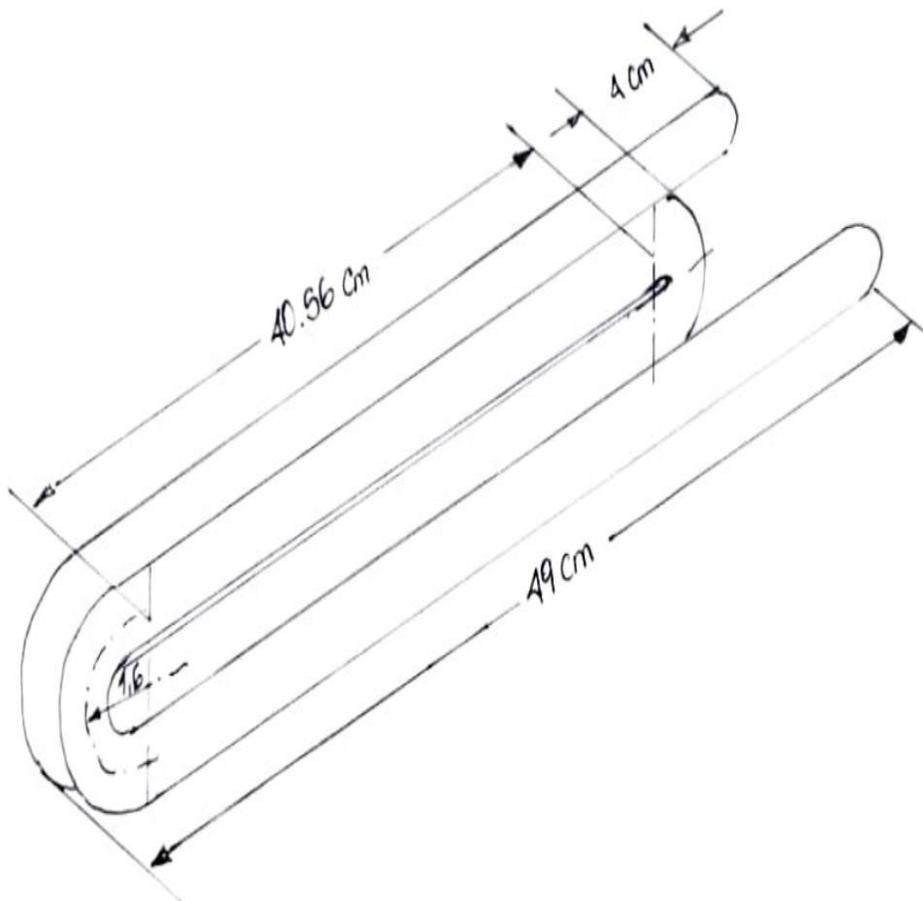
$$L \text{ máxima} = B + 2r_{\text{curv m\u00edn}} + D_{\text{tubo}} + L_{\text{NC}} = 49 \text{ cm} \quad (27)$$

$$B = L \text{ m\u00e1xima} - 2r_{\text{curv m\u00edn}} - D_{\text{tubo}} - L_{\text{NC}}$$

$$49 \text{ cm} - (2 \cdot 1.66) \text{ cm} - 1.11 \text{ cm} - 4 = 40.56 \text{ cm}$$

El esquema de la Figura 7-2 da una idea del elemento con los datos obtenidos.

Figura 7-2. Esquema elemento blindado calculado.

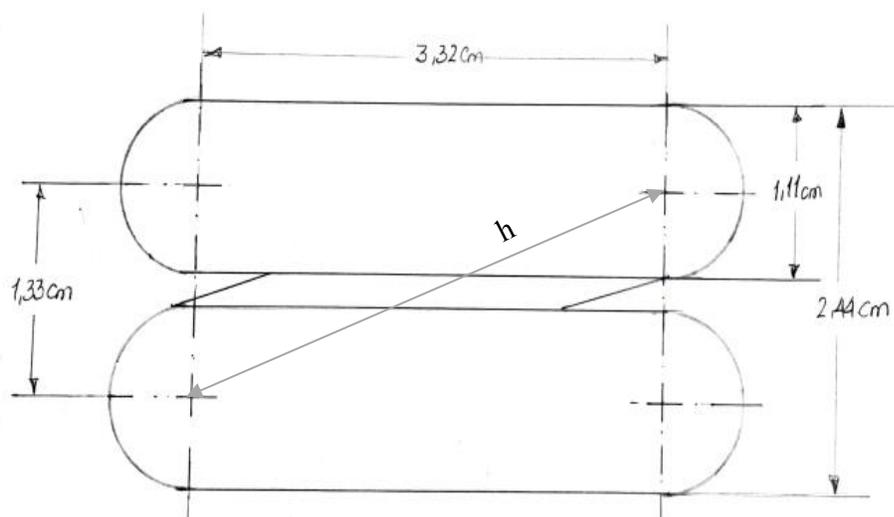


Nota. Fuente propia

7.5 C\u00e1lculo de racor y terminales

Para calcular el racor a utilizar se debe hallar la distancia entre terminales (h) y el \u00e1rea cuadrada del lado que conecta al racor de acople. Para ello nos valemos del esquema de la Figura 7-3.

Figura 7-3. Área de curvas del elemento.



Nota. Fuente propia.

Por construcción:

$$h = \sqrt{2 \cdot r_{\text{curv m\u00edn}}^2 + 1.33^2} = \sqrt{(3.32 \text{ cm})^2 + (1.33 \text{ cm})^2} = 3.58 \text{ cm} \quad (28)$$

$$\text{Area} = (2 \cdot r_{\text{curv m\u00edn}} + d) \cdot 2.44 \text{ cm} = (3.32 + 1.11) \text{ cm} \cdot 2.44 \text{ cm} = 10.80 \text{ cm}^2$$

$$\text{Area de 3 elementos} = 3 \cdot A = 3 \cdot (10.80) \text{ cm}^2 = 32.42 \text{ cm}^2 = 3242 \text{ mm}^2$$

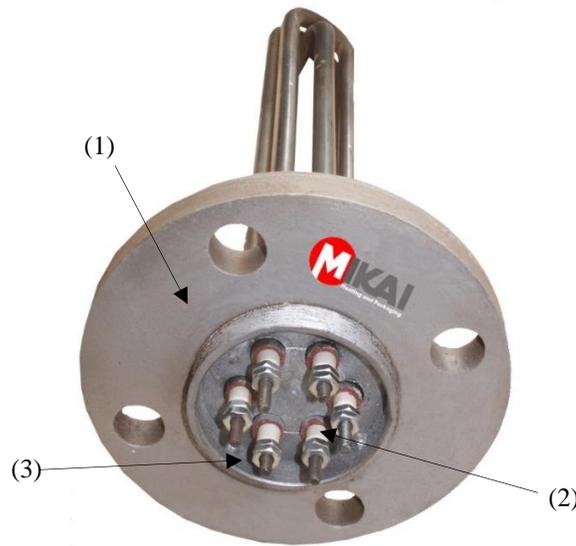
Revisando el anexo 20 se escoge una brida ciega DN 50 con di\u00e1metro externo de 152 mm y di\u00e1metro interno de 92.1 mm con \u00e1rea mayor al ocupado por los elementos donde ir\u00e1n distribuidos y soldados.

$$A_{\text{brida}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 91.2 \text{ mm}^2}{4} = 6532 \text{ mm}^2 \quad (29)$$

Los terminales de cada elemento constan de pines roscados que se sueldan al hilo resistivo internamente y externamente se fijan los cables de alimentaci\u00f3n el\u00e9ctrica justo en la zona fr\u00eda del elemento tubular. Cabe mencionar que estas terminaciones son aisladas con

unos separadores de teflón o resina para evitar cualquier contacto eléctrico no deseado con el elemento como el mostrado en la Figura 7-4.

Figura 7-4. Terminal de elemento tubular.



Nota. (1) Brida. (2) Aislante. (3) Conectores roscados. [22].

7.6 Cálculo de cilindro calentador

En una sección anterior se anotó que el diámetro interior disponible para el montaje de las resistencias es de 45 cm. Ya que se ha obtenido especificaciones de la brida a instalar se puede obtener la longitud total necesaria para el montaje de estas. Se contemplará una resistencia de respaldo en caso de sacar de servicio alguna, por lo que el diseño del cilindro y su conexión eléctrica será en base a 21 resistencias instaladas con tres elementos de doble vuelta cada una. Se puede dejar prudentemente un espaciado de 1 cm entre las bridas para facilitar la fijación de estas. Se dejará una distancia suficiente para la instrumentación que sea necesaria.

$$L_{\text{Calentador}} = (21 \cdot 15.2 \text{ cm.}) + (22 \cdot 1 \text{ cm}) + 18.8 \text{ cm} = 360 \text{ cm} \quad (30)$$

El cilindro en mención debe tener tuberías de ingreso y salida del aceite térmico. Se tiene presente que el accionamiento del calentador se efectuará una vez la planta se encuentre fuera de servicio y la temperatura del aceite térmico alcance un valor mínimo de 373.15 K en el sistema. La temperatura requerida de calentamiento será de 413.15 K para que las purificadoras de combustible, que tienen mayor tasa de transferencia de calor, hagan su proceso. Para calcular los diámetros se halla el flujo en el calentador:

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T = 210 \text{ kW} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \frac{Q}{C_p \cdot \Delta T} = \frac{210 \text{ kW}}{2.612 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \cdot (413.15 - 373.15)\text{K}} = \frac{210 \text{ kJ/s}}{104.48 \text{ kJ/kg}} \\ &= 2 \text{ kg/s} \end{aligned} \quad (32)$$

$$\dot{v} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{2 \text{ kg/s}}{855 \text{ kg/m}^3} = 2.35 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 8.46 \text{ m}^3/\text{h} \quad (33)$$

La ubicación del calentador se plantea idealmente en el espacio disponible entre los colectores de aceite térmico de baja y alta temperatura. Con esta ubicación se garantiza la menor pérdida posible de energía por recorrido del fluido pues hay un tramo de conexión de 12 m incluyendo la longitud del calentador para realizar la conexión. Se prefiere utilizar el equipo de bombeo ya instalado debido al espacio reducido que impide realizar cualquier otro montaje. Por lo tanto, idealmente estará conectado en paralelo al circuito correspondiente a la circulación de aceite hacia la caldera del motogenerador 3. Queda en potestad del cliente elegir el circuito de su preferencia mientras se respeten las longitudes aquí sugeridas.

Con ayuda de la ecuación 1 y los anexos 1, 4 y 5 se hallan otras características, pero antes se define las siguientes variables.

$Q_1 = \dot{V}$ = Flujo de aceite térmico en el calentador = $8.46 \text{ m}^3/\text{h}$

d_1 = Diámetro en la tubería de ingreso y salida del calentador (m)

l_1 = Distancia entre los puntos de conexión del calentador = 12 m

d_2 = Diámetro en la tubería de circulación de aceite térmico = 0.1m

l_2 = Distancia del recorrido del aceite térmico en circuito de caldera 3 = 100 m

Q_T = Flujo impulsado por la bomba = $48 \text{ m}^3/\text{h}$

$$Q_1 = Q_T \cdot \frac{\frac{d_1^{5/2}}{\sqrt{l_1}}}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i^{5/2}}{\sqrt{l_i}}} = Q_T \cdot \frac{\frac{d_1^{5/2}}{\sqrt{l_1}}}{\frac{d_1^{5/2}}{\sqrt{l_1}} + \frac{d_2^{5/2}}{\sqrt{l_2}}}$$

$$d_1 = \sqrt[5]{\sqrt{l_1} \cdot \left(\frac{\frac{d_2^{5/2}}{\sqrt{l_2}}}{\frac{Q_T}{Q_1} - 1} \right)} = \sqrt[5]{\sqrt{12 \text{ m}} \cdot \left(\frac{\frac{(0.1\text{m})^{5/2}}{\sqrt{100 \text{ m}}}}{\frac{48 \text{ m}^3/\text{h}}{8.46 \text{ m}^3/\text{h}} - 1} \right)} = 0.0353 \text{ m} \quad (34)$$

Este último es el valor del diámetro interno de la tubería necesaria para el flujo paralelo del aceite térmico. La tubería normalizada más próxima el valor calculado es la DN 32. Esta conectará al calentador con la tubería de descarga de la bomba de circulación de aceite térmico correspondiente al motogenerador 3, la cual succiona del colector de baja temperatura. Igualmente, otra tubería del mismo diámetro conectará al calentador con el colector de alta temperatura.

Ahora se rectifica el valor del flujo con el diámetro DN 32.

$$Q_1 = Q_T \cdot \frac{\frac{d_1^{5/2}}{\sqrt{11}}}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i^{5/2}}{\sqrt{11}}} = 48 \cdot \left(\frac{\frac{0.032^{5/2}}{\sqrt{12}}}{\frac{0.032^{5/2}}{\sqrt{12}} + \frac{0.1^{5/2}}{\sqrt{100}}} \right) = 6.88 \text{ m}^3/\text{h}$$

Con este valor de flujo se puede obtener ΔT

$$\dot{v} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \dot{m} = \dot{v} \cdot \rho = 6.88 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 855 \text{ kg}/\text{m}^3 = 1.63 \text{ kg}/\text{s}$$

$$\Delta T = \frac{Q}{C_p \cdot \dot{m}} = \frac{210 \text{ kJ}/\text{s}}{2.612 \text{ kJ}/\text{kg K} \cdot 1.63 \text{ kg}/\text{s}} = 49.2 \text{ K}$$

El ΔT calculado está dentro de la aceptable pues el ΔT normal de los equipos purificadores de combustible, que son los de mayor consumo, está por debajo del generado según las mediciones efectuadas en sitio tal como se visualiza en la Figura 7–5. Esto confirma además que la ubicación y longitudes de la conexión del calentador es la adecuada.

$$\Delta T \text{ purificadora} = (130.7 - 99.3)^\circ\text{C} = (403.85 - 372.45)\text{K} = 31.4 \text{ K}$$

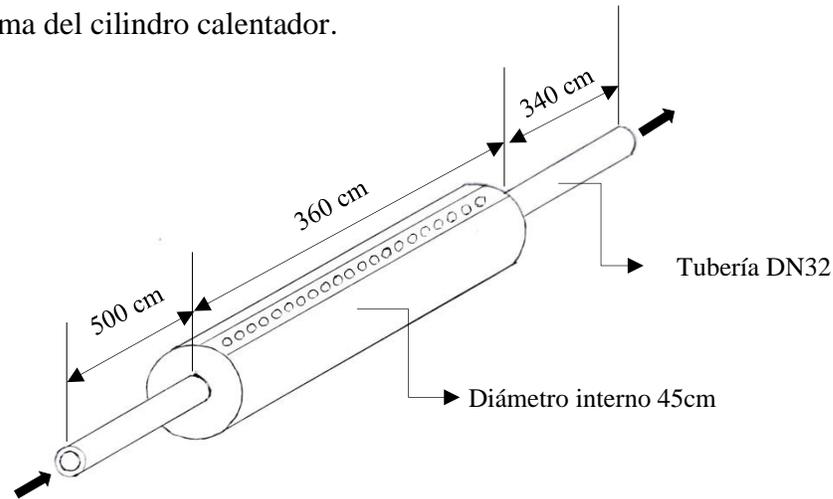
Figura 7–5. Temperaturas de aceite térmico en purificadoras de combustible.



Nota. (1) Temperatura a la entrada del calentador. (2) Temperatura a la salida del calentador. Tomado en casa de tratamiento de planta de generación.

En la Figura 7–6 se muestra un esquema del calentador a diseñar.

Figura 7–6. Esquema del cilindro calentador.



Nota. Fuente propia

En cuanto al aislante térmico se sugiere el mismo material utilizado en las tuberías con un espesor de 4 pulgadas. Con las ecuaciones formuladas en el capítulo 3 se obtiene las pérdidas en el cilindro.

$$V_{\text{prom}} = \frac{\dot{V}}{A_c} = \frac{6.88 \text{ m}^3/\text{h}}{\frac{\pi \cdot (0.450\text{m})^2}{4}} = 0.012 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{V_{\text{prom}} \cdot d_{\text{tubo}}}{\nu} = \frac{0.012\text{m/s} \cdot 0.450\text{m}}{5.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 1039.87 \text{ Flujo laminar (Re} < 4000)$$

$Nu = 4.36$ para flujo laminar

$$h_1 = \frac{k \cdot Nu}{d} = \frac{0.1189 \frac{\text{W}}{\text{m K}} \cdot 4.36}{0.450 \text{ m}} = 1.152 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Se plantea la misma temperatura de operación promedio y valores del aire hallados en el ítem 3.1 y anexo 11 para calcular el valor de h_2 .

$$T_{\text{prom}} = \frac{T_{\text{superficie}} + T_{\text{ambiente}}}{2} = \frac{(308.15 + 301.65)\text{K}}{2} = 305.15 \text{ K}$$

$$Re = \frac{V_{\text{aire}} \cdot d_{\text{tubo aislado}}}{\nu_{\text{aire}}}_{305.15 \text{ K}} = \frac{(2.1 \text{ m/s}) \cdot (0.6612 \text{ m})}{1.627 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 85342$$

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr_{\text{aire}}^{\frac{1}{3}}}{[1 + (0.4/Pr_{\text{aire}})^{\frac{2}{3}}]^{\frac{1}{4}}} \cdot [1 + (Re/282000)^{5/8}]^{4/5}$$

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62 \cdot (85342)^{\frac{1}{2}} (0.7276)^{\frac{1}{3}}}{[1 + (0.4/0.7276)^{\frac{2}{3}}]^{\frac{1}{4}}} \cdot [1 + (85342/282000)^{5/8}]^{4/5} = 196$$

$$h_2 = \frac{k_{\text{aire}} \cdot Nu}{d_{\text{tubo aislado}}} = \frac{0.02603 \text{ W/mK} \cdot 196}{0.6612 \text{ m}} = 7.7 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Para hallar la resistencia térmica.

$$R_{\text{interior}} = \frac{1}{h_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot L} = \frac{1}{1.152 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0.225 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}} = 0.61 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{tubería}} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{tub}} \cdot L} = \frac{\ln(0.229 \text{ m} / 0.225 \text{ m})}{2 \cdot \pi \cdot 60.5 \text{ W/mK} \cdot 1 \text{ m}} = 4.63 \cdot 10^{-5} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{aislamiento}} = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{ais}} \cdot L} = \frac{\ln(0.331 \text{ m} / 0.229 \text{ m})}{2 \cdot \pi \cdot 0.049 \text{ W/mK} \cdot 1 \text{ m}} = 1.19 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{exterior}} = \frac{1}{h_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot L} = \frac{1}{7.7 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0.331 \text{ m}^2} = 0.062 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{total}} = (0.61 + 4.63 \cdot 10^{-5} + 1.19 + 0.062) \text{ K/W} = 1.86 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

La temperatura del aceite térmico en el calentador es de 140°C (413.15 K)

$$Q = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{\text{total}}} = \frac{413.15 \text{ K} - 301.65 \text{ K}}{1.86 \text{ K/W}} = 59.9 \text{ W/m}$$

$$Q_{\text{pérdidas en cilindro}} = 59.9 \frac{\text{W}}{\text{m}} \cdot 3.6 \text{ m} = 216 \text{ W}$$

Aplicando el mismo método de cálculo se halla la pérdida de 6701 W debido a la circulación paralela de aceite en la tubería DN 100 en un recorrido de 100 m con flujo de 41.12 m³/h.

7.7 Conexión eléctrica

7.7.1 Generalidades

El circuito tiene una potencia máxima de 220.5 kW correspondientes a la sumatoria de 21 resistencias de 10.5 kW cada una. El sistema de distribución eléctrico será trifásico 460 – 265.5 V a 60 Hz. Se alimentará directamente de la red existente de baja tensión que se encuentra en zona de bombas de aceite térmico de la planta 1 y de uso exclusivo de la central de generación.

El circuito tiene contemplado una protección principal para proteger la acometida desde el tablero de control de bombas del sitio y una condición de bloqueo automático controlado por un sensor de nivel tipo capacitivo con rango de temperatura personalizada a 300°C instalado antes de la tubería de descarga, el cual supervisa que el cilindro siempre tenga un nivel alto de aceite circulando. En apartados anteriores se comentó que la resistencia debe estar totalmente sumergidas en el fluido y solo cuenta con una longitud fría de 40 mm que no la afectaría con el fin de proteger las resistencias de daño por sobrecalentamiento al trabajar en vacío.

Igualmente contempla una supervisión de temperatura con RTD PT100 de platino con rango de 0-300°C de 3 hilos y carga por resorte con su termo pozo a la medida, ubicado en la tubería de salida del calentador, con un panel digital para monitoreo y control.

La potencia del calentador será regulada por siete grupos de resistencias, conformados cada uno por tres resistencias de 10.5 kW. Cada grupo de 31.5 kW tendrá una protección ferromagnética, que alimentará un barraje donde se derivará una parcial para cada resistencia individual. Esta configuración se realiza con el fin de optimizar el mantenimiento o la sustitución de una resistencia sin sacar de servicio el grupo o el equipo completo.

Cada grupo de resistencia tiene contemplado una conexión a un contactor controlado por un temporizador digital, esto con el fin de ir aumentando la potencia gradualmente y evitar picos elevados de corriente.

