

|  |   |                             |                  |               |
|--|---|-----------------------------|------------------|---------------|
|  | <b>GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS</b> |                             | <b>CÓDIGO</b>    | FO-GS-15      |
|  |   |                             | <b>VERSIÓN</b>   | 02            |
| <b>ESQUEMA HOJA DE RESUMEN</b>   |   |                             | <b>FECHA</b>     | 03/04/2017    |
|  |   |                             | <b>PÁGINA</b>    | <b>1 de 1</b> |
| <b>ELABORÓ</b>   |   | <b>REVISÓ</b>               | <b>APROBÓ</b>    |               |
| Jefe División de Biblioteca  |   | Equipo Operativo de Calidad | Líder de Calidad |               |

## RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES):

NOMBRE(S): YEIBER ELPIDIO

APELLIDOS: BOTELLO BAYONA

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR:

NOMBRE(S): JORGE LUIS

APELLIDOS: MANJARRES

CO-DIRECTOR:

NOMBRE(S): ORLANDO

APELLIDOS: GUTIERREZ LOPEZ

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA SOLUCIONAR LA EROSIÓN EN LOS TUBOS DE ENTRADA EN LA PARED CORTINA DE LA CALDERA DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA TERMOTASAJERO S.A E.S. P (TERMOTASAJERO DOS) SAN CAYETANO, NORTE DE SANTANDER

### RESUMEN

La central de generación de energía eléctrica Termotasajero dos, es una central de generación de electricidad ubicada en el municipio de San Cayetano Norte de Santander, el proceso de generación consiste en convertir energía química (carbón) en energía térmica (calor), la cual es transferida a un fluido de trabajo (agua) que luego se usa para impulsar una turbina. La parte que se estudió es la caldera acotubular, la cual consiste principalmente de tubos por los cuales se hace circular agua, dichos tubos están expuestos a unas condiciones de trabajo bastante agresivas actualmente se está presentando un desgaste por erosión en las superficie externa de los tubos. Se planteo como objetivo principal determinar las alternativas que permitirán solucionar la erosión en los tubos de entrada en la pared cortina de la caldera. Se llego a la conclusion Se diagnosticó que la principal causa para el actual diseño del MANHOLE, en la parte de la platina como en los pernos los valores de los esfuerzos generados se encuentran muy por debajo de la resistencia de los materiales, esto produce la erosión en las tuberías.

PALABRAS CLAVE: Erosion, caldera, central termoelectrica, tuberia, energia termica

CARACTERISTICAS:

PÁGINAS: 75 PLANOS: \_0\_ ILUSTRACIONES: 37 CD ROOM: \_1\_

**\*\*Copia No Controlada\*\***

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA SOLUCIONAR LA EROSIÓN EN LOS  
TUBOS DE ENTRADA EN LA PARED CORTINA DE LA CALDERA DE LA CENTRAL  
TERMOELÉCTRICA TERMOTASAJERO S.A E.S. P (TERMOTASAJERO DOS) SAN  
CAYETANO, NORTE DE SANTANDER

YEIBER ELPIDIO BOTELLO BAYONA

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2022

“EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA SOLUCIONAR LA EROSIÓN EN LOS  
TUBOS DE ENTRADA EN LA PARED CORTINA DE LA CALDERA DE LA CENTRAL  
TERMOELÉCTRICA TERMOTASAJERO S.A E.S. P (TERMOTASAJERO DOS) SAN  
CAYETANO, NORTE DE SANTANDER”

YEIBER ELPIDIO BOTELLO BAYONA

Proyecto de grado presentado como requisito para optar por al título de  
Ingeniero Mecánico.