La carga será resistiva pura (100%) con factor de potencia $F_p = 1$ y todo el circuito será puesto a tierra unido al STP de la subestación de zona de bombas de aceite térmico en planta 1.

Para los cálculos se tienen en cuenta los siguientes valores.

$$\text{Corriente parcial por grupo} = I_{\text{carga}} = \frac{31.5 \text{ kW}}{460 \cdot \sqrt{3}} = 39.54 \text{ A}$$

$$\text{Corriente total} = I_{\text{carga}} = \frac{220.5 \text{ kW}}{460 \cdot \sqrt{3}} = 276.76 \text{ A}$$

En la Tabla 7-2 se analiza el cuadro de carga general del circuito.

Tabla 7-2. Cuadro de carga del calentador.

| Grupo | Cantidad de resistencias | Tensión V | Potencia por resistencia kW | Potencia por grupo kW | Corriente A |
|---------|--------------------------|---------------|-----------------------------|-----------------------|-------------|
| 1 | 3 | 460 trifásica | 10.5 | 31.5 | 39.54 |
| 2 | 3 | 460 trifásica | 10.5 | 31.5 | 39.54 |
| 3 | 3 | 460 trifásica | 10.5 | 31.5 | 39.54 |
| 4 | 3 | 460 trifásica | 10.5 | 31.5 | 39.54 |
| 5 | 3 | 460 trifásica | 10.5 | 31.5 | 39.54 |
| 6 | 3 | 460 trifásica | 10.5 | 31.5 | 39.54 |
| 7 | 3 | 460 trifásica | 10.5 | 31.5 | 39.54 |
| Totales | 21 | | | 220.5 | 276.76 |

Inicialmente se efectuarán los cálculos por capacidad de corriente.

7.7.2 Acometida principal de baja tensión para el tablero

Tramo: Desde tablero de alimentación

Longitud: 5 m

Carga: 220.5 kW

$V_L = 460$ V

Para el cálculo de los conductores se tiene en cuenta [23]:

$$I_{\text{carga}} = \frac{220.5 \text{ kW}}{460 \cdot \sqrt{3}} = 276.75 \text{ A}$$

$$I_{\text{conductor}} = I_{\text{carga}} \cdot 1.25 \tag{35}$$

$$I_{\text{conductor}} = 276.76 \text{ A} \cdot 1.25 = 345.94 \text{ A}$$

La corriente se dividirá en dos para proyectar dos acometidas.

$$I_{\text{conductor}} = \frac{345.94 \text{ A}}{2} = 172.96 \text{ A}$$

Según datos de tablas del anexo 21 se toma el calibre superior al calculado a 75°C por pasar una corriente mayor a 100 A.

Para este caso el conductor seleccionado 2 #4/0 AWG-THHN, $I_n = 230$ A, 75°C.

Para el totalizador general:

$$I \text{ carga} = 276.76 \text{ A}$$

Se selecciona una protección o totalizador general de 3 x 300 A, asegurando el paso de la corriente de carga por debajo del régimen.

7.7.3 *Parciales, grupos de resistencias*

Tramo: Desde la protección hasta el barraje.

Longitud: 2 m

Carga: 31.5 kW

Tensión: 460 V trifásica

$$I \text{ carga} = \frac{31.5 \text{ kW}}{460 \cdot \sqrt{3}} = 39.5 \text{ A}$$

$$I \text{ conductor} = 39.5 \text{ A} \cdot 1.25 = 49.42 \text{ A}$$

Según datos de tablas del anexo 21 se toma el calibre superior al calculado a 60°C pues la corriente es menor a 100 A.

Para este caso el conductor seleccionado #6 AWG-THHN, $I_{\text{nominal}} = 55$ A, 60°C

Para el totalizador general:

$$I \text{ carga} = 39.5 \text{ A}$$

Se selecciona un interruptor tiempo inverso trifásico breaker 50 A, asegurando el paso de la corriente de carga por debajo del régimen.

7.7.4 *Circuito resistencia individual*

Tramo: Tablero hasta la resistencia

Longitud: 15 m

Carga: 10.5 kW

Tensión: 460 trifásica

$$I_{\text{carga}} = \frac{10.5 \text{ kW}}{460 \cdot \sqrt{3}} = 13.18 \text{ A}$$

$$I_{\text{conductor}} = 13.18 \text{ A} \cdot 1.25 = 16.48 \text{ A}$$

Según datos de tablas del anexo 21 se toma el calibre superior al calculado a 60°C.

Para este caso el conductor seleccionado #12 AWG THHN, $I_{\text{nominal}} = 25 \text{ A}$, 60°C

Estos cables contarán con terminales tipo ojete aislado para su conexión con las resistencias y se utilizarán aisladores de teflón para evitar contactos con la funda metálica.

Para el totalizador general

$$I_{\text{carga}} = 13.18 \text{ A}$$

Se selecciona un interruptor de tiempo inverso trifásico, breaker 20 A, asegurando el paso de la corriente de carga por debajo del régimen.

7.7.5 *Cálculo de secciones con factores de corrección*

Con este método se comprobará el calibre de los conductores calculados aplicando factor de corrección por temperatura ambiente y por agrupamiento [24, p. 293].

Se tiene en cuenta que la zona de instalación esta solo cubierto por un techo y a la intemperie. Con datos proporcionados por el IDEAM se obtiene un valor de temperatura ambiente anual que no sobrepasa los 35°C en la zona del Meta [25]. Ahora con ayuda de las tablas del anexo 22 basados en la norma NTC 2050 [26]. se obtiene el factor de

temperatura según temperatura de trabajo y ambiente. El factor por agrupamiento depende de la cantidad de conductores que van por el ducto.

$$I_{\text{conductor}} = I_{\text{nominal}} \cdot f_{\text{temp}} \cdot f_{\text{grupo}} \quad (36)$$

Los valores de los conductores hallados por tabla son:

Conductores de acometida principal: AWG 4/0 = $I_{\text{nominal}} = 230$ A, 4 conductores

$$I_{\text{conductor}} = 230 \text{ A} \cdot 0.94 \cdot 0.8 = 172.96$$

Conductores de grupos de resistencia: AWG 6 = $I_{\text{nominal}} = 55$ A, 3 conductores

$$I_{\text{conductor}} = 55 \text{ A} \cdot 0.91 \cdot 1 = 50.05 \text{ A}$$

Conductores de grupos de resistencia: AWG 12 = $I_{\text{nominal}} = 25$ A, 4 conductores

$$I_{\text{conductor}} = 25 \text{ A} \cdot 0.91 \cdot 0.8 = 18.2 \text{ A}$$

En la Tabla 7–3 se resume y comparan los valores de sección de conductor hallados por ambos métodos y debe cumplirse que:

$$I_{\text{factores de corrección}} \geq I_{\text{capacidad de corriente}}$$

Tabla 7–3. Resumen intensidades para elección de secciones.

| AWG | I_{nominal} A | $I_{\text{factores de corrección}}$ A | $I_{\text{capacidad de corriente}}$ A |
|-----|---------------------------|--|--|
| 4/0 | 230 | 172,96 | 172,96 |
| 6 | 55 | 50,05 | 49,42 |
| 12 | 25 | 18,2 | 16,48 |

En todos los casos la sección escogida es la adecuada. La Tabla 7–4 es un resumen de los elementos calculados.

Tabla 7-4. Conductores y protección eléctrica.

| Circuito | Potencia | I nominal | I conductores | Breakers | | Calibre alambrado | | |
|---------------------------|----------|-----------|---------------|----------|-----|-------------------|---------|----|
| | W | A | A | Polo | A | F | N | T |
| Acometida tablero | 220.500 | 276.8 | 345.9 | 3 | 300 | 2 x 4/0 | 2 x 2/0 | 4 |
| Grupo 1 | 31.500 | 39.5 | 49.4 | 3 | 50 | 6 | | |
| Grupo 2 | 31.500 | 39.5 | 49.4 | 3 | 50 | 6 | | |
| Grupo 3 | 31.500 | 39.5 | 49.4 | 3 | 50 | 6 | | |
| Grupo 4 | 31.500 | 39.5 | 49.4 | 3 | 50 | 6 | | |
| Grupo 5 | 31.500 | 39.5 | 49.4 | 3 | 50 | 6 | | |
| Grupo 6 | 31.500 | 39.5 | 49.4 | 3 | 50 | 6 | | |
| Grupo 7 | 31.500 | 39.5 | 49.4 | 3 | 50 | 6 | | |
| Resistencias individuales | 10.500 | 13.2 | 16.5 | 3 | 20 | 12 | | 12 |

7.7.6 *Tablero de protección TPG-CA*

El tablero de control y potencia estará instalado en la misma zona donde se encuentra el tablero de control de bombas de aceite térmico. La zona está cubierta por techo solamente con solo una pared al respaldo de los tableros y está rodeada de ductos donde circula aceite térmico y crudo. Por este tipo de exposición y teniendo en cuenta los diferentes grados NEMA del anexo 23, se opta por un gabinete NEMA 4, comunes en la industria oil & gas.

7.7.7 *Ductos para conductores*

Los ductos serán tipo Conduit SCH 40 de calidad referenciada embebido en piso techo o muro como sugiere norma RETIE [27]. También se sugiere tubería EMT la cual debe contar con un conductor a tierra a lo largo de su longitud y unido a la caja y equipo. En el anexo 22 se muestra los diferentes tamaños de ductos según el calibre del conductor y su cantidad y en base a ello la Tabla 7-5 resume los valores referentes.

Tabla 7-5. Selección de ducto.

| Circuito | Ducto pulgada | N.º Cond/ducto | Ocupación % |
|---------------------------|------------------|----------------|-------------|
| Acometida tablero | 2 1/2 | 5 | 25.11 |
| Grupo 1 | 1 | 3 | 25.20 |
| Grupo 2 | 1 | 3 | 25.20 |
| Grupo 3 | 1 | 3 | 25.20 |
| Grupo 4 | 1 | 3 | 25.20 |
| Grupo 5 | 1 | 3 | 25.20 |
| Grupo 6 | 1 | 3 | 25.20 |
| Grupo 7 | 1 | 3 | 25.20 |
| Resistencias individuales | 1/2 | 4 | 23.63 |

7.7.8 Sistema de puesta a tierra.

El tablero TGP-CA será intencionalmente puesto a tierra mediante una varilla de cobre con diámetro de 5/8 pulgada y un largo de 2.4 m instalada a un metro del tablero, respetando así las medidas y distancias mínimas requeridas por la norma RETIE [28]. Estará interconectada con un cable desnudo AWG #4 de cobre con la SPT preinstalado de la planta.

7.7.9 Distancias de seguridad

Este diseño se ajusta a las normas de seguridad contempladas en el RETIE [29] y plasmadas en el anexo 25 de este documento.

7.8 Análisis energético del equipo instalado

Realizando un análisis energético se obtiene:

Utilizando los anexos 5 y 14 donde están contempladas las distancias hacia la purificadora de combustible, se obtiene las pérdidas de tuberías DN40, DN100 y DN 125,

que son respectivamente 167.52 W, 4330.64 W y 322.79 W. El resultante de pérdida total durante el recorrido es de 9642 W asumiendo las mismas pérdidas en la tubería de retorno de aceite térmico.

$$\% \text{ calor perdido} = \frac{Q \text{ pérdidas}}{Q \text{ calentador}} \cdot (100) = \frac{9642 \text{ W}}{210 \text{ kW}} \cdot (100) = 4.59 \%$$

Utilizando los anexos 4 y 14 donde están contempladas las distancias se obtiene que la tubería DN150 hasta la purificadora de aceite lubricante del motor 5, tiene una pérdida de $2 \cdot 4201 \text{ W}$ y la tubería DN25 tiene una pérdida de $2 \cdot 654 \text{ W}$, asumiendo las mismas pérdidas en la tubería de retorno y asegurando que no haya paso de aceite térmico hacia las otras cuatro purificadoras. El resultante de pérdidas es 9709 W.

También se incluye la pérdida de 6701 W por la tubería DN100 donde circula el aceite térmico paralelamente al calentador aislado y la pérdida en el cilindro del calentador de 239 W.

$$\% \text{ calor perdido} = \frac{Q \text{ pérdidas}}{Q \text{ calentador}} \cdot (100) = \frac{9709}{210 \text{ kW}} \cdot (100) = 4.62 \%$$

Para el consumo de los equipos:

$$\% \text{ calor consumido} = \frac{Q_{\text{Pur.C}}}{Q \text{ calentador}} \cdot (100) = \frac{150 \text{ kW}}{210 \text{ kW}} \cdot (100) = 71.42 \%$$

$$\% \text{ calor consumido} = \frac{Q_{\text{Pur.C}}}{Q \text{ calentador}} \cdot (100) = \frac{30 \text{ kW}}{210 \text{ kW}} \cdot (100) = 14.28 \%$$

Consumo total por proceso:

$$\begin{aligned} \% \text{ calor purificación combustible} &= \frac{(150 + 9.642 + 0.216 + 6.701) \text{ kW}}{210 \text{ kW}} \cdot (100) \\ &= 79.31 \% \end{aligned}$$

$$\% \text{ calor purificación aceite} = \frac{(30 + 9.709 + 0.216 + 6.701) \text{ kW}}{210 \text{ kW}} \cdot (100) = 22.2 \%$$

Si se optara por tener en servicio una purificadora de combustible y una de aceite al tiempo se obtiene:

$$\% \text{ calor} = \frac{(30 + 150 + 9.642 + 9.709 + 0.216 + 6.701) \text{ kW}}{210 \text{ kW}} \cdot (100) = 98.22 \%$$

Cifras que indican que se puede operar dos equipos al mismo tiempo.

Conclusiones

Se realizó el levantamiento de información detallada del sistema de aceite térmico de la planta 1, que por la complejidad en la instalación de la tubería y los años en servicio, no contaba con algunas referencias normalmente visibles. Se acudió a manuales y esquemas propios de la planta para obtener una guía sobre algunos valores que luego se comprobaron. El conjunto de recuperadores de calor, que son 5 en total, generan una potencia nominal de 250 kW cada uno, cuenta con dos bombas para procesos de 80 m³/h y 150 m³/h que distribuyen el aceite térmico en los diferentes procesos de la planta. Se tomó valores de temperaturas en diferentes puntos de las tuberías donde circula aceite térmico y se promedió un valor de 35°C para los cálculos de la pérdidas. También se tomó nota de las tasas de transferencias de las purificadoras de aceite, a saber 30 kW por cada equipo, y de las purificadoras de combustible con 150 kW por cada equipo también. La sumatoria de tasas de los tanques se estableció en 75 kW. Las pérdidas calculadas fue de 28.8 kW. Con estos valores se estableció el consumo energético de todos los procesos de la planta.

En el caso de la planta 2 se levantó información que ayudó a comparar la estructura con la planta 1. Gracias a la similitud de proceso que tiene con ella se pudo comprobar datos técnicos como por ejemplo los diámetros de aislamiento de tuberías que en la planta 1 por deterioro y por inaccesibilidad no eran muy claros. Además se corroboró valores Δ de temperaturas para los purificadores de combustible muy similar a la planta 1, de alrededor de 30°C.

En su momento no había ninguna interacción entre los dos sistemas térmicos, que es la situación normal de proceso, lo que facilitó la obtención de las variables lo mas real

posible para la planta 1. Esta se encontraba en servicio con un 26.6 % de su capacidad, correspondiente a una potencia de 6.45 MW generado por dos motores, con solo una purificadoras de combustible en servicio, por el poco consumo de los equipos y una sola purificadora de aceite en proceso de incremento de temperatura para poder procesar el fluido. Ello permitió una valoración lo mas real posible a la condición planteada en la problemática.

Con la ayuda de esquemas, mediciones, hojas de cálculo, y literatura específica de cada subproceso de la generación de energía, hubo una comprensión mas clara del comportamiento de los fluidos en el sistema y se establecieron valores de referencia para los cálculos de las pérdidas térmicas y los consumos energéticos, claves en el desarrollo de la fuente de alimentación térmica a diseñar.

Se realizaron diferentes visitas a fabricantes de resistencias industriales en la ciudad de Bogotá D.C. para profundizar los conocimientos de construcción y materiales. Se observó algunas diferencias de diseño y construcción entre varios proveedores debido a los diversos materiales para los hilos resistivos utilizados, lo que se evidencia en los resultados finales de los productos ofrecidos. Esto tambien se comprobó en algunos catálogos de otros países que refieren diferentes resistencias para potencia similares a una misma carga térmica pero con diferentes materiales usados.

Con la información adquirida se propusieron dos diseños preliminares para el objetivo del proyecto, un prototipo con una sola resistencia dispuesta en su interior horizontalmente y otro con 12 resistencias dispuestas verticalmente para la misma potencia planteada y cubrir la primera necesidad de calentar el aceite lubricante en sala de motores a saber, de 166 kW y con medidas sugeridas en el cilindro donde se encuentran alojadas de

45 cm de diametro interno y 290 cm de longitud. Se escogió el segundo prototipo con resistencias verticales, pues ofrece mayores ventajas técnicas en cuanto instalación , mantenimientos y uso de mano de obra especializada.

En el trascurso del proyecto se reevaluó la necesidad térmica real para los procesos críticos que requieren el calentamiento con la condición de planta apagada, para obtener la potencia de calentador a diseñar. Por ejemplo se decidió establecer la potencia del calentador solo para una purificadora de combustible y una purificadora de aceite para que trabajaran al tiempo, puesto que en condiciones de planta apagada no es necesario el consumo de combustible y se puede realizar la maniobra de prelubricado por cada equipo sin detener el proceso de limpieza de combustible. El valor entonces fijado para ese consumo, sumado a las pérdidas por recorrido de aceite térmico fue de 210 kW, distribuidos en 20 resistencias verticales que aportan 10.5 kW cada una.

Se realizó el cálculo del prototipo iniciando desde los componentes internos para llegar a los elementos mas robustos del equipo por cada elemento que compone la resistencia. Se inició calculando el diámetro del hilo resistivo de 0.7 mm y su longitud de 6.6 m. Luego se estableció la longitud de la funda de 180.9 cm. Durante los cálculos se realizó correcciones en cuanto a forma del diseño por ello se determinó que el elemento final diseñado es de 2 vueltas. Continuando con los valores obtenidos se determinó el diámetro final del cilindro de 0.45 m. También se corrigió la longitud planteada inicialmente de 290 cm por el tipo de fijación con bridas ciegas que se utilizó y se determinó su longitud final en 3.6 m. Para este último valor obtenido se tuvo en cuenta que habría una resistencia más en el diseño, para un total de 21 resistencias instaladas , la cual serviría como respaldo en

caso de que alguna otra saliera de servicio por daño o mantenimiento. Siempre se estuvo revisando la información obtenida en los primeros objetivos.

Con ayuda de literatura sobre temas eléctricos, incluyendo normas eléctricas como la NTC 2050 y el RETIE, se evaluó el uso de las protecciones eléctricas necesarias para el funcionamiento del equipo diseñado por una potencia de 220.5 kW generado por el calentador con las 21 resistencias instaladas y funcionando. Se estableció que habrían protecciones como un totalizador general y protecciones por grupos de tres resistencias y para cada una de ellas por futuros mantenimientos. Se hizo el cálculo de los calibres a utilizar a saber AWG 4/0, 6 y 12 respectivamente, para su conexión a la fuente eléctrica que desde un inicio se había establecido de 460 V y se realizó correcciones en cuanto a la lógica de funcionamiento del circuito eléctrico, por lo que se hicieron sugerencias de instrumentos como sensor de nivel y de temperatura para la seguridad del circuito y del equipo.

Durante el transcurso del diseño se hizo uso de esquemas para conseguir el plano final del equipo y su circuito eléctrico unifilar.

En todo el proceso se fue compilando la información en borradores para consulta posterior y se fue elaborando el documento final a medida que se iban obteniendo los resultados deseados del diseño. Se anexó variada información de sugerencias de fabricantes tanto nacionales, como las obtenidas en sitios web y catálogos de otros países. Se consultó también información sobre otras áreas de conocimiento como hidráulica de fluidos, además del área térmica y eléctrica.

Aunque el desarrollo de este diseño se planteó para satisfacer una necesidad puntual en la planta de generación eléctrica, el equipo podría satisfacer otras necesidades en otros

puntos del proceso con adecuaciones específicas y podría adaptarse a diferentes plantas que tengan similitud a la del objeto del diseño.

Recomendaciones

El cliente dispondrá las adecuaciones necesarias para alimentar el TGP-CA y la habilitación del equipo según los valores de diseño.

El equipo estará conectado paralelamente al circuito correspondiente a la circulación de aceite hacia la caldera del motogenerador 3 idealmente. Aunque queda en potestad del cliente elegir el circuito de su preferencia mientras se respeten las longitudes aquí sugeridas.

Se recomienda instalar un sensor de nivel tipo capacitivo con rango de temperatura personalizada a 300°C, instalado antes de la tubería de descarga como sistema de protección a sobrecalentamientos de la resistencia. Igualmente se sugiere instalar RTD PT100 de platino con rango de 0-300°C de 3 hilos y carga por resorte con su termo-pozo a la medida, ubicado en la tubería de salida del calentador para control y monitoreo de temperaturas del fluido.

Se sugiere utilizar terminales tipo ojete aislado para conductores AWG 12 con orificio 1/4 de pulgada para conectar los terminales de las resistencias. Estos tipos de terminales también podrían utilizarse para la conexión estrella o uniones metálicas.

El cliente será responsable de aplicar las normas de seguridad referente a distancias de seguridad y será responsable de los procedimientos acordes a su sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo.

Debido a que el circuito hace parte de una ampliación al recorrido de aceite en su operación normal, se sugiere compensar el volumen de aceite correspondiente a la circulación dentro del equipo antes de entrar en operación por primera vez.

Antes de iniciar el accionamiento del calentador se debe verificar que las válvulas de conexión tanto de entrada y salida estén habilitadas y efectivamente haya flujo de aceite térmico a través de él. También se debe comprobar que la facilidad de conexión de aceite térmico con la planta 2 este cerrada. El operador deberá verificar en la instrumentación asociada las variables correctas y estará atento a cualquier condición que afecte el circuito de aceite térmico asociado al equipo.

Se debe comprobar que el circuito de aceite térmico donde esta alineado el calentador no tenga paso hacia el enfriador de aceite *dumping cooler* si se requiere encender el calentador. Igualmente se debe procurar cerrar todos los pasos de aceite térmico hacia los tanques de combustible, los *pits* de lodos y de las purificadoras que no entrarán en servicio.

En lo posible al momento de accionar el calentamiento resistivo se puede iniciar el proceso de purificación en un solo equipo bien sea de combustible o aceite lubricante. Una vez que el sistema se encuentre en estado estacionario se puede aprovechar la energía térmica para otro equipo purificadores. Las condiciones de operación permitirán decidir si se trabajará al tiempo todas las purificadoras.

El operador debe prestar atención a cualquier desviación en los parámetros de operación establecidos para el funcionamiento del equipo y reportarlos al personal especializado para no someter al equipo en riesgo por daño de resistencias.

Al momento de reestablecer la planta o las condiciones normales de operación del sistema térmico se debe verificar que no hay flujo de aceite térmico por el calentador para que todo el flujo másico sea direccionada hacia la caldera.

Se debe respetar las normas de seguridad eléctrica, que funcionan como barreras de protección a la integridad a todo el personal autorizado y que están contempladas en el RETIE.

Referencias Bibliográficas

- [1] Y. A. Cengel y Ghajar, A.J., *Transferencia de calor y masa fundamentos y aplicaciones*, 4 ed., Mexico: Mc Graw Hill, 2011.
- [2] R. A. Mendoza Sandoval, "Guía de utilización del aceite térmico en un sistema de transferencia de calor", Facultad de ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, abril 2009. [En línea]. Available: <https://tinyurl.com/y3bmj7o8>.
- [3] R. M. Inchicaqui, "Proyecto instalación de un calentador de aceite térmico de 6 000 000 Kcal/h para una planta de ácido bórico a 2513 m.s.n.m. río Seco-Arequipa", Facultad de ciencias físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú, 2009. [En línea]. Available: <https://tinyurl.com/yxgwmqp5>.
- [4] M. I. Apunte Arico, "Diseño térmico de intercambiadores de calor para crudos a manejar en una central de bombeo", Facultad de ingeniería química, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, 2015. [En línea]. Available: <https://tinyurl.com/yyyx dara>.
- [5] Colombia, Ministerio de minas y energía, Resolución, Bogotá (S.F), *Reglamento técnico de calderas*. [En línea]. Available: <https://tinyurl.com/y68b4pau>.
- [6] Colombia, Ministerio de salud, Ley 09 de 1979, Artículo 113-116, Bogotá, *Código sanitario Nacional*. [En línea]. Available: <https://tinyurl.com/y5z7m5y4>.
- [7] J. G. Saldarriaga, *Hidráulica de tuberías*, santa fé de Bogotá: Mc Graw Hill., 1998.
- [8] Europe Heaters SL. "Grupos calentadores de paso". 2022. [En línea]. Available: <http://santiescoin.com/resistencias-para-inmersion/grupos-calentadores-del-paso/>.

- [9] Europe Heaters SL. "Quienes somos". 2022. [En línea]. Available: <http://santiescoin.com/quienes-somos/>.
- [10] Europe Heaters. "Resistencias de inmersión con tapón de acoplamiento". 2022. [En línea]. Available: <http://santiescoin.com/resistencias-para-inmersion/resistencias-de-inmersion-con-tapon-de-acoplamiento/>.
- [11] Ltda., Felipe Luengas & Cia. "Oxido de magnesio". 2020. [En línea]. Available: <https://www.felipeluengas.com/materias-primas-resistencias-industriales/oxido-magnesio/>.
- [12] U. J. Astigarraga, Hornos industriales de resistencia, especial ed., Madrid. Mc Graw Hill Interamericana de España S.A., 1999.
- [13] Alloy Wire International. "Elementos bobinados o en espiral". 2022. [En línea]. Available: <https://www.alloywire.es/electrical-resistance-wire-hot-cutting-wire/heating-element-design/coiled-spiral-elements/>.
- [14] Beno Industry. "Elemento calefactor tubular de sauna". s.f.. [En línea]. Available: <https://www.benoindustry.com/heating-tube/sauna-heating-element/sauna-tubular-heating-element.html>.
- [15] Electricfor. "Resistencias para inmersión, accesorios y calentadores de bidón". 2017. [En línea]. Available: https://www.electricfor.es/ca/2818521/downloads/catalogo_2017_castellano-1722.pdf.
- [16] Resistencias tope S.A. "Resistencias de inmersión sobre brida". 2014. [En línea]. Available: <https://www.resistenciastope.com/es/10-resistencias-de-inmersion/6-resistencias-de-inmersion-sobre-brid/>.

- [17] Tre c Everwatt. "Resistencias tubulares blindadas para inmersión.". 2022. [En línea]. Available: <https://www.resistencias-electricas.com/productos/fluidos/resistencias-tubulares-para-inmersion/resistencias-tubulares-blindadas-para-inmersion/>.
- [18] Alloy Wire International. "Diseño de un elemento de alambre circular". 2022. [En línea]. Available: <http://www.alloywire.es/electrical-resistance-wire-hot-cutting-wire/heating-element-design/designing-round-wire-element/>.
- [19] Pirobloc. "Caldera eléctrica de fluido térmico". 2022. [En línea]. Available: <https://www.pirobloc.com/sistemas-de-fluido-termico-la-guia-completa/#:~:text=espec%C3%ADficas%20de%20hasta-,6%20W/cm2,-,Esto%20obliga%20a>.
- [20] Electricfor S.A. "Modelos normalizados gama ET". s.f.. [En línea]. Available: Modelos normalizados gama ET. [fotografía]. Electricfor. S.A. (https://www.clonica.net/usuario/img_usuario/electricfor.com/uploads/ET.pdf).
- [21] Tecnocurve. "Curvado de tubo. La importancia del radio de curvado". 2022. [En línea]. Available: <https://www.tecnocurve.es/blog/2019/03/26/curvado-de-tubo-la-importancia-del-radio-de-curvado/>.
- [22] Mikai. "Inmersión". 2022. [En línea]. Available: <https://www.mikai.mx/resistencias-electricas-de-inmersion/>.
- [23] H. G. Enríquez, *Guia práctica para el cálculo de instalaciones eléctricas*, 7 ed., Mexico: Limusa Noriega editores, 2004.
- [24] A. Castejon y Santamaría G, *Electrotécnia*, España: Editex, 2009.
- [25] Instituto de Hidrología. Meteorología y Estudios Ambientales. "Comportamiento mensual de temperatura 2021". 2021. [En línea]. Available: <https://acortar.link/86qMND>.

[26] ICONTEC. *NTC 2050*. Bogotá. 2020.

[27] Colombia. Ministerio de minas y energías. Artículo 20. Bogotá 2013. *Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE)*. [En línea]. Available: <https://tinyurl.com/y22dlst9>.

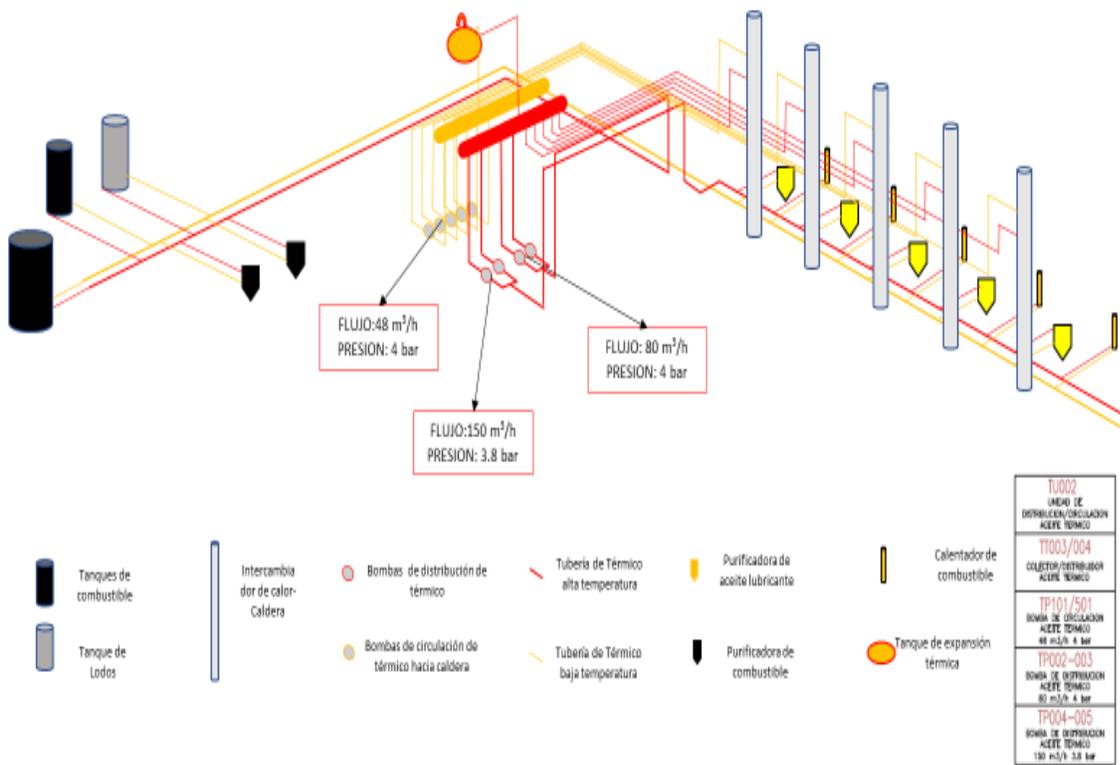
[28] Colombia, Ministerio de minas y energías. Artículo 15. Sistema de puesta a tierra, Bogotá 2013, *RETIE*. [En línea]. Available: <https://tinyurl.com/y22dlst9>.

[29] Colombia. Ministerio de minas y energías. Artículo 23. Aspectos generales de las subestaciones, Bogotá 2013, *RETIE*. [En línea]. Available: <https://tinyurl.com/y22dlst9>.

Anexos

ANEXOS

Anexo 1. Sistema de aceite térmico de planta 1



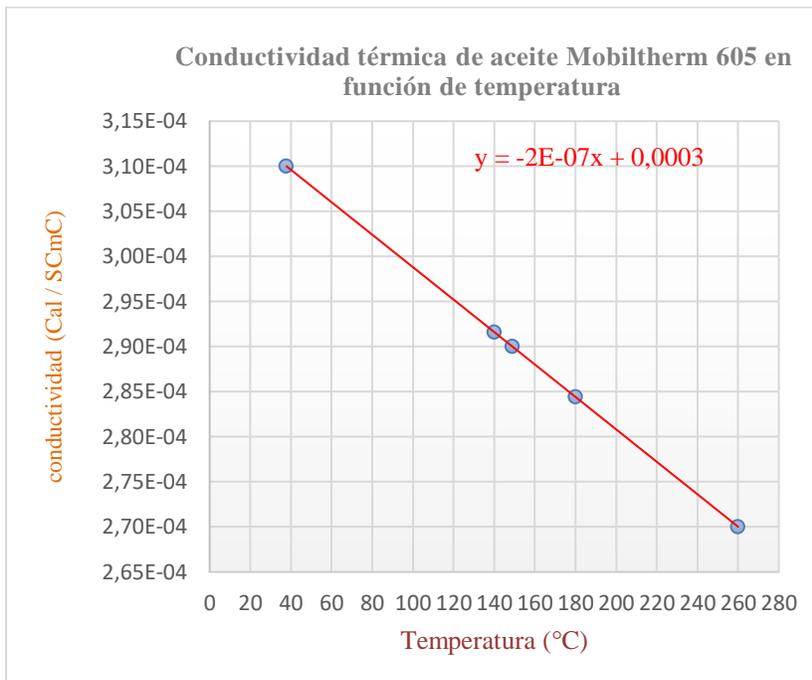
FLUJOS Y PRESIONES DEL SISTEMA DE ACEITE TERMICO

Nota. Fuente propia a partir de información tomada en equipos del sistema de aceite térmico.

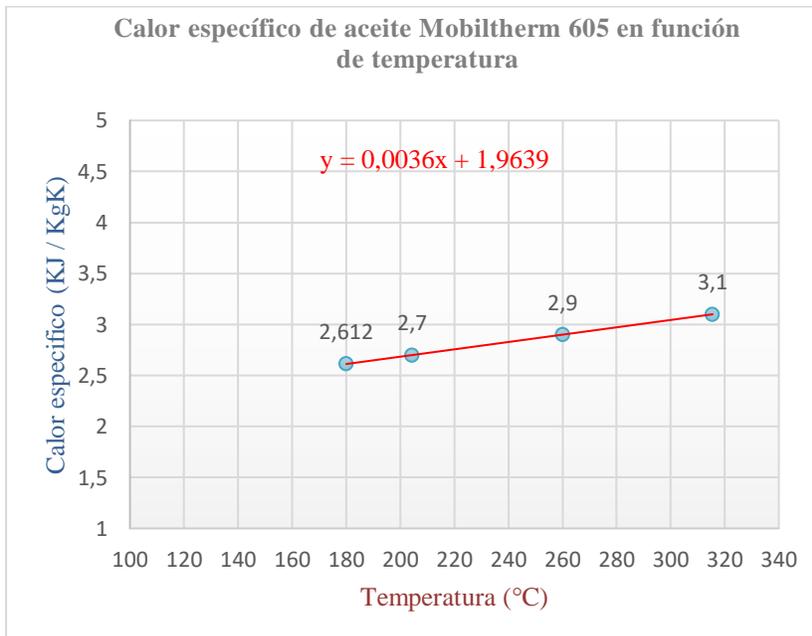
Anexo 2. Propiedades térmicas del aceite térmico Mobiltherm 605

| Mobiltherm 605 | Método de prueba | Unidad | |
|---------------------------------|------------------|------------|-----------|
| GC SimDis Residuo de carbón | ASTM D 2887 | % | 15 |
| Residuo de carbón Conradson | ASTM D 189 | % en peso | 0.05 |
| Satura | ASTM D 2007 | % en peso | 68 |
| Punto de anilina | ASTM D 611 | ° C | 120 |
| Noak volatilidad | ASTM D 5800 | % en peso | 20 |
| RBOT | ASTM D 2272 | min | 30 |
| Vapor Pressure@204.5 ° C | ASTM D 2879 | torr | 1.7 (max) |
| Presión de vapor @ 260 ° C | ASTM D 2879 | torr | 14 (max) |
| Vapor Pressure@315.5 ° C | ASTM D 2879 | torr | 70 (max) |
| Térmica Conductivity@37.8 ° C | ASTM D 2717 | cal / SCMC | 3.1 E-04 |
| Térmica Conductivity@148.9 ° C | ASTM D 2717 | cal / SCMC | 2.9 E-04 |
| Conductividad Térmica a 260 ° C | ASTM D 2717 | cal / SCMC | 2.7E-04 |
| Específicas Heat@204.4 ° C | ASTM D 2766 | kJ / kgK | 2.7 |
| Calor Específico @ 260 ° C | ASTM D 2766 | kJ / kgK | 2.9 |
| Específicas Heat@315.5 ° C | ASTM D 2766 | kJ / kgK | 3.1 |
| Destilación de GC, IBP | ASTM D 2887 | ° C | 315 |
| GC SimDis 10% recuperado | ASTM D 2887 | ° C | 385 |
| GC SimDis 30% recuperado | ASTM D 2887 | ° C | 415 |
| GC SimDis 50% recuperado | ASTM D 2887 | ° C | 430 |

Nota. Exxon Móbil. (s.f.). *Mobiltherm 605*. Recuperado de: <https://dokumen.tips/documents/data-mobil-therm-btupdf.html>



| T (°C) | K (Cal / SCmC) |
|-----------|----------------------|
| 37.8 | $3.10 \cdot 10^{-4}$ |
| 140 | $2.92 \cdot 10^{-4}$ |
| 148.9 | $2.90 \cdot 10^{-4}$ |
| 180 | $2.84 \cdot 10^{-4}$ |
| 260 | $2.70 \cdot 10^{-4}$ |



| T (°C) | Cp (kJ/Kg K) |
|-----------|-----------------|
| 204.4 | 2.7 |
| 260 | 2.9 |
| 315.5 | 3.1 |
| 180 | 2.6 |

Nota. Fuente propia a partir de información recogida en tabla de propiedades del aceite térmico Mobiltherm 605 del anexo 2.

Anexo 3. Propiedades físicas y químicas del aceite Mobiltherm 605

| | |
|-----------|--------------------------------|
| SECCION 9 | PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS |
|-----------|--------------------------------|

Las propiedades físicas y químicas se proporcionan por razones de seguridad, salud y medio ambiente y pueden no representar plenamente las especificaciones del producto.

Consulte al proveedor para información adicional.

INFORMACIÓN GENERAL

Estado físico: Líquido
 Color: Ambar
 Olor: Característico
 Umbral de olor: N/D

INFORMACIÓN IMPORTANTE PARA LA SALUD, SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE

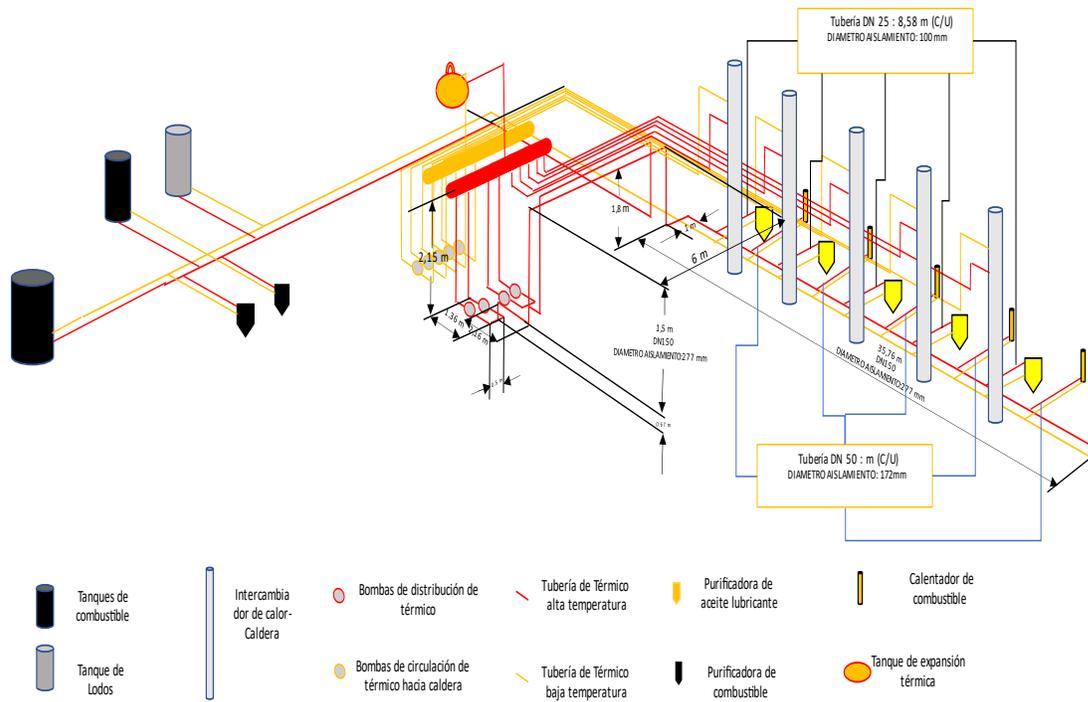
Densidad relativa (a 15 °C): 0.855
 Punto de inflamación [Método]: >200°C (392°F) [ASTM D-92]
 Límites de inflamabilidad (% aproximado de volumen en el aire): LIE: 0.9 LSE: 7.0
 Temperatura de auto inflamación: N/D
 Punto de ebullición / Rango: > 316°C (600°F)
 Densidad del vapor (Aire = 1): > 2 a 101 kPa
 Presión de vapor: < 0.013 kPa (0.1 mm Hg) a 20°C
 Velocidad de evaporación (Acetato de n-butilo = 1): N/D
 pH: N/A
 Log Pow (Logaritmo del coeficiente de partición de n-octanol/agua): > 3.6
 Solubilidad en agua: Insignificante
 Viscosidad: 30.6 cSt (30.6 mm²/seg) a 40°C | 5.2 cSt (5.2 mm²/seg) a 100°C
 Propiedades Oxidantes: Consulte la Sección de Identificación de Peligros.

OTRA INFORMACIÓN

Punto de congelamiento: N/D
 Punto de fusión: N/A
 Punto de Fluidéz: -6°C (21°F)
 Extracto DMSO (solamente aceite mineral), IP-346: < 3 %wt
 Temperatura de descomposición: N/D

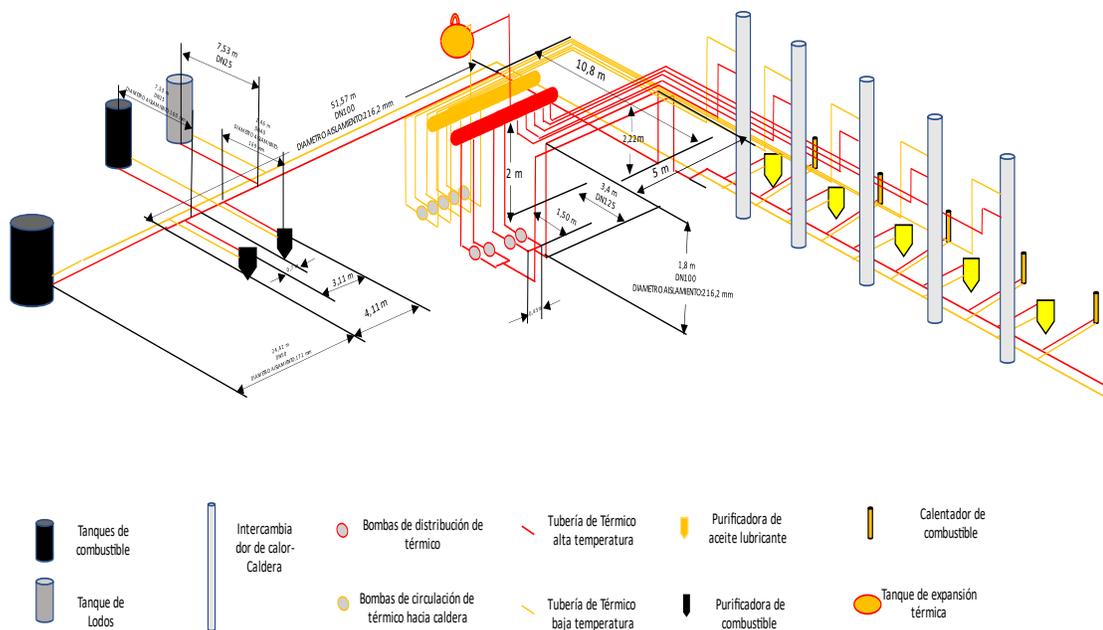
Nota. Exxon Móbil. (09 de julio de 2020). Hoja de datos de seguridad. Recuperado de: <https://sds.exxonmobil.com/Download.aspx?ID=936220&docFormat=PDF>

Anexo 4. Diámetros y longitudes de tuberías hacia sala de motores



Nota. Fuente propia a partir de información tomada en tuberías del sistema de aceite térmico.

Anexo 5. Diámetros y longitudes de tuberías hacia patios



Nota. Fuente propia a partir de información tomada en tuberías del sistema de aceite térmico.

Anexo 6. Valores de flujo según diámetros de tuberías en paralelo

| Q_T m ³ /h | Tubería | Diámetro m | Longitud m | $\frac{d_1^{5/2}}{\sqrt{l_1}}$ | Q_1 m ³ /h |
|----------------------------|---------|---------------|---------------|--------------------------------|----------------------------|
| | D150 | 0.15 | 97.78 | $8.81 \cdot 10^{-04}$ | 127.50 |
| 150 | D25 | 0.025 | 17.26 | $2.38 \cdot 10^{-05}$ | 3.44 |
| | D50 | 0.05 | 18 | $1.32 \cdot 10^{-04}$ | 19.06 |
| | D15 | 0.015 | 10.32 | $8.58 \cdot 10^{-06}$ | 0.19 |
| | D25 | 0.025 | 15.06 | $2.55 \cdot 10^{-05}$ | 0.58 |
| | D40 | 0.04 | 4.95 | $1.44 \cdot 10^{-04}$ | 3.27 |
| 80 | D50 | 0.05 | 48.84 | $8.00 \cdot 10^{-05}$ | 1.82 |
| | D100 | 0.1 | 142.78 | $2.65 \cdot 10^{-04}$ | 6.02 |
| | D125 | 0.125 | 3.4 | $3.00 \cdot 10^{-03}$ | 68.12 |
| | D100 | 0.1 | 100 | $3.16 \cdot 10^{-04}$ | 39.55 |
| 48 | D15 | 0.0353 | 12 | $6.76 \cdot 10^{-05}$ | 8.45 |

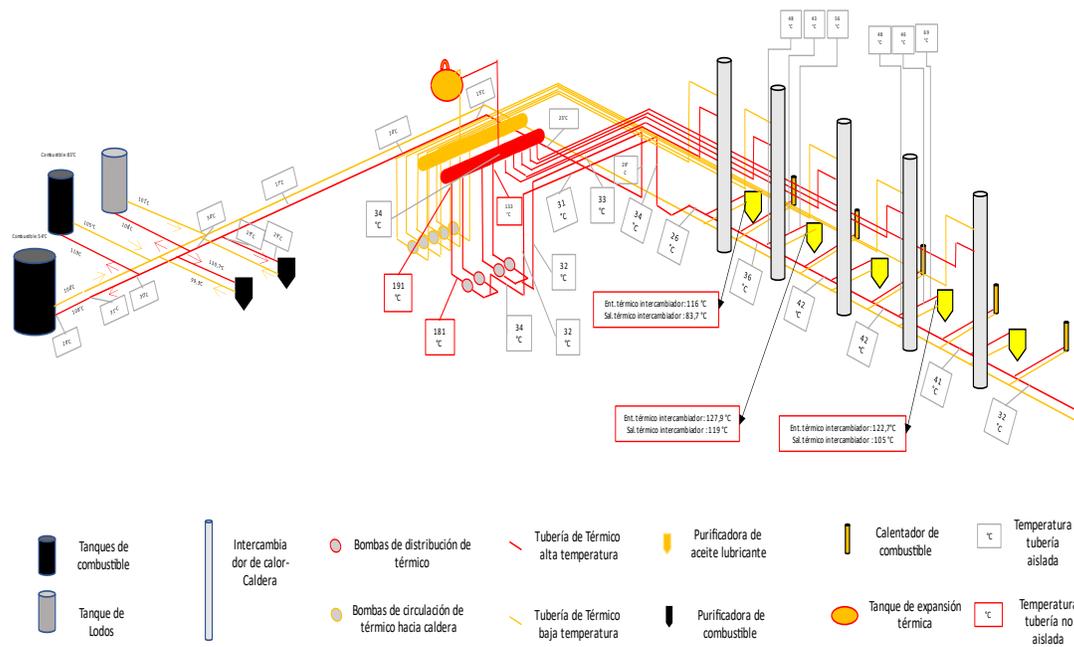
Nota. Fuente propia a partir de información tomada en tuberías del sistema de aceite térmico.

Anexo 7. Valores de coeficiente de convección h_1 para diferentes diámetros y flujos

| Zona | Flujo bomba Q_1 m^3/h | DN | Diámetro m | Área m^2 | V prom. m/s | Re | Pr | Nu | h_1 $W/m^2\text{°C}$ |
|----------------|---------------------------------|-----|---------------|---------------|-------------------|---------|------|-------|---------------------------|
| Sala de motor | 3.44 | 25 | 0.025 | 0.0005 | 1.95 | 9362.41 | | 17.21 | 81.85 |
| | 19.06 | 50 | 0.050 | 0.0020 | 2.70 | 25930.8 | | 38.88 | 92.46 |
| | 127.50 | 150 | 0.150 | 0.0177 | 2.00 | 57810.9 | | 73.83 | 58.53 |
| Zona de patios | 0.19 | 15 | 0.015 | 0.0002 | 0.29 | 843.78 | | 2.51 | 19.89 |
| | 0.58 | 25 | 0.025 | 0.0005 | 0.33 | 1575.21 | 0.10 | 4.14 | 19.67 |
| | 3.27 | 40 | 0.040 | 0.0013 | 0.72 | 5560.69 | | 11.34 | 33.72 |
| | 1.82 | 50 | 0.050 | 0.0020 | 0.26 | 2474.05 | | 5.93 | 14.11 |
| | 6.02 | 100 | 0.100 | 0.0079 | 0.21 | 4092.67 | | 8.88 | 10.55 |
| | 68.12 | 125 | 0.125 | 0.0123 | 1.54 | 37065.2 | | 51.74 | 49.22 |
| Sin aislar | 3.44 | 25 | 0.025 | 0.0005 | 1.95 | 9362.41 | 97.6 | 17.21 | 81.85 |

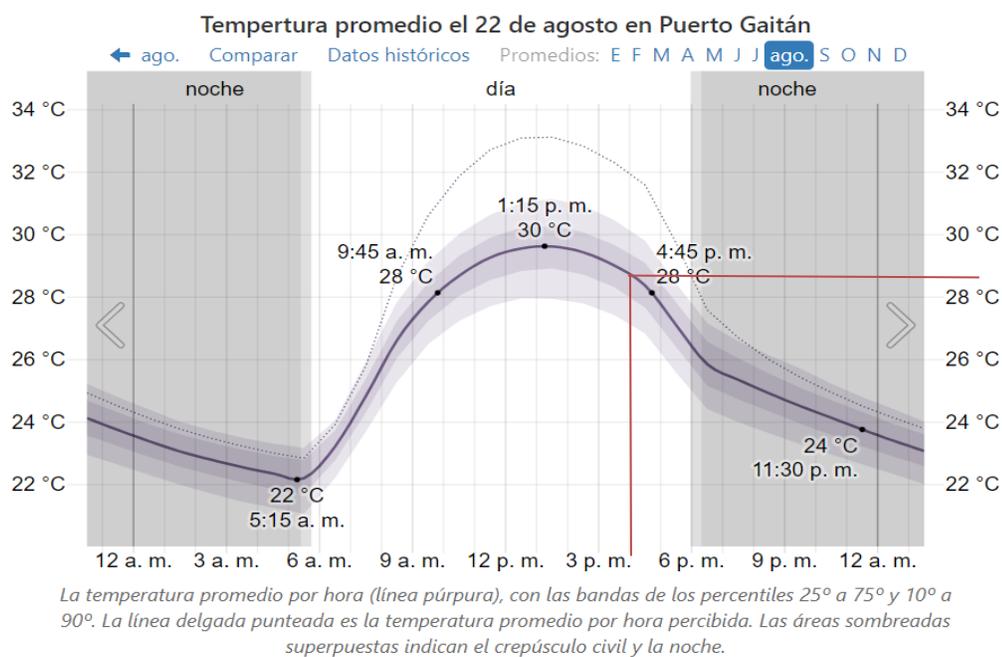
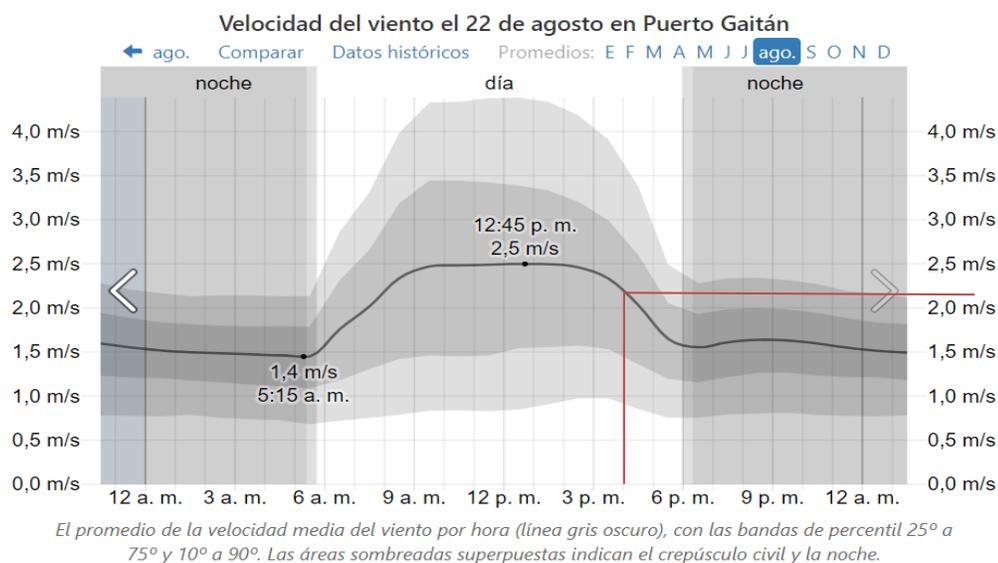
Nota. Fuente propia a partir de información tomada en tuberías del sistema de aceite térmico.

Anexo 8. Levantamiento de temperaturas del sistema de aceite térmico planta 1



Nota. Fuente propia a partir de información tomada en tuberías del sistema de aceite térmico.

Anexo 9. Reporte atmosférico en Puerto Gaitán en 2021, 22 de agosto 04:30 p.m.



Nota. Weatherspark. (s.f.). El tiempo en 22 de agosto en Puerto Gaitán Colombia. Recuperado el 22 de agosto de 2020 de: <https://es.weatherspark.com/d/25246/8/22/Tiempo-promedio-el-22-de-agosto-en-Puerto-Gait%C3%A1n-Colombia>

Anexo 10. Propiedades del aire a la presión de 1 atmósfera.

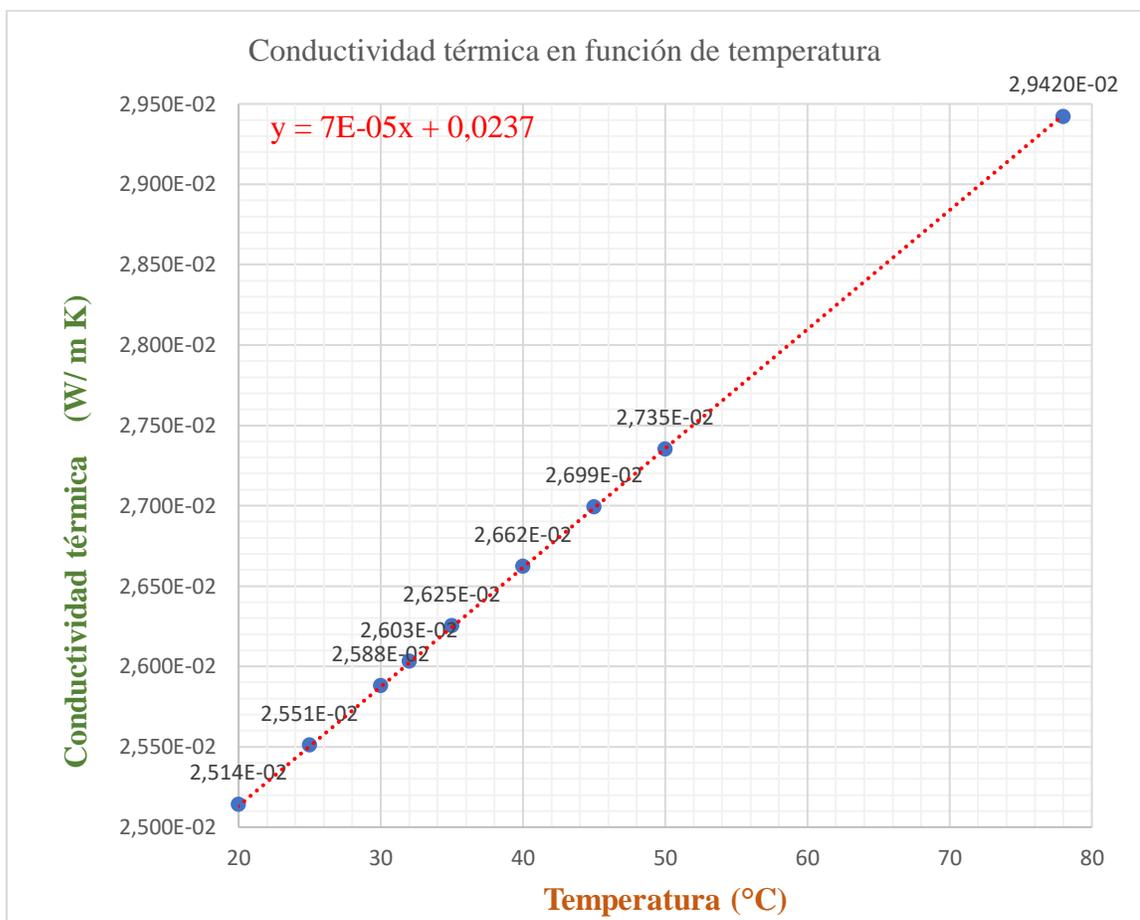
| Temp., T , °C | Densidad, ρ , kg/m ³ | Calor específico, c_p , J/kg · K | Conductividad térmica, k , W/m · K | Difusividad térmica, α , m ² /s ² | Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s | Viscosidad cinemática, ν , m ² /s | Número de Prandtl, Pr |
|--------------------|---|--|--|--|---|--|-----------------------------|
| -150 | 2.866 | 983 | 0.01171 | 4.158×10^{-6} | 8.636×10^{-6} | 3.013×10^{-6} | 0.7246 |
| -100 | 2.038 | 966 | 0.01582 | 8.036×10^{-6} | 1.189×10^{-6} | 5.837×10^{-6} | 0.7263 |
| -50 | 1.582 | 999 | 0.01979 | 1.252×10^{-5} | 1.474×10^{-5} | 9.319×10^{-6} | 0.7440 |
| -40 | 1.514 | 1 002 | 0.02057 | 1.356×10^{-5} | 1.527×10^{-5} | 1.008×10^{-5} | 0.7436 |
| -30 | 1.451 | 1 004 | 0.02134 | 1.465×10^{-5} | 1.579×10^{-5} | 1.087×10^{-5} | 0.7425 |
| -20 | 1.394 | 1 005 | 0.02211 | 1.578×10^{-5} | 1.630×10^{-5} | 1.169×10^{-5} | 0.7408 |
| -10 | 1.341 | 1 006 | 0.02288 | 1.696×10^{-5} | 1.680×10^{-5} | 1.252×10^{-5} | 0.7387 |
| 0 | 1.292 | 1 006 | 0.02364 | 1.818×10^{-5} | 1.729×10^{-5} | 1.338×10^{-5} | 0.7362 |
| 5 | 1.269 | 1 006 | 0.02401 | 1.880×10^{-5} | 1.754×10^{-5} | 1.382×10^{-5} | 0.7350 |
| 10 | 1.246 | 1 006 | 0.02439 | 1.944×10^{-5} | 1.778×10^{-5} | 1.426×10^{-5} | 0.7336 |
| 15 | 1.225 | 1 007 | 0.02476 | 2.009×10^{-5} | 1.802×10^{-5} | 1.470×10^{-5} | 0.7323 |
| 20 | 1.204 | 1 007 | 0.02514 | 2.074×10^{-5} | 1.825×10^{-5} | 1.516×10^{-5} | 0.7309 |
| 25 | 1.184 | 1 007 | 0.02551 | 2.141×10^{-5} | 1.849×10^{-5} | 1.562×10^{-5} | 0.7296 |
| 30 | 1.164 | 1 007 | 0.02588 | 2.208×10^{-5} | 1.872×10^{-5} | 1.608×10^{-5} | 0.7282 |
| 35 | 1.145 | 1 007 | 0.02625 | 2.277×10^{-5} | 1.895×10^{-5} | 1.655×10^{-5} | 0.7268 |
| 40 | 1.127 | 1 007 | 0.02662 | 2.346×10^{-5} | 1.918×10^{-5} | 1.702×10^{-5} | 0.7255 |
| 45 | 1.109 | 1 007 | 0.02699 | 2.416×10^{-5} | 1.941×10^{-5} | 1.750×10^{-5} | 0.7241 |
| 50 | 1.092 | 1 007 | 0.02735 | 2.487×10^{-5} | 1.963×10^{-5} | 1.798×10^{-5} | 0.7228 |
| 60 | 1.059 | 1 007 | 0.02808 | 2.632×10^{-5} | 2.008×10^{-5} | 1.896×10^{-5} | 0.7202 |
| 70 | 1.028 | 1 007 | 0.02881 | 2.780×10^{-5} | 2.052×10^{-5} | 1.995×10^{-5} | 0.7177 |
| 80 | 0.9994 | 1 008 | 0.02953 | 2.931×10^{-5} | 2.096×10^{-5} | 2.097×10^{-5} | 0.7154 |
| 90 | 0.9718 | 1 008 | 0.03024 | 3.086×10^{-5} | 2.139×10^{-5} | 2.201×10^{-5} | 0.7132 |
| 100 | 0.9458 | 1 009 | 0.03095 | 3.243×10^{-5} | 2.181×10^{-5} | 2.306×10^{-5} | 0.7111 |
| 120 | 0.8977 | 1 011 | 0.03235 | 3.565×10^{-5} | 2.264×10^{-5} | 2.522×10^{-5} | 0.7073 |
| 140 | 0.8542 | 1 013 | 0.03374 | 3.898×10^{-5} | 2.345×10^{-5} | 2.745×10^{-5} | 0.7041 |
| 160 | 0.8148 | 1 016 | 0.03511 | 4.241×10^{-5} | 2.420×10^{-5} | 2.975×10^{-5} | 0.7014 |
| 180 | 0.7788 | 1 019 | 0.03646 | 4.593×10^{-5} | 2.504×10^{-5} | 3.212×10^{-5} | 0.6992 |
| 200 | 0.7459 | 1 023 | 0.03779 | 4.954×10^{-5} | 2.577×10^{-5} | 3.455×10^{-5} | 0.6974 |
| 250 | 0.6746 | 1 033 | 0.04104 | 5.890×10^{-5} | 2.760×10^{-5} | 4.091×10^{-5} | 0.6946 |
| 300 | 0.6158 | 1 044 | 0.04418 | 6.871×10^{-5} | 2.934×10^{-5} | 4.765×10^{-5} | 0.6935 |
| 350 | 0.5664 | 1 056 | 0.04721 | 7.892×10^{-5} | 3.101×10^{-5} | 5.475×10^{-5} | 0.6937 |
| 400 | 0.5243 | 1 069 | 0.05015 | 8.951×10^{-5} | 3.261×10^{-5} | 6.219×10^{-5} | 0.6948 |
| 450 | 0.4880 | 1 081 | 0.05298 | 1.004×10^{-4} | 3.415×10^{-5} | 6.997×10^{-5} | 0.6965 |
| 500 | 0.4565 | 1 093 | 0.05572 | 1.117×10^{-4} | 3.563×10^{-5} | 7.806×10^{-5} | 0.6986 |
| 600 | 0.4042 | 1 115 | 0.06093 | 1.352×10^{-4} | 3.846×10^{-5} | 9.515×10^{-5} | 0.7037 |
| 700 | 0.3627 | 1 135 | 0.06581 | 1.598×10^{-4} | 4.111×10^{-5} | 1.133×10^{-4} | 0.7092 |
| 800 | 0.3289 | 1 153 | 0.07037 | 1.855×10^{-4} | 4.362×10^{-5} | 1.326×10^{-4} | 0.7149 |
| 900 | 0.3008 | 1 169 | 0.07465 | 2.122×10^{-4} | 4.600×10^{-5} | 1.529×10^{-4} | 0.7206 |
| 1 000 | 0.2772 | 1 184 | 0.07868 | 2.398×10^{-4} | 4.826×10^{-5} | 1.741×10^{-4} | 0.7260 |
| 1 500 | 0.1990 | 1 234 | 0.09599 | 3.908×10^{-4} | 5.817×10^{-5} | 2.922×10^{-4} | 0.7478 |
| 2 000 | 0.1553 | 1 264 | 0.11113 | 5.664×10^{-4} | 6.630×10^{-5} | 4.270×10^{-4} | 0.7539 |

Nota: Para los gases ideales, las propiedades c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de ρ , a la temperatura dada, por P y al dividir ν y α entre P .

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 1984, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

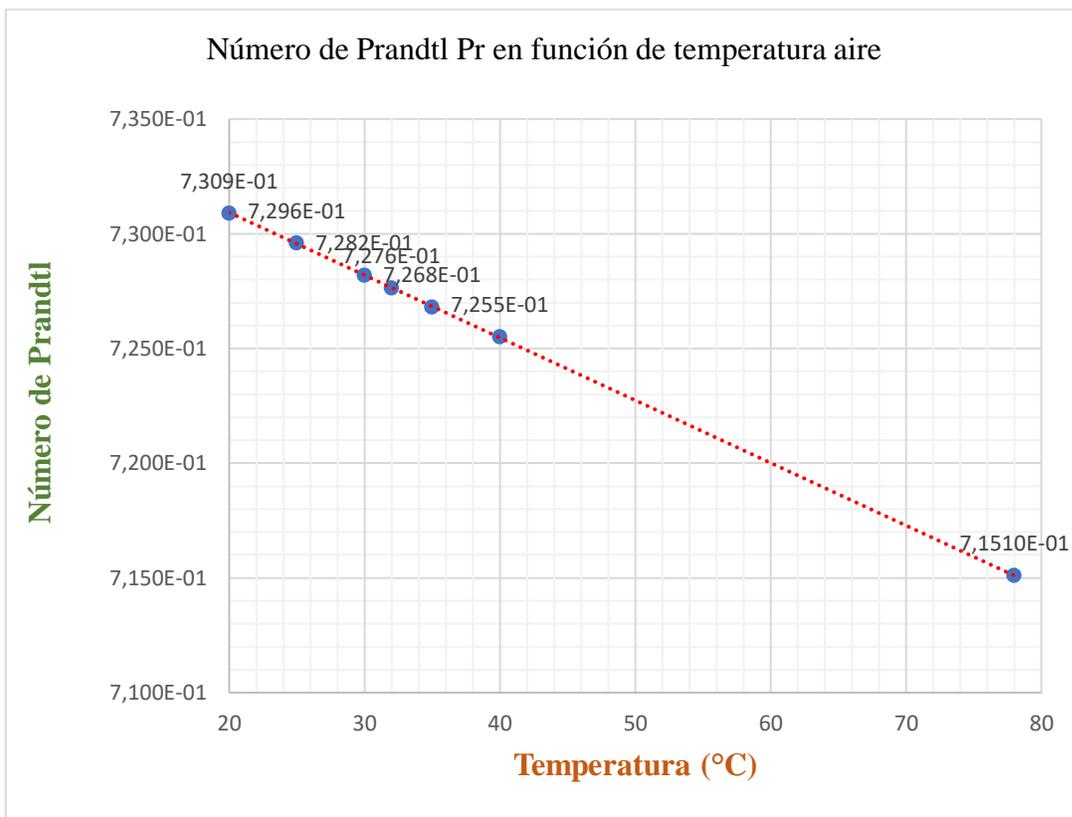
Nota. Línea resaltada indica los valores según temperaturas tomados para los cálculos realizados. Cengel Y. A. y Ghajar A.J. (2011). *Transferencia de calor y masa fundamentos y aplicaciones* (4.^a ed.). Mc Graw Hill.

Anexo 11. Valores de k , Pr y ν del aire a 32°C y 78°C



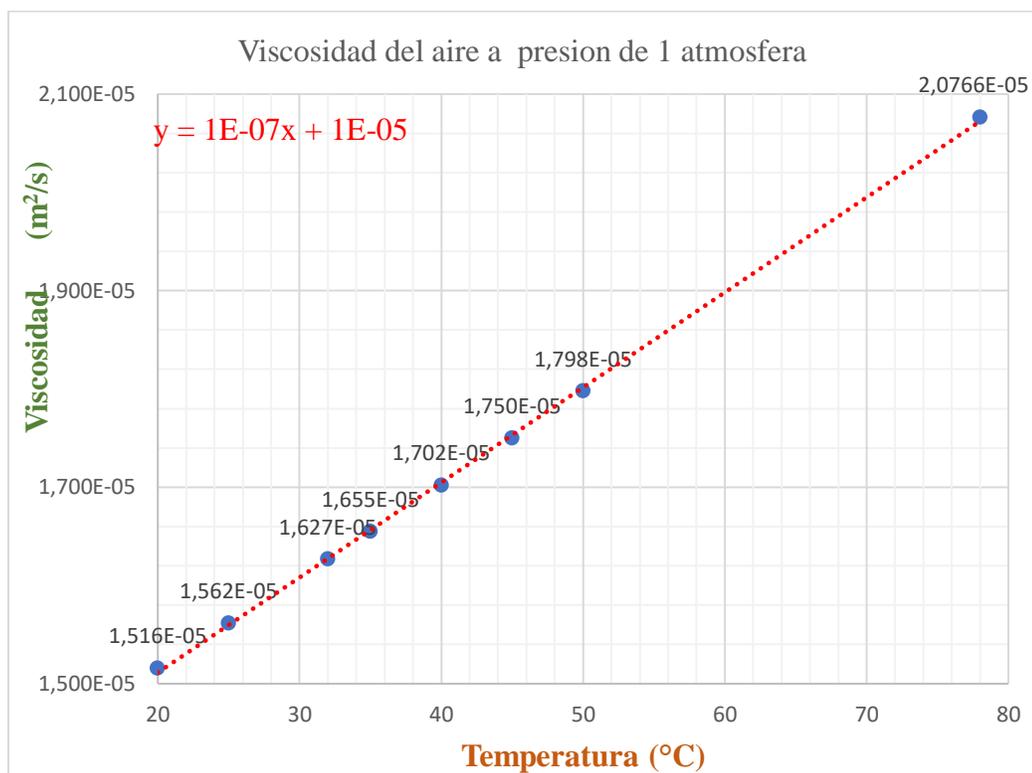
| Temperatura °C | Conductividad térmica W/ m K |
|-------------------|---------------------------------|
| 20 | 2.514 10 ⁻⁰² |
| 25 | 2.551 10 ⁻⁰² |
| 30 | 2.588 10 ⁻⁰² |
| 32 | 2.603 10⁻⁰² |
| 35 | 2.625 10 ⁻⁰² |
| 40 | 2.662 10 ⁻⁰² |
| 78 | 2.942 10⁻⁰² |

Nota. Fuente propia. Valores de referencia tomados de tabla del anexo 10. Valores resaltados en negrita son obtenidos con herramienta informática Excel.



| Temperatura °C | Número de Prandtl |
|-------------------|-------------------------------|
| 20 | 7.309 10 ⁻⁰¹ |
| 25 | 7.296 10 ⁻⁰¹ |
| 30 | 7.282 10 ⁻⁰¹ |
| 32 | 7.276 10⁻⁰¹ |
| 35 | 7.268 10 ⁻⁰¹ |
| 50 | 7.228 10 ⁻⁰¹ |
| 78 | 7.151 10⁻⁰¹ |

Nota. Fuente propia. Valores de referencia tomados de tabla del anexo 10. Valores resaltados en negrita son obtenidos con herramienta informática Excel.



| Temperatura °C | Viscosidad m ² /s |
|-------------------|---------------------------------|
| 20 | 1.516 10 ⁻⁰⁵ |
| 25 | 1.562 10 ⁻⁰⁵ |
| 32 | 1.627 10⁻⁰⁵ |
| 35 | 1.655 10 ⁻⁰⁵ |
| 40 | 1.702 10 ⁻⁰⁵ |
| 45 | 1.750 10 ⁻⁰⁵ |
| 50 | 1.798 10 ⁻⁰⁵ |
| 78 | 2.076 10⁻⁰⁵ |

Nota. Fuente propia. Valores de referencia tomados de tabla del anexo 10. Valores resaltados en negrita son obtenidos con herramienta informática Excel.

Anexo 12. Valores de coeficiente de convección h_2 para diferentes diámetros y flujos

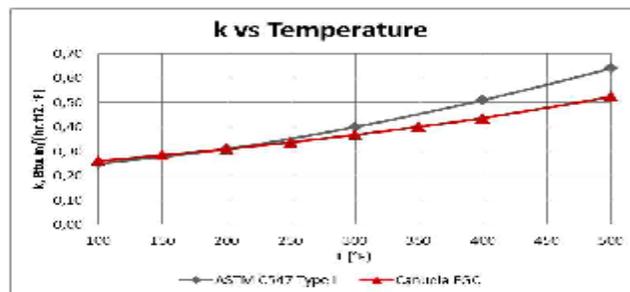
| Ubicación | DN | Diámetro aislamiento m | Re aire | Pr aire | Nu aire | h_2 W/m ² °C |
|------------------|-----|---------------------------|------------|------------|------------|------------------------------|
| Sala de máquinas | 25 | 0.1 | 12907.19 | 0.73 | 62.42 | 16.25 |
| | 50 | 0.172 | 22200.37 | | 85.09 | 12.88 |
| | 150 | 0.277 | 35752.92 | | 112.94 | 10.61 |
| | 15 | 0.1 | 12907.19 | | 62.42 | 16.25 |
| Zona de patios | 25 | 0.1 | 12907.19 | 0.72 | 62.42 | 16.25 |
| | 40 | 0.169 | 21813.15 | | 84.22 | 12.97 |
| | 50 | 0.172 | 22200.37 | | 85.09 | 12.88 |
| | 100 | 0.2162 | 27905.35 | | 97.34 | 11.72 |
| | 125 | 0.2162 | 27905.35 | | 97.34 | 11.72 |
| Sin aislamiento | 25 | 0.034 | 3437.65 | 0.72 | 30.30 | 26.22 |

Nota. Fuente propia a partir de información tomada en tuberías del sistema de aceite térmico.

Anexo 13. Conductividad térmica según rangos de temperatura de cañuelas

La siguiente curva de conductividad aparente fue determinada de acuerdo con ASTM C1045 y con datos obtenidos por ASTM C335. Los valores son nominales, sujetos a tolerancias de fabricación. La precisión asociada con las mediciones para el rango de temperatura empleado es $\pm 6.3\%$.

| TEMPERATURA | | CONDUCTIVIDAD TÉRMICA ASTM C335 | |
|-------------|--------|------------------------------------|--------|
| °F | °C | BTU.in./hr.ft ² .°F | W/m.°C |
| 100 | 36.11 | 0.261 | 0.038 |
| 150 | 63.89 | 0.285 | 0.040 |
| 200 | 91.67 | 0.310 | 0.045 |
| 250 | 119.44 | 0.338 | 0.049 |
| 300 | 147.22 | 0.368 | 0.053 |
| 350 | 175.0 | 0.401 | 0.058 |
| 400 | 202.78 | 0.437 | 0.063 |
| 500 | 258.33 | 0.524 | 0.076 |
| 600 | 313.89 | 0.632 | 0.091 |



| DESEMPEÑO TÉRMICO CAÑUELAS FGC A DIFERENTES TEMPERATURAS DE SERVICIO (1) | | | | | | | |
|--|-------------------|---------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| NPS | THICKNESS (in) | 500°F (280°C) | | | 850°F (454°C) | | |
| | | ST | HL | EFF% | ST | HL | EFF% |
| 2 | 1 | 102,5 | 125,2 | 92,25 | 144,6 | 326,9 | 92,1 |
| | 1,5 | 93,1 | 95,04 | 94,12 | 121,4 | 248,1 | 94,01 |
| | 2 | 88,4 | 79,24 | 95,1 | 109,5 | 206,9 | 95 |
| | 2,5 | 85,7 | 69,86 | 95,68 | 102,7 | 182,4 | 95,59 |
| 4 | 3 | 83,9 | 63,29 | 96,09 | 98 | 165,3 | 96,01 |
| | 1 | 109,1 | 204,1 | 92,17 | 160,4 | 532,9 | 92,39 |
| | 1,5 | 98,1 | 151,8 | 94,18 | 133,6 | 396,4 | 94,34 |
| | 2 | 92,3 | 123,9 | 95,25 | 119,3 | 323,6 | 95,38 |
| 4 | 2,5 | 88,8 | 106,5 | 95,91 | 110,4 | 278,1 | 96,03 |
| | 3 | 86,2 | 93,21 | 96,42 | 103,7 | 243,4 | 96,53 |

ST=Temperatura de la superficie (°F); HL=Pérdidas de calor (BTU/hr/ft); EFF=Eficiencia de aislamiento (%)

(1) 3EPlus V4.1 Software (NAIMA) - Calculations of this computer program are based on tested conductivity values and conditions of Horizontal heat flow, Horizontal Piping, base metal stainless steel, 75°F ambient temperature and wind speed 5 mph, ASJ jacket, as per ASTM C680.

ESTÁNDAR VISUAL

| CARACTERÍSTICA | GUÍA DE ACEPTACIÓN |
|-----------------------------|--|
| Color | Este producto es de color característico amarillo, sin embargo, puede presentar tonalidades que incluyen amarillo-verde, amarillo-gris, amarillo-café, en tonos claros u oscuros propios del proceso productivo. Estas variaciones de color hacen parte del estándar visual del producto (cara interior o exterior) y no afectan el desempeño térmico o mecánico del producto. |
| Apariencia de la Superficie | La superficie en general debe ser uniforme, libre de hendiduras superiores a 5mm y libre de abolladuras y/o presentar parches duros. |

CONTENIDO REICLADO

(1) PI Contenido Reciclado Post Industrial: Recogido de los fabricantes o la industria.

(2) PC Contenido Reciclado Post-Consumidor: Recogido de usos finales.

| PRODUCTO | CONTENIDO DE REICLADO TOTAL | CONTENIDO DE REICLADO POST-INDUSTRIAL PI (1) | CONTENIDO DE REICLADO POST-CONSUMIDOR PC (2) |
|-------------------|-----------------------------|--|--|
| Sin Recubrimiento | 73.3% | 73.3% | 0% |

Nota. Fiberglass Isover. (2022). Cañuela.

https://www.isover.com.co/sites/isover.co/files/assets/documents/p04_ft_023_in_canuela_es_3.pdf

**Anexo 14. Valores de resistencia y pérdidas de tuberías de aceite térmico
planta 1**

| Ubicación | DN | Longitud m | Resistencia total °C/W | Pérdida W/m | Pérdida total W |
|------------------|-----|------------|---------------------------|----------------|-----------------|
| Zona de patios | 25 | 15.06 | 4.38 | 34.61 | 521.28 |
| | 40 | 4.92 | 4.45 | 34.05 | 167.51 |
| | 50 | 24.42 | 4.00 | 37.88 | 924.95 |
| | 100 | 71.39 | 2.50 | 60.65 | 4330.06 |
| | 125 | 3.4 | 1.60 | 94.92 | 322.72 |
| Zona de máquinas | 25 | 42.9 | 3.89 | 39.00 | 1672.90 |
| | 50 | 50 | 3.62 | 41.88 | 2093.95 |
| | 150 | 48.89 | 1.76 | 85.92 | 4200.68 |
| Sin aislamiento | 25 | 1.85 | 0.52 | 100.66 | 186.23 |
| | | Total | | | 14420.29 |

Nota. Fuente propia a partir de información tomada en tuberías del sistema de aceite térmico.

Anexo 16. Características del oxido de magnesio

Oxido de Magnesio

MgO, aislante eléctrico y excelente conductor térmico.

El Oxido de Magnesio (MgO), se utiliza como materia prima para aislar eléctricamente el alambre resistivo del tubo, en resistencias eléctricas tubulares. Ya que para esta función se requiere un material que presente una alta resistencia eléctrica y simultáneamente alta conductividad térmica a las temperaturas de operación.

La alta resistencia eléctrica del MgO es primordial para que las corrientes de fuga sean pequeñas y no represente peligro para la salud humana. En cuanto a la conductividad térmica, un valor elevado reduce la temperatura de trabajo del alambre resistivo aumentando la vida útil del elemento calefactor.



MgO

| Descripción | Ficha Técnica | |
|------------------------------------|---------------|------|
| Composición: | U-02 | T-00 |
| MgO (%) | 97.5 | 96 |
| CaO (%) | 0.74 | 1.34 |
| SiO ₂ (%) | 0.97 | 1.78 |
| Al ₂ O ₃ (%) | 0.31 | 0.32 |
| Fe ₂ O ₃ (%) | 0.35 | 0.51 |



Nota. Luengas F. (2020). *Oxido de magnesio.*
[https://www.felipelungas.com/materias-primas-resistencias-industriales/oxido-magnesio/#:~:text=E1%20Oxido%20de%20Magnesio%20\(MgO,tubo%2C%20en%20resistencias%20el%C3%A9ctricas%20tubulares](https://www.felipelungas.com/materias-primas-resistencias-industriales/oxido-magnesio/#:~:text=E1%20Oxido%20de%20Magnesio%20(MgO,tubo%2C%20en%20resistencias%20el%C3%A9ctricas%20tubulares)

Anexo 17. Características térmicas y eléctricas de hilo nicrom 80-20



| Chemical Composition | | | Designations | Typical Applications |
|----------------------|-------|-------|---------------------------------------|--|
| Element | Min % | Max % | W.Nr. 2.4869 UNS N06003 AWS 180 | Heating elements in both domestic and industrial appliances and in control resistors |
| C | - | 0.15 | | |
| Si | 0.50 | 2.00 | | |
| Mn | - | 1.00 | | |
| P | - | 0.02 | | |
| S | - | 0.015 | | |
| Cr | 19.00 | 21.00 | | |
| Ni | 75.00 | - | | |
| Al | - | 0.30 | | |
| Cu | - | 0.50 | | |
| Fe | - | 1.00 | | |

| | | |
|--|----------------------------|---|
| Density | 8.31 g/cm ³ | 0.300 lb/in ³ |
| Electrical Resistivity at 20 °C | 108 microhm · cm | 650 ohm · Circ · mil/ft |
| Maximum Operating Temperature | | |
| For use as a Heating Element | 1200 °C | 2200 °F |
| For use in Hot Cutting, Fabrication – Line Bending | 300 °C | 572 °F |
| Melting Point | 1400 °C | 2550 °F |
| Coefficient of Expansion | 12.5 µm/m °C (20 – 100 °C) | 7.0 x 10 ⁻⁴ in/in °F (70 – 212 °F) |

| Temperature-Resistance Factor (F) At: | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 20 °C | 100 °C | 200 °C | 300 °C | 400 °C | 500 °C | 600 °C | 700 °C | 800 °C | 900 °C | 1000 °C | 1100 °C | 1200 °C |
| 68 °F | 212 °F | 392 °F | 572 °F | 752 °F | 932 °F | 1112 °F | 1292 °F | 1472 °F | 1652 °F | 1832 °F | 2012 °F | 2192 °F |
| 1.00 | 1.006 | 1.015 | 1.028 | 1.045 | 1.065 | 1.068 | 1.057 | 1.051 | 1.052 | 1.062 | 1.071 | 1.080 |

Nota. Alloy Wire International. (2020). Alambre de resistencia 80/20 Ni Cr. <https://www.alloywire.com/alloys/80-20-ni-cr-resistance-wire/>

Anexo 18. Diámetros de hilo resistivo nicrom

24/22, 14:48

Alambres de nicrom_Cr20Ni80

Especificaciones de Aleación Ni-Cr-Fe, Ni-Cr

| O.D. | Sección | Area superficial | Cr20Ni80,Cr30Ni70,Cr15Ni60 | | | Cr20Ni35,Cr20Ni30 | | |
|------|-----------------|--------------------|---|---------------|-----------|---|---------------|-----------|
| | | | Resistividad $\mu\Omega.m, 20^{\circ}C 1.09 \sim 1.20 \pm 0.05$ | | | Resistividad $\mu\Omega.m, 20^{\circ}C 1.04 \sim 1.08 \pm 0.05$ | | |
| mm | mm ² | cm ² /m | Resistencia $\Omega/m, 20^{\circ}C$ | Longitud m/kg | Peso kg/m | Resistencia $\Omega/m, 20^{\circ}C$ | Longitud m/kg | Peso kg/m |
| 0.1 | 0.0078 | 3.14 | 143.9 | 15578 | 0.0000641 | 132.4 | 16228 | 0.0000616 |
| 0.12 | 0.0113 | 3.77 | 99.9 | 10763 | 0.0000929 | 91.96 | 11202 | 0.0000932 |
| 0.15 | 0.0177 | 4.71 | 83.94 | 8865 | 0.0001456 | 58.85 | 7151.5 | 0.00014 |
| 0.17 | 0.0227 | 5.34 | 49.78 | 6353 | 0.0001868 | 46.82 | 5578.3 | 0.000179 |
| 0.18 | 0.0284 | 5.97 | 39.85 | 4278 | 0.0002337 | 36.88 | 4457.1 | 0.000224 |
| 0.22 | 0.038 | 8.71 | 29.72 | 3198 | 0.0003126 | 27.36 | 3331.1 | 0.0003 |
| 0.25 | 0.0491 | 7.85 | 22.88 | 2475 | 0.000404 | 21.19 | 2578.1 | 0.000388 |
| 0.28 | 0.0618 | 8.8 | 18.35 | 1973 | 0.0005088 | 16.89 | 2054.8 | 0.000487 |
| 0.3 | 0.0707 | 9.42 | 16.96 | 1718 | 0.000582 | 14.71 | 1780.7 | 0.000558 |
| 0.32 | 0.0804 | 10.05 | 14.05 | 1511 | 0.0006818 | 12.93 | 1574.4 | 0.000635 |
| 0.35 | 0.0982 | 11 | 11.74 | 1263 | 0.0007917 | 10.81 | 1315.8 | 0.00078 |
| 0.4 | 0.1257 | 12.57 | 8.992 | 988.6 | 0.001035 | 8.278 | 1007 | 0.000993 |
| 0.45 | 0.159 | 14.14 | 7.106 | 784.2 | 0.001308 | 6.539 | 798.1 | 0.00128 |
| 0.5 | 0.1963 | 15.71 | 5.755 | | 0.001616 | 5.297 | 644.8 | 0.00155 |
| 0.6 | 0.283 | 18.85 | 4.103 | 429.4 | 0.002328 | 3.749 | 447.3 | 0.00224 |
| 0.7 | 0.386 | 22 | 3.014 | 315.6 | 0.003169 | 2.754 | 328.8 | 0.00304 |
| 0.8 | 0.503 | 25.1 | 2.308 | 241.6 | 0.004138 | 2.108 | 251.7 | 0.00387 |
| 0.9 | 0.636 | 28.3 | 1.823 | 191 | 0.005238 | | 199 | 0.00503 |
| 1.0 | 0.785 | 31.4 | 1.477 | 154.8 | 0.00648 | 1.35 | 181.3 | 0.0062 |

<https://www.topeintl.com/alambre-de-nicrom.html>

2/4

Nota. TOPE INTL. (20 de abril de 2022). Alambre de nicrom. intl <https://www.topeintl.com/alambre-de-nicrom.html>

Anexo 19. Cantidades de vueltas para 3500W

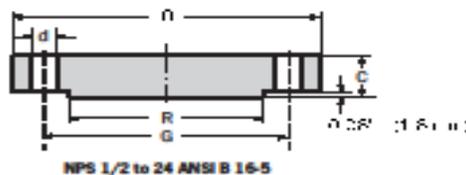
| Potencia W | Carga térmica w/cm ² | Diámetro de hilo mm | Longitud m | Longitud bobinada m | Longitud de trabajo m | Cantidad de vueltas | | |
|---------------|---------------------------------------|------------------------|---------------|------------------------|--------------------------|---------------------|-----|-----|
| | | | | | | 1 | 2 | 3 |
| 3500 | 7 | 0.4 | 39.79 | 1.81 | 5.4 | 6 | 3.0 | 2.0 |
| | 7 | 0.5 | 31.83 | 1.45 | 4.3 | 5 | 2.4 | 1.6 |
| | 7 | 0.6 | 26.53 | 1.21 | 3.6 | 4 | 2.0 | 1.3 |
| | 7 | 0.7 | 22.74 | 1.03 | 3.1 | 3 | 1.7 | 1.1 |
| | 7 | 0.8 | 19.89 | 0.90 | 2.7 | 3 | 1.5 | 1.0 |
| | 8 | 0.4 | 34.82 | 1.58 | 4.7 | 5 | 2.6 | 1.8 |
| | 8 | 0.5 | 27.85 | 1.27 | 3.8 | 4 | 2.1 | 1.4 |
| | 8 | 0.6 | 23.21 | 1.06 | 3.2 | 4 | 1.8 | 1.2 |
| | 8 | 0.7 | 19.89 | 0.90 | 2.7 | 3 | 1.5 | 1.0 |
| | 8 | 0.8 | 17.41 | 0.79 | 2.4 | 3 | 1.3 | 0.9 |
| | 9 | 0.4 | 30.95 | 1.41 | 4.2 | 5 | 2.3 | 1.6 |
| | 9 | 0.5 | 24.76 | 1.13 | 3.4 | 4 | 1.9 | 1.3 |
| | 9 | 0.6 | 20.63 | 0.94 | 2.8 | 3 | 1.6 | 1.0 |
| | 9 | 0.7 | 17.68 | 0.80 | 2.4 | 3 | 1.3 | 0.9 |
| | 9 | 0.8 | 15.47 | 0.70 | 2.1 | 2 | 1.2 | 0.8 |
| | 10 | 0.4 | 27.85 | 1.27 | 3.8 | 4 | 2.1 | 1.4 |
| | 10 | 0.5 | 22.28 | 1.01 | 3.0 | 3 | 1.7 | 1.1 |
| | 10 | 0.6 | 18.57 | 0.84 | 2.5 | 3 | 1.4 | 0.9 |
| | 10 | 0.7 | 15.92 | 0.72 | 2.2 | 2 | 1.2 | 0.8 |
| | 10 | 0.8 | 13.93 | 0.63 | 1.9 | 2 | 1.1 | 0.7 |
| | 11 | 0.5 | 20.26 | 0.92 | 2.8 | 3 | 1.5 | 1.0 |
| | 11 | 0.6 | 16.88 | 0.77 | 2.3 | 3 | 1.3 | 0.9 |
| | 11 | 0.7 | 14.47 | 0.66 | 2.0 | 2 | 1.1 | 0.7 |
| | 11 | 0.8 | 12.66 | 0.58 | 1.7 | 2 | 1.0 | 0.6 |
| | 12 | 0.4 | 23.21 | 1.06 | 3.2 | 4 | 1.8 | 1.2 |
| | 12 | 0.5 | 18.57 | 0.84 | 2.5 | 3 | 1.4 | 0.9 |
| | 12 | 0.6 | 15.47 | 0.70 | 2.1 | 2 | 1.2 | 0.8 |
| | 12 | 0.7 | 13.26 | 0.60 | 1.8 | 2 | 1.0 | 0.7 |
| | 12 | 0.8 | 11.61 | 0.53 | 1.6 | 2 | 0.9 | 0.6 |

Nota. Fuente propia a partir de parámetros de diseño. En las columnas de cantidad de vueltas el dígito 1 significa vueltas completas.

Anexo 20. Ficha técnica bridas ciegas

134 STEELTRAC
PIPES, FITTINGS & FLANGES

Blind class 150 raised face



Weights are approximate

| Size | | O | C min. | R | Drilling | | | Weight |
|------|-------|-----|--------|-------|----------|-------|------|--------|
| DN | NPS | mm | mm | mm | Number | G mm | d mm | kg |
| 15 | 1/2 | 89 | 11,2 | 34,9 | 4 | 60,3 | 15,8 | 1,2 |
| 20 | 3/4 | 99 | 12,7 | 42,9 | 4 | 69,8 | 15,8 | 1,3 |
| 25 | 1 | 108 | 14,3 | 50,8 | 4 | 79,4 | 15,8 | 1,4 |
| 32 | 1 1/4 | 117 | 15,9 | 63,5 | 4 | 88,9 | 15,8 | 1,8 |
| 40 | 1 1/2 | 127 | 17,5 | 73,0 | 4 | 98,4 | 15,8 | 2,2 |
| 50 | 2 | 152 | 19,1 | 92,1 | 4 | 120,6 | 19,0 | 2,8 |
| 65 | 2 1/2 | 178 | 22,3 | 104,8 | 4 | 139,7 | 19,0 | 4,7 |
| 80 | 3 | 190 | 23,9 | 127,0 | 4 | 152,4 | 19,0 | 5,5 |
| — | 3 1/2 | 216 | 23,9 | 139,7 | 8 | 177,8 | 19,0 | 6,8 |
| 100 | 4 | 229 | 23,9 | 157,2 | 8 | 190,5 | 19,0 | 8,0 |
| 125 | 5 | 254 | 23,9 | 185,7 | 8 | 215,9 | 22,2 | 9,0 |
| 150 | 6 | 279 | 25,4 | 215,9 | 8 | 241,3 | 22,2 | 12,0 |
| 200 | 8 | 343 | 28,6 | 269,9 | 8 | 298,4 | 22,2 | 20 |
| 250 | 10 | 406 | 30,2 | 323,8 | 12 | 362,0 | 25,4 | 32 |
| 300 | 12 | 483 | 31,8 | 381,0 | 12 | 431,8 | 25,4 | 40 |
| 350 | 14 | 533 | 35,0 | 412,8 | 12 | 476,2 | 28,5 | 59 |
| 400 | 16 | 597 | 36,6 | 469,9 | 16 | 539,8 | 28,5 | 77 |
| 450 | 18 | 635 | 39,7 | 533,4 | 16 | 577,8 | 31,8 | 95 |
| 500 | 20 | 698 | 42,9 | 584,2 | 20 | 635,0 | 31,8 | 123 |
| 600 | 24 | 813 | 47,7 | 692,2 | 20 | 749,3 | 35,0 | 186 |

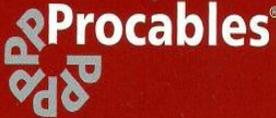
Nota. Fitting valves. (2020). *Bridas ciegas*. <https://fittingvalves.com/wp-content/uploads/2020/12/BRIDASCIEGA.pdf>

Anexo 21. Tablas de conductores

| epm | NORMAS TÉCNICAS | | | | | | RA8-003 |
|--|---|--|---|---------------------------------------|--|--|-------------------------|
| | CABLES Y ALAMBRES DE COBRE CON VOLTAJE DE SERVICIO HASTA 2000 VOLTIOS | | | | | | |
| 5.2 TABLAS DE CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE CORRIENTE PARA CABLES AISLADOS DE HASTA 2000 VOLTIOS | | | | | | | |
| TABLA 4. CAPACIDAD DE TRANSPORTE DE CORRIENTE PARA CABLES AISLADOS DE 0 A 2000 VOLTIOS, TEMPERATURAS DE 60 °C, 75 °C Y 90 °C, NO MÁS DE TRES CABLES EN MÚLTIPLE, DUCTOS O DIRECTAMENTE ENTERRADOS Y PARA UNA TEMPERATURA AMBIENTE DE 30 °C | | | | | | | |
| Calibre AWG Kcmil | 60°C (140°F) | 75°C (167°F) | 90°C (194°F) | 60°C (140°F) | 75°C (167°F) | 90°C (194°F) | CALIBRE AWG Kcmil |
| | Tipos TW, UF | Tipos RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE, ZW | Tipos TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, ML, RHH, RHW-2, THH, THW, THW-2, THWN-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2 | Tipos TW, UF | Tipos RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE | Tipos TBS, SA, SIS, THHN, THW-2, RHH, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2 | |
| COBRE | | | | ALUMINIO O ALUMINIO CUBIERTO DE COBRE | | | |
| 18 | - | - | 14 | - | - | - | - |
| 16 | - | - | 18 | - | - | - | - |
| 14* | 20 | 20 | 25 | - | - | - | - |
| 12* | 25 | 25 | 30 | 20 | 20 | 25 | 12* |
| 10* | 30 | 30 | 40 | 25 | 30 | 35 | 10* |
| 8 | 40 | 50 | 55 | 30 | 40 | 45 | 8 |
| 6 | 55 | 65 | 75 | 40 | 50 | 60 | 6 |
| 4 | 70 | 85 | 95 | 55 | 65 | 75 | 4 |
| 3 | 85 | 100 | 110 | 65 | 75 | 85 | 3 |
| 2 | 95 | 115 | 130 | 75 | 90 | 100 | 2 |
| 1 | 110 | 130 | 150 | 85 | 100 | 115 | 1 |
| 1/0 | 125 | 150 | 170 | 100 | 120 | 135 | 1/0 |
| 2/0 | 145 | 175 | 195 | 115 | 135 | 150 | 2/0 |
| 3/0 | 165 | 200 | 225 | 130 | 155 | 175 | 3/0 |
| 4/0 | 195 | 230 | 260 | 150 | 180 | 205 | 4/0 |
| 250 | 215 | 255 | 290 | 170 | 205 | 230 | 250 |
| 300 | 240 | 285 | 320 | 190 | 230 | 255 | 300 |
| 350 | 260 | 310 | 350 | 210 | 250 | 280 | 350 |
| 400 | 280 | 335 | 380 | 225 | 270 | 305 | 400 |
| 500 | 320 | 380 | 430 | 260 | 310 | 350 | 500 |
| PRIMERA EDICIÓN: OCTUBRE-1985 | | | DIBUJO: CENTRO DE INFORMACIÓN REDES ENERGÍA | | AUTORIZO: SUBGERENCIA REDES DISTRIBUCIÓN | | |
| ÚLTIMA PUBLICACIÓN: MAYO-2005 | | | REVISÓ: ÁREA INGENIERÍA Y GESTIÓN | | Página 8 de 14 | | |

Nota. Empresas públicas de Medellín. (s.f.). Normas técnicas.
https://cu.epm.com.co/Portals/proveedores_y_contratistas/proveedores-y-contratistas/normas-tecnicas/documentos/DOCUMENTOS-ENERGIA/NORMAS-TECNICAS-PARA-REDES-AEREAS/NORMAS-TECNICAS/RA8-003.pdf

Anexo 22. Factores de corrección para el cálculo de secciones



NÚMERO MÁXIMO DE CONDUCTORES POR DUCTO

| TIPO | CALIBRE | TAMAÑO DEL DUCTO (pulgadas / milímetros) | | | | | | | | | |
|-------------|---------|--|----------|----------|--------|------------|------------|--------|------------|--------|--|
| | | AWG | 1/2 / 16 | 3/4 / 21 | 1 / 27 | 1 1/4 / 35 | 1 1/2 / 41 | 2 / 53 | 2 1/2 / 63 | 3 / 78 | |
| THHN / THWN | 14 | 16 | 27 | 44 | 73 | 96 | 150 | 225 | 338 | | |
| | 12 | 11 | 19 | 32 | 53 | 70 | 109 | 164 | 246 | | |
| | 10 | 7 | 12 | 20 | 33 | 44 | 69 | 103 | 155 | | |
| | 8 | 4 | 7 | 12 | 19 | 25 | 40 | 59 | 89 | | |
| | 6 | 3 | 5 | 8 | 14 | 18 | 28 | 43 | 64 | | |
| | 4 | 1 | 3 | 5 | 8 | 11 | 17 | 26 | 39 | | |
| | 2 | 1 | 1 | 3 | 6 | 8 | 12 | 19 | 28 | | |
| | 1 | 1 | 1 | 2 | 4 | 6 | 9 | 14 | 21 | | |
| | 1/0 | 1 | 1 | 2 | 4 | 5 | 8 | 11 | 17 | | |
| | 2/0 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 | 6 | 10 | 14 | | |
| 3/0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 5 | 8 | 12 | | | |
| 4/0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 | 6 | 10 | | | |
| TW / THW | 14 | 11 | 18 | 31 | 51 | 67 | 105 | 157 | 235 | | |
| | 12 | 8 | 14 | 24 | 39 | 51 | 80 | 120 | 181 | | |
| | 10 | 6 | 10 | 18 | 29 | 38 | 60 | 89 | 135 | | |
| | 8 | 3 | 6 | 10 | 16 | 21 | 33 | 50 | 75 | | |
| | 6 | 1 | 3 | 6 | 9 | 13 | 20 | 30 | 45 | | |
| | 4 | 1 | 2 | 4 | 7 | 9 | 15 | 22 | 33 | | |
| | 2 | 1 | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 16 | 24 | | |
| | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 17 | | |
| | 1/0 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 | 6 | 10 | 14 | | |
| | 2/0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 5 | 8 | 12 | | |
| 3/0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 | 7 | 10 | | | |
| 4/0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 4 | 6 | 9 | | | |

Tablas C11 de NTC 2050 y NEC 2005

www.procables.com.co



CAPACIDAD DE CORRIENTE CONDUCTORES DE COBRE Y ALUMINIO

Temperatura en el conductor 60 °C a 90 °C, Temp. ambiente 30 °C

| Calibre | No más de 3 conductores en ducto, canalización, cable o directamente enterrado | | | | | | Resistencia Eléctrica c.c. a 20 °C | |
|---------|--|-----|-------------|-----|-------|-------------|------------------------------------|--------|
| | 60 °C | | 75 °C | | 90 °C | | Ω/km | |
| | TW | THW | THHN/THWN-2 | TW | THW | THHN/THWN-2 | Cu | Al |
| AWG | Cu | Al | Cu | Al | Cu | Al | Cu | Al |
| 14 | 15 | - | 20 | - | 25 | - | 8,28 | - |
| 12 | 20 | 15 | 25 | 20 | 30 | 25 | 5,21 | 8,715 |
| 10 | 30 | 25 | 35 | 30 | 40 | 35 | 3,35 | 5,479 |
| 8 | 40 | 35 | 50 | 40 | 55 | 45 | 2,10 | 3,446 |
| 6 | 55 | 40 | 65 | 50 | 75 | 55 | 1,32 | 2,168 |
| 4 | 70 | 55 | 85 | 65 | 95 | 75 | 0,830 | 1,363 |
| 2 | 95 | 75 | 115 | 90 | 130 | 100 | 0,659 | 0,8573 |
| 1 | 110 | 85 | 130 | 100 | 145 | 115 | 0,522 | 0,6798 |
| 1/0 | 125 | 100 | 150 | 120 | 170 | 135 | 0,328 | 0,5387 |
| 2/0 | 145 | 115 | 175 | 135 | 195 | 150 | 0,261 | 0,4275 |
| 3/0 | 165 | 130 | 200 | 155 | 225 | 175 | 0,207 | 0,3389 |
| 4/0 | 195 | 150 | 230 | 180 | 260 | 205 | 0,164 | 0,2690 |
| 250 | 215 | 170 | 255 | 205 | 290 | 230 | 0,139 | 0,2277 |
| 350 | 260 | 210 | 310 | 250 | 350 | 280 | 0,0991 | 0,1624 |
| 500 | 320 | 260 | 380 | 310 | 430 | 350 | 0,0695 | 0,1139 |

FACTORES DE CORRECCIÓN

Temp. ambiente 30 °C. Para temperatura ambiente diferente a 30 °C multiplique las capacidades de corriente por el factor apropiado

| Temp. ambiente (°C) | Factor | Factor | Factor |
|---------------------|--------|--------|--------|
| 21-25 | 1,08 | 1,05 | 1,04 |
| 26-30 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 31-35 | 0,91 | 0,94 | 0,96 |
| 36-40 | 0,82 | 0,86 | 0,91 |

Factores de ajuste para más de 3 conductores transportando corriente en bandeja, ducto o cable

| Número de conductores | Factor |
|-----------------------|--------|
| 4-6 | 80 |
| 7-9 | 70 |
| 10-20 | 50 |
| 21-30 | 45 |
| 31-40 | 40 |
| más de 40 | 35 |

Tabla 310-16 de la NTC 2050 y tabla 310-15 (B) (16) del NEC 2011

Nota. Carlos Triana y CIA LTDA. (s.f.). Corriente cobre Vs aluminio. <https://www.electricoscarlostriana.com/gallery/CORRIENTE-COBRE-VS-ALUMINIO.pdf>

Anexo 23. Grados de protección NEMA

Grados de protección NEMA

National Electrical Manufacturers Association

La National Electrical Manufacturers Association (NEMA) es una organización de normalización en Washington, EE.UU., que publica una serie de estándares técnicos, ella misma no ensaya ni certifica productos.

La siguiente clasificación NEMA hace referencia básicamente a la protección de personas contra el contacto involuntario con objetos del equipo, así como a la protección frente a influencias externas sobre un armario.

| Grado de protección | Descripción |
|---------------------|---|
| NEMA 1 | Instalación interior, protege contra la caída de suciedad |
| NEMA 2 | Instalación interior, protege contra la caída de suciedad y el goteo de agua |
| NEMA 3 | Instalación exterior, protege contra lluvia, aguanieve y polvo transportado por el viento; además protege contra daños ocasionados por la formación de hielo exterior sobre el armario |
| NEMA 3R | Instalación exterior, protege contra lluvia, aguanieve; además protege contra daños ocasionados por la formación de hielo exterior sobre el armario |
| NEMA 3S | Instalación interior o exterior, protege contra lluvia, aguanieve y polvo transportado por el viento; además, los mecanismos externos permanecen operativos a pesar de la formación de hielo |
| NEMA 4 | Instalación interior o exterior, protege contra el polvo transportado por el viento y la lluvia, salpicaduras de agua y agua proyectada; además protege contra daños ocasionados por la formación de hielo exterior sobre el armario |
| NEMA 4X | Instalación interior o exterior, protege contra el polvo transportado por el viento y la lluvia, salpicaduras de agua, agua proyectada y corrosión; además protege contra daños ocasionados por la formación de hielo exterior sobre el armario |
| NEMA 5 | Protección interior contra caída de suciedad, acumulación del polvo del aire ambiental, así como contra el goteo de líquidos no corrosivos |
| NEMA 6 | Protección interior o exterior contra caída de suciedad, chorro de agua y entrada de agua a causa de la inmersión parcial, limitada a una profundidad determinada; así como protección contra daños provocados por la formación de hielo |
| NEMA 6P | Protección interior o exterior contra proyección de agua y entrada de agua a causa de la inmersión prolongada a una profundidad determinada; así como protección contra daños provocados por la formación de hielo |
| NEMA 12 | Protección interior contra caída de suciedad, acumulación del polvo del aire ambiental, así como contra el goteo de líquidos no corrosivos. |
| NEMA 13 | Protección interior contra polvo, caída de suciedad, salpicaduras de agua y aceite, así como medios refrigerantes no corrosivos |

Nota. Rittal. (2022). Grados de protección NEMA. https://www.rittal.com/es-es/content/es/support/technischeswissen/qminformiert/schutzarten/nema/nema_1.jsp

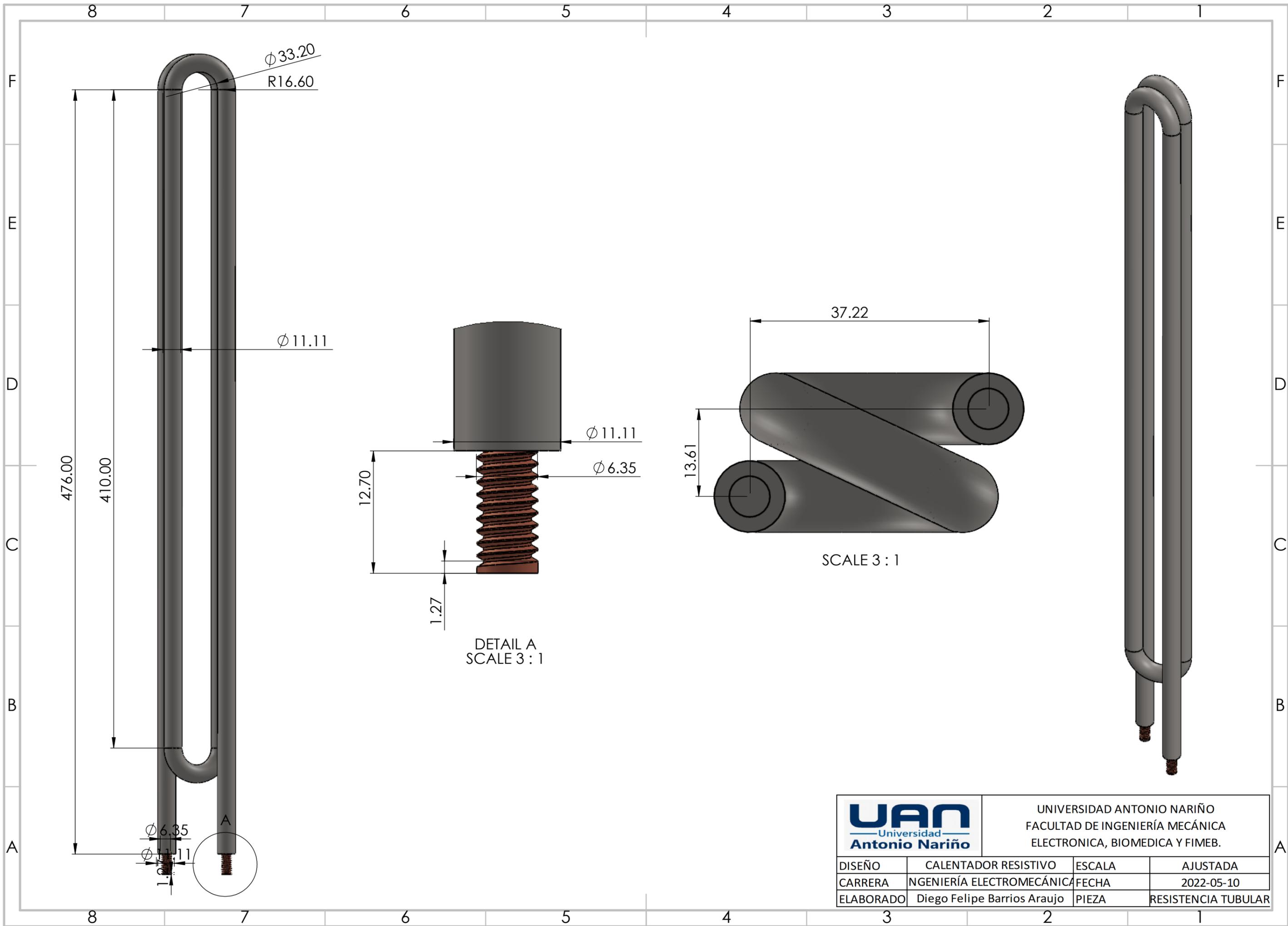
Anexo 24. Distancias de seguridad según RETIE

| Tensión nominal del sistema (fase – fase) | Límite de aproximación seguro [m] | | Límite de aproximación restringida (m) Incluye movimientos involuntarios. | Límite de aproximación técnica (m) |
|---|-----------------------------------|---------------------|---|------------------------------------|
| | Parte móvil expuesta | Parte fija expuesta | | |
| 50 V – 300 V | 3,0 | 1,0 | Evitar contacto | Evitar contacto |
| 301 V – 750 V | 3,0 | 1,0 | 0,30 | 0,025 |
| 751 V – 15 kV | 3,0 | 1,5 | 0,7 | 0,2 |
| 15,1 kV – 36 kV | 3,0 | 1,8 | 0,8 | 0,3 |
| 36,1 kV – 46 kV | 3,0 | 2,5 | 0,8 | 0,4 |
| 46,1 kV – 72,5 kV | 3,0 | 2,5 | 1,0 | 0,7 |
| 72,6 kV – 121 kV | 3,3 | 2,5 | 1,0 | 0,8 |
| 138 kV – 145 kV | 3,4 | 3,0 | 1,2 | 1,0 |
| 161 kV – 169 kV | 3,6 | 3,6 | 1,3 | 1,1 |
| 230 kV – 242 kV | 4,0 | 4,0 | 1,7 | 1,6 |
| 345 kV – 362 kV | 4,7 | 4,7 | 2,8 | 2,6 |
| 500 kV – 550 kV | 5,8 | 5,8 | 3,6 | 3,5 |

Tabla 13.7. Distancias mínimas para trabajos en o cerca de partes energizadas en corriente alterna

Nota. Ministerio de minas y energía (s.f.). *Anexo general del RETIE resolución 9 0708 de agosto 30 de 2013 con sus ajustes.*
<https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/1179442/Anexo+General+del+RETIE+vigente+actualizado+a+2015-1.pdf/57874c58-e61e-4104-8b8c-b64dbabedb13>

Anexo 25. Planos



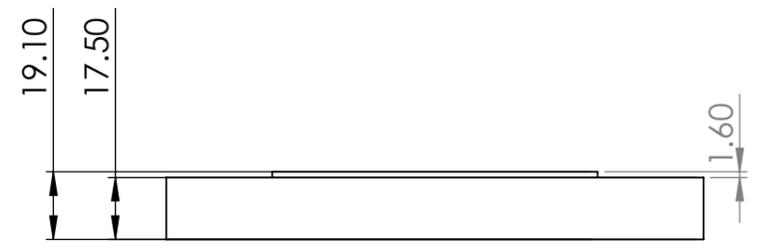
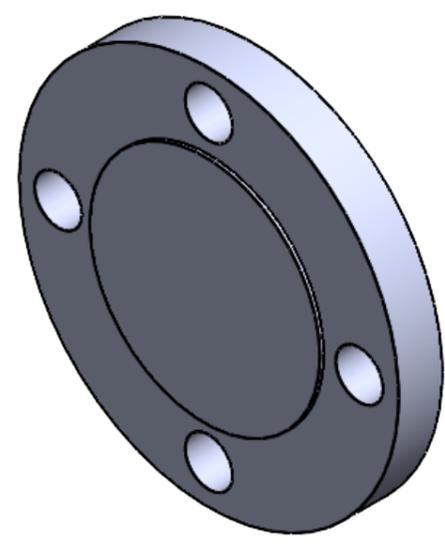
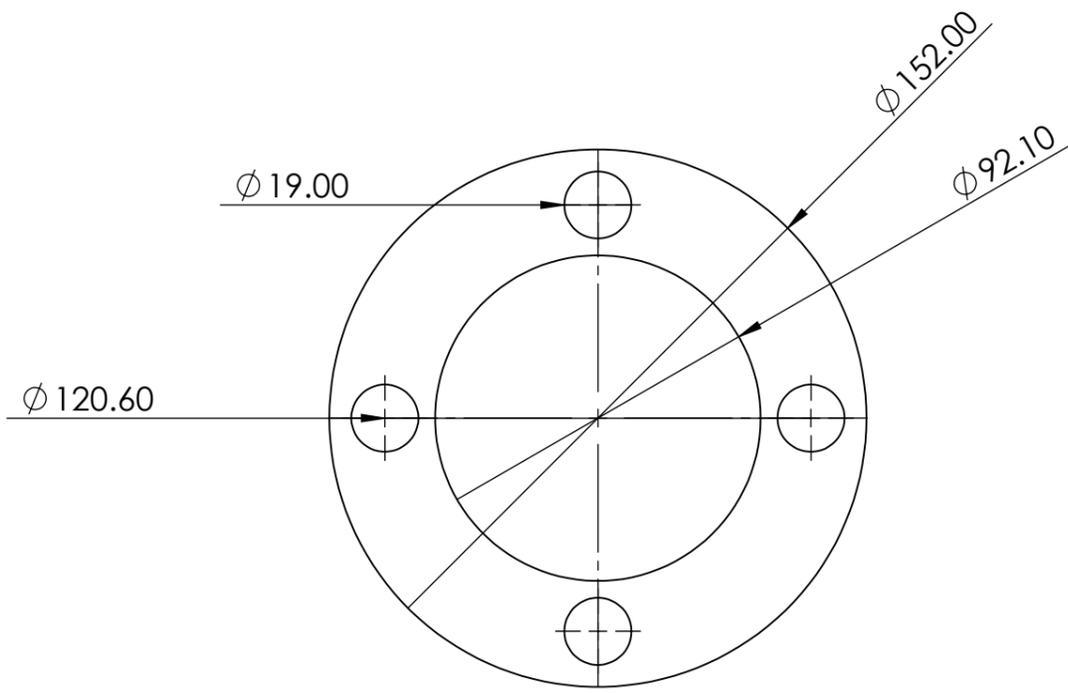
DETAIL A
SCALE 3 : 1

SCALE 3 : 1

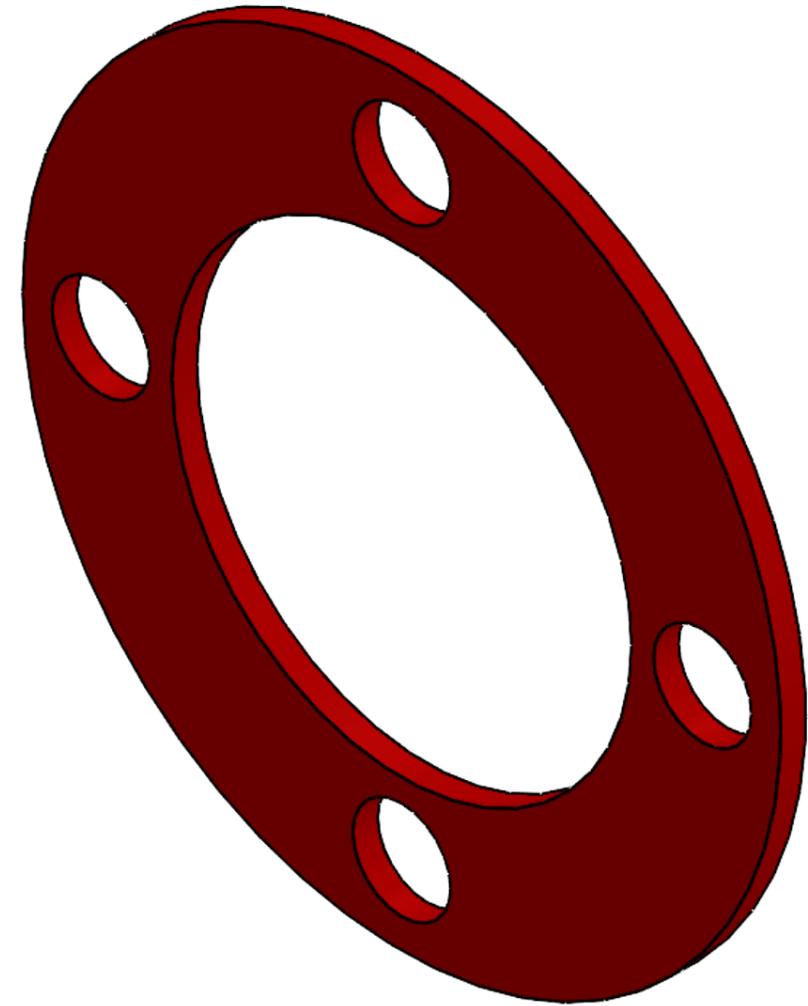
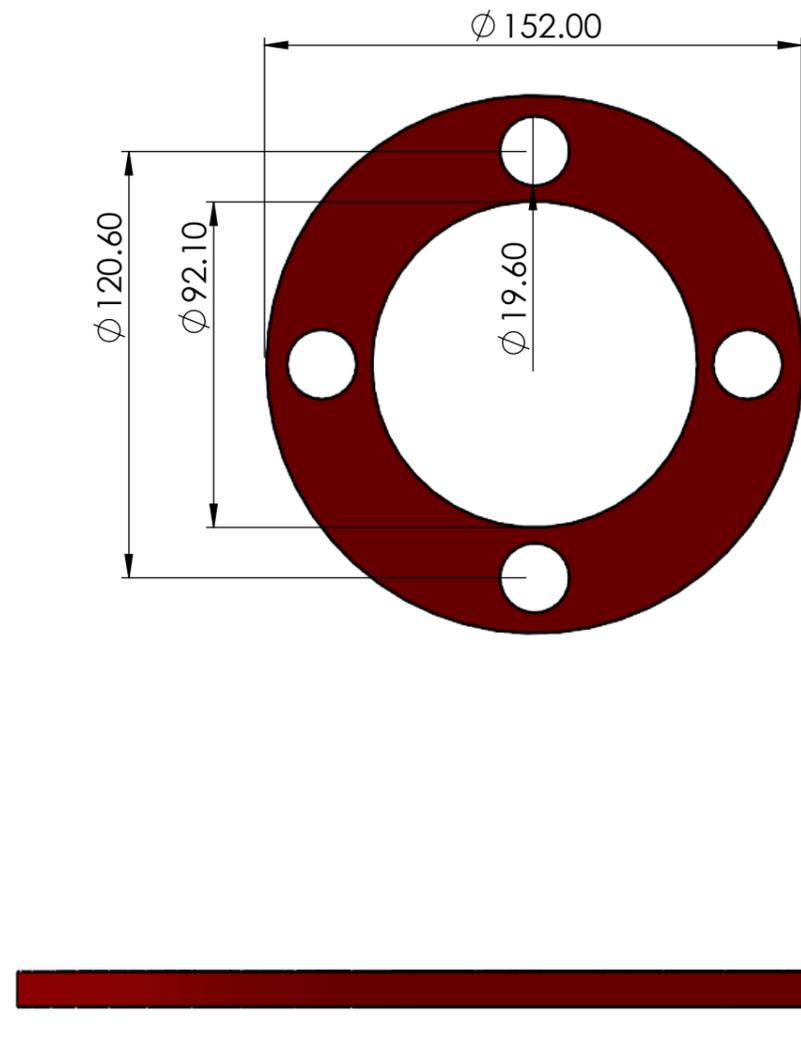


UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELECTRONICA, BIOMEDICA Y FIMEB.

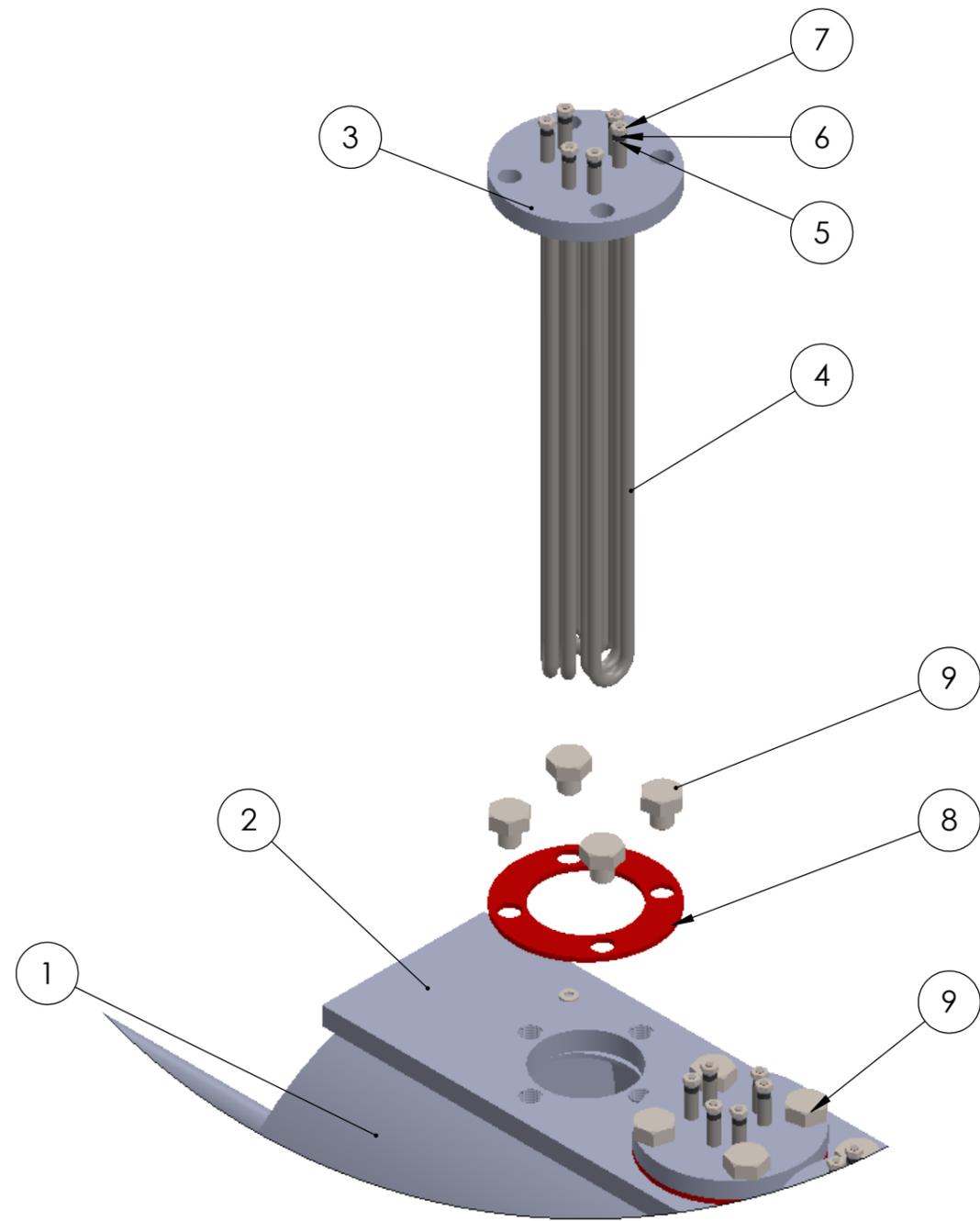
| | | | |
|-----------|-----------------------------|--------|---------------------|
| DISEÑO | CALENTADOR RESISTIVO | ESCALA | AJUSTADA |
| CARRERA | INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA | FECHA | 2022-05-10 |
| ELABORADO | Diego Felipe Barrios Araujo | PIEZA | RESISTENCIA TUBULAR |



| | | | |
|---|-----------------------------|--|-------------------|
|  | | UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO | |
| | | FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELECTRONICA, BIOMEDICA Y FIMEB. | |
| DISEÑO | CALENTADOR RESISTIVO | ESCALA | AJUSTADA |
| CARRERA | INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA | FECHA | 2022-05-10 |
| ELABORADO | Diego Felipe Barrios Araujo | PIEZA | BRIDA ANSI 150 2" |



| | | | |
|---|-----------------------------|--|------------|
|  | | UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELECTRONICA, BIOMEDICA Y FIMEB. | |
| DISEÑO | CALENTADOR RESISTIVO | ESCALA | AJUSTADA |
| CARRERA | INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA | FECHA | 2022-05-10 |
| ELABORADO | Diego Felipe Barrios Araujo | PIEZA | SELLO |

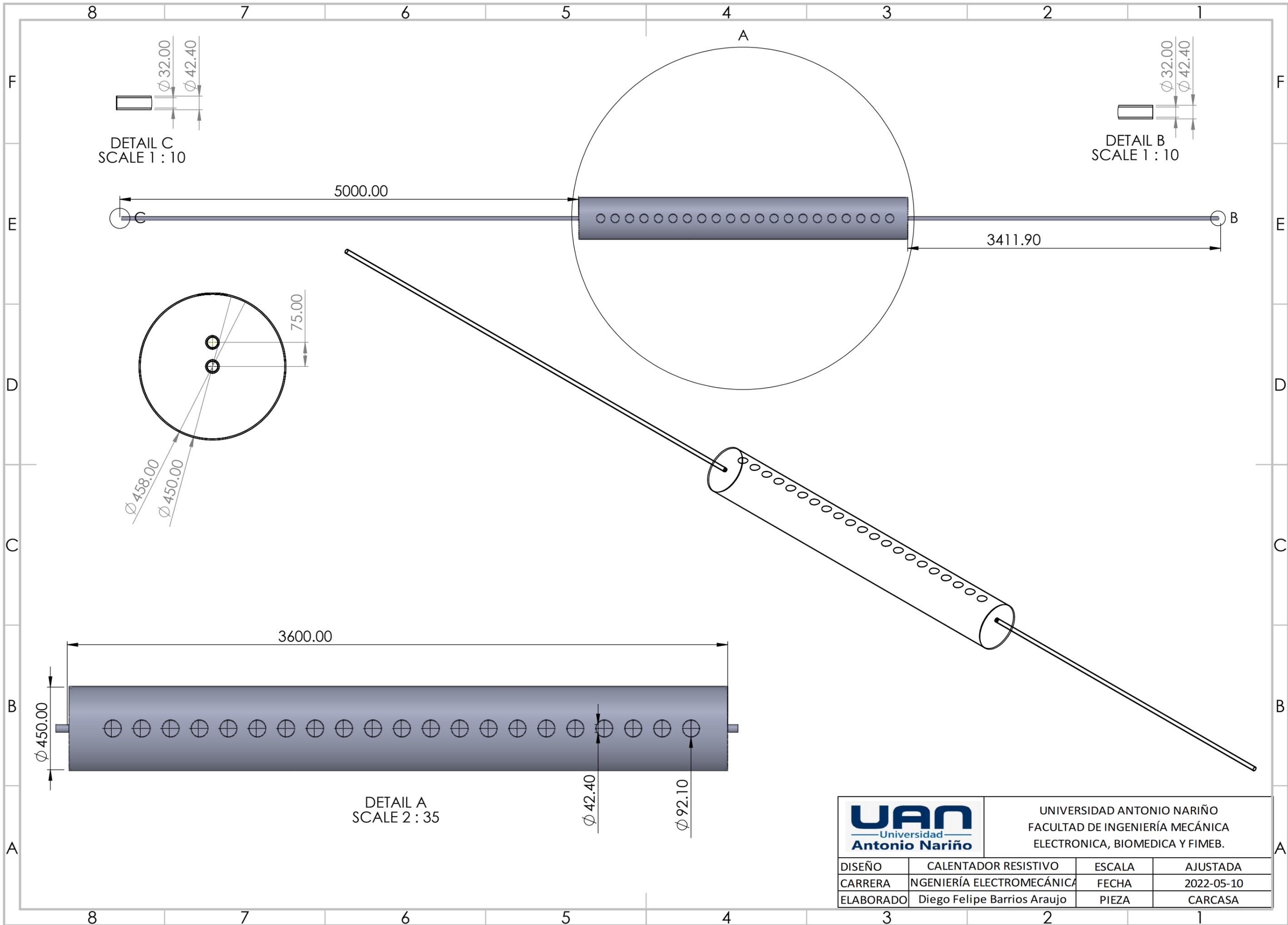


| N.º DE ELEMENTO | N.º DE PIEZA | CANTIDAD |
|-----------------|------------------------------|----------|
| 1 | Carcasa | 1 |
| 2 | platina | 1 |
| 3 | brida ciega. | 21 |
| 4 | resistencia tubular | 63 |
| 5 | AISLANTE | 126 |
| 6 | arandels | 126 |
| 7 | HHJNUT 0.2500-20-D-N | 126 |
| 8 | sello | 21 |
| 9 | HHBOLT 0.7500-10x0.75x0.75-N | 84 |



UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELECTRONICA, BIOMEDICA Y FIMEB.

| | | | |
|-----------|-----------------------------|--------|------------------|
| DISEÑO | CALENTADOR RESISTIVO | ESCALA | AJUSTADA |
| CARRERA | INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA | FECHA | 2022-05-10 |
| ELABORADO | Diego Felipe Barrios Araujo | PIEZA | VISTA DE DETALLE |

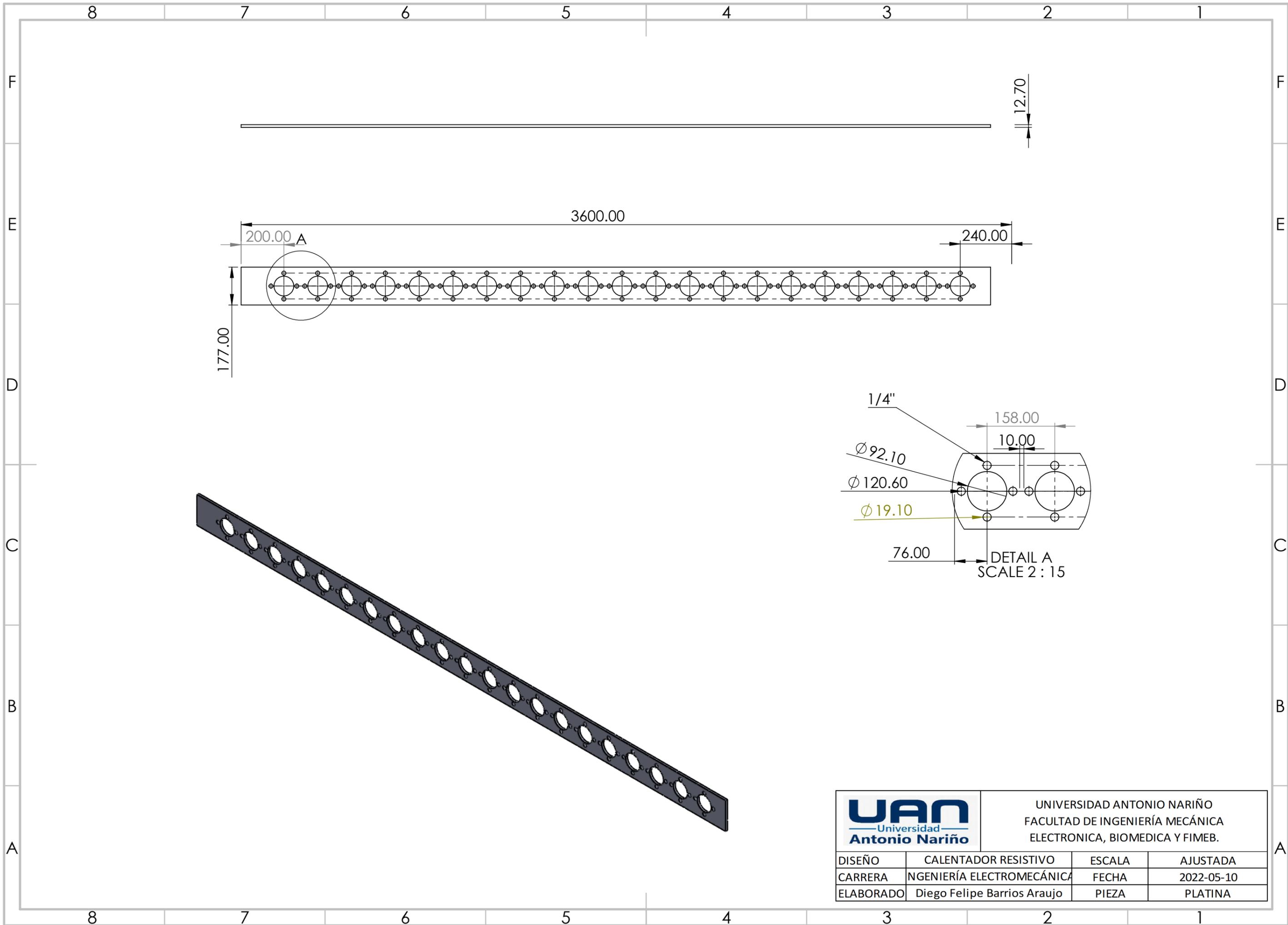


DETAIL C
SCALE 1 : 10

DETAIL B
SCALE 1 : 10

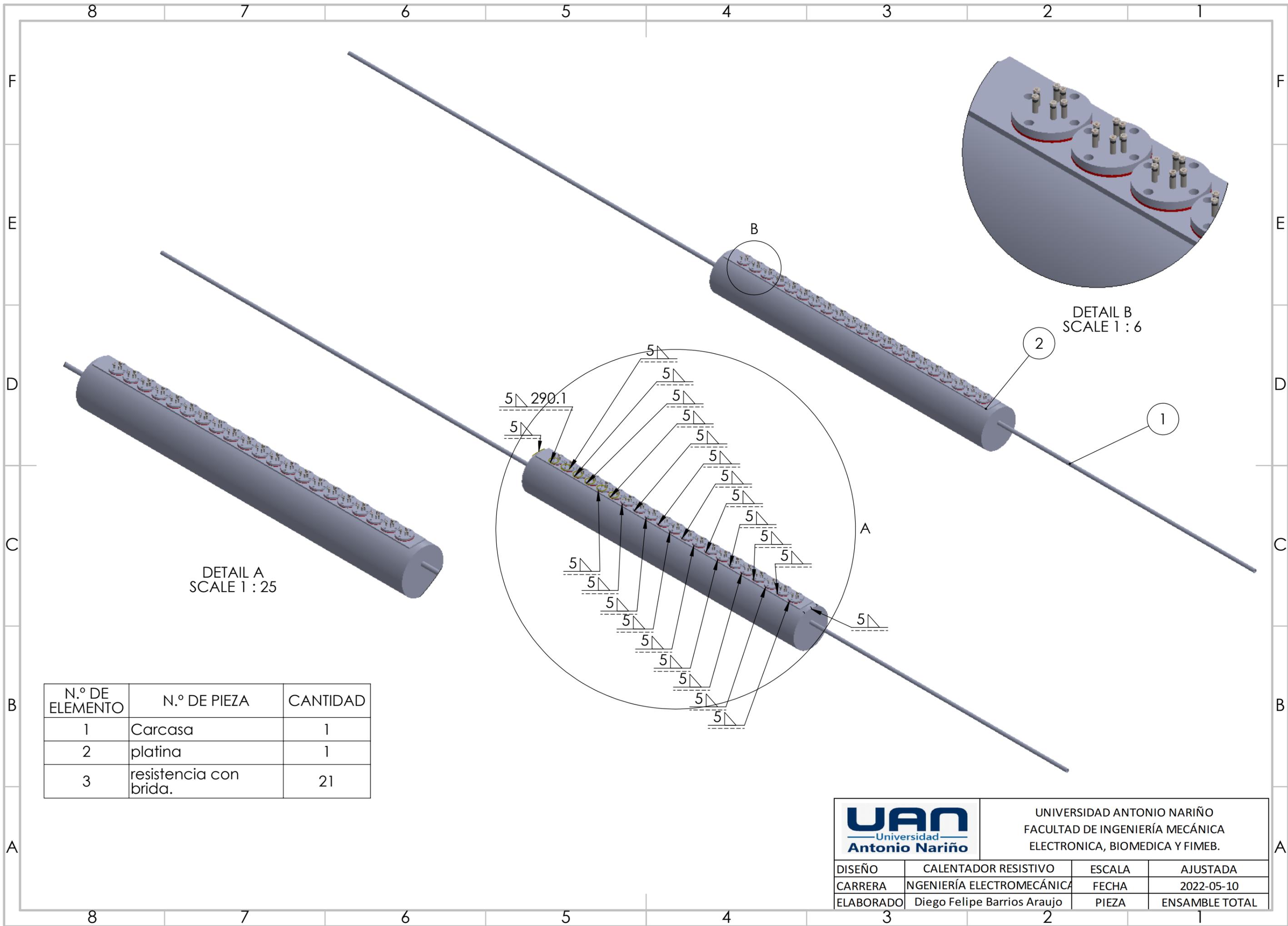
DETAIL A
SCALE 2 : 35

| | | | |
|---|-----------------------------|--|------------|
|  | | UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELECTRONICA, BIOMEDICA Y FIMEB. | |
| DISEÑO | CALENTADOR RESISTIVO | ESCALA | AJUSTADA |
| CARRERA | INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA | FECHA | 2022-05-10 |
| ELABORADO | Diego Felipe Barrios Araujo | PIEZA | CARCASA |



UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
 FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
 ELECTRONICA, BIOMEDICA Y FIMEB.

| | | | |
|-----------|-----------------------------|--------|------------|
| DISEÑO | CALENTADOR RESISTIVO | ESCALA | AJUSTADA |
| CARRERA | INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA | FECHA | 2022-05-10 |
| ELABORADO | Diego Felipe Barrios Araujo | PIEZA | PLATINA |



DETAIL A
SCALE 1 : 25

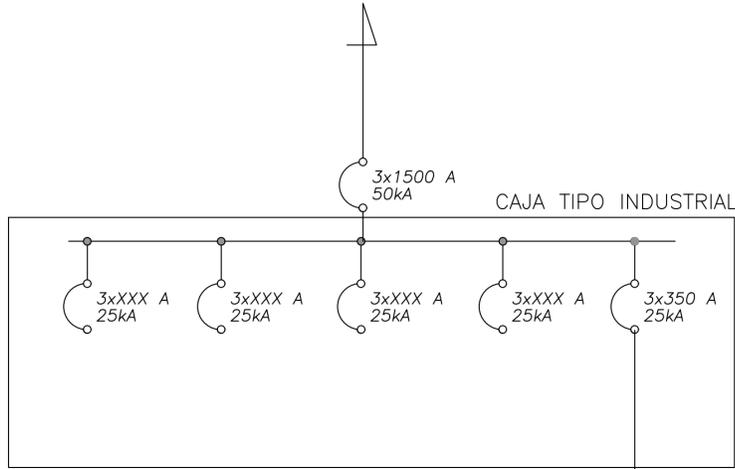
DETAIL B
SCALE 1 : 6

| N.º DE ELEMENTO | N.º DE PIEZA | CANTIDAD |
|-----------------|------------------------|----------|
| 1 | Carcasa | 1 |
| 2 | platina | 1 |
| 3 | resistencia con brida. | 21 |

| | | | |
|-----------|-----------------------------|--|----------------|
| | | UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELECTRONICA, BIOMEDICA Y FIMEB. | |
| DISEÑO | CALENTADOR RESISTIVO | ESCALA | AJUSTADA |
| CARRERA | INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA | FECHA | 2022-05-10 |
| ELABORADO | Diego Felipe Barrios Araujo | PIEZA | ENSAMBLE TOTAL |

DIAGRAMA UNIFILAR GENERAL

Red Electrica Alimentacion Calentador 220,5 KW / 460 V



2x(3#4/0+1#2/0N+1#4T Cu)
Ducto 2ø 2 1/2" EMT

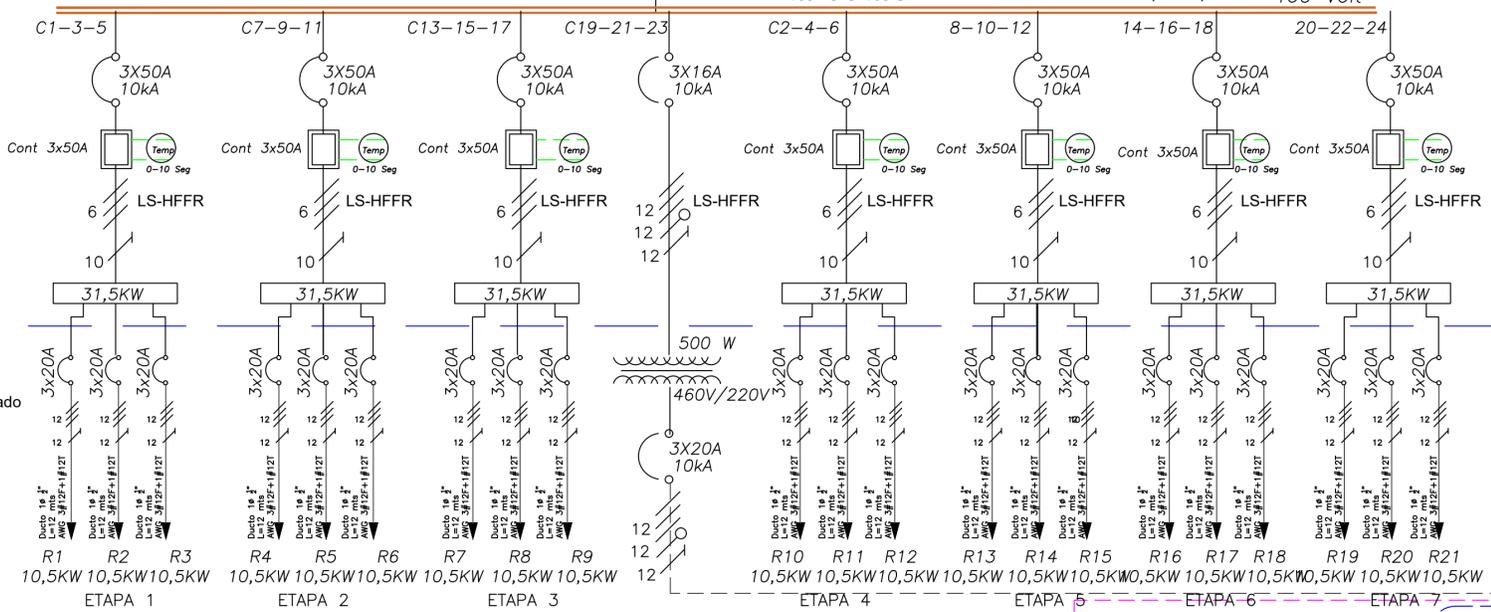
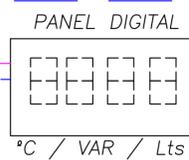
COFRE: NEMA TIPO 4 / IP 66

① TABLERO TGD 460V: 3ø-460/277V, 24 CTOS. 400AMP

CARGA MAXIMA: 225 KVA
DEMANDA DIVERSIFICADA: 220,5 KVA

3x300 A Ajustable
25kA

A1 Control de Nivel
A2 Control de Alta Temperatura
100 °C a 160°C



Cable alta temperatura de cobre estañado
Temperatura: 200° C
Voltaje Máx.: 300 V
Isolante: Silicon y fibra de vidrio
Calibre: AWG 3 # 12 LS-HFFR



| | |
|---|--------------------|
| | |
| UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO Facultad Ingenieria | |
| Contiene: DIAGRAMA UNIFILAR Sistema Electrico Calentador | Escala: N/A |
| Carrera: Ingenieria Electromecanica | Fecha: 10/05/22 |
| Proyecto: Calentador Electrico | |
| Elaborado por: Diego Felipe Barrios Araujo | |

NOTAS DE CUMPLIMIENTO RETE

No tomar medidas directamente sobre el plano.
Verificar y controlar las medidas en obra.
No hacer modificaciones o los planos sin la autorización del diseñador.
Las cantidades descritas están sujetas a cambios y deberán ser validadas por el instalador con los planos de diseño y memorias de cálculo complementarias antes del inicio de la obra. En caso de emitir esta observación se exime al diseñador de cualquier reclamación posterior.
Antes del inicio de la obra, el instalador debe asegurar que al aplicar los diseños, la instalación eléctrica resultante tenga la conformidad con el RETE.
Si por razones debidamente justificadas consideran que los diseños no son adecuados, deben aplicar al diseñador antes del inicio de la obra los ajustes y dejar registro de la solicitud. (Según RETE artículo 10.2.2.3).
Cualquier desviación entre las cantidades y especificaciones de este plano con los planos, deberán ser informados al diseñador antes del inicio de la obra.
En caso de emitir esta observación se exime al diseñador de cualquier reclamación posterior.
Este plano es propiedad exclusiva del ingeniero diseñador en ningún caso puede ser utilizado para fines que no haya sido autorizado ni ser objeto de reproducción o comunicación a terceros sin nuestra autorización expresa. Toda infracción dará lugar a reclamación de daños y perjuicios.