DIRECTOR:

ING. JORGE LUIS MANJARRES

CODIRECTOR ING. ORLANDO GUTIERREZ LOPEZ

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2022

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE UN TRABAJO DE GRADO

FECHA: CÚCUTA, 21 DE SEPTIEMBRE 2022  
HORA: 09:00 A.m.  
LUGAR: LABORATORIO DE FLUIDOS Y TÉRMICAS FU306 UFPS  
PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA MECÁNICA

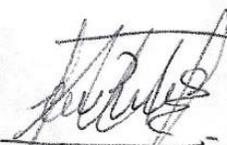
TÍTULO: "EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA SOLUCIONAR LA EROSIÓN EN LOS TUBOS DE ENTRADA EN LA PARED CORTINA DE LA CALDERA DE LA CENTRAL TERMOELÉCTRICA TERMOTASAJERO DOS S.A E.S.P. SAN CAYETANO, NORTE DE SANTANDER."

Jurados: ING. JOSÉ RAFAEL EUGENIO LÓPEZ  
ING. LUIS EMILIO VERA DUARTE

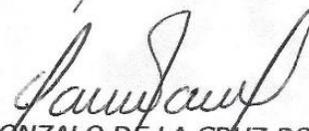
Director: ING. JORGE LUIS MANJARRES  
Codirector: ING. ORLANDO GUTIÉRREZ LÓPEZ

| Nombre del estudiante         | Código  | Calificación |        |
|-------------------------------|---------|--------------|--------|
|                               |         | Letra        | Número |
| YEIBER ELPIDIO BOTELLO BAYONA | 1121104 | Cuatro, Tres | 4.3    |

### APROBADA

  
ING. JOSÉ RAFAEL EUGENIO LÓPEZ.

  
ING. LUIS EMILIO VERA DUARTE.

  
Vo.Bo GONZALO DE LA CRUZ ROMERO GARCÍA  
Coordinador Comité Curricular  
Ingeniería Mecánica

## Tabla de contenido

|                                 | Pág. |
|---------------------------------|------|
| Introducción                    | 11   |
| 1. Problema                     | 12   |
| 1.1 Título                      | 12   |
| 1.2 Planteamiento del problema. | 12   |
| 1.3 Formulación del problema    | 13   |
| 1.4 Justificación.              | 13   |
| 1.4.1 A nivel técnico           | 13   |
| 1.4.2 A nivel social            | 13   |
| 1.4.3. A nivel económico        | 14   |
| 1.5 Objetivos                   | 14   |
| 1.5.1 Objetivo general.         | 14   |
| 1.5.2 Objetivos específicos.    | 14   |
| 1.6 Alcance y delimitaciones    | 14   |
| 1.6.1 Alcances.                 | 14   |
| 1.6.2 Limitación                | 14   |
| 1.6.3 Delimitaciones            | 14   |
| 1.6.3.1 Delimitación espacial   | 14   |
| 1.6.3.2 Delimitación Temporal   | 14   |
| 2. Marco referencial            | 15   |
| 2.1 Antecedentes                | 15   |
| 2.2. Marco teórico.             | 17   |

|   |    |
|---|----|
| 2.2.1 Corrosión.  | 17 |
| 2.2.2 La corrosión en las industrias.   | 17 |
| 2.2.3 Tipos de corrosión.   | 18 |
| 2.2.4 Categorías de corrosividad en ambientes atmosféricos.                             | 20 |
| 2.2.5 Calderas.   | 21 |
| 2.2.6 Tipos de calderas.  | 21 |
| 2.2.7 Central termoeléctrica.   | 23 |
| 2.2.8 Ciclo de una termoeléctrica convencional.   | 23 |
| 2.3 Fundamentos legales   | 26 |
| 3. Diseño metodológico  | 29 |
| 3.1 Tipo de investigación   | 29 |
| 3.2 Población y muestra   | 29 |
| 3.2.1 Población. Termotasajero S.A. E.S.P.  | 29 |
| 3.2.2 Muestra. Caja de viento y tubos pared cortina de la caldera de Termotasajero dos. | 29 |
| 3.3 Fuentes de información  | 29 |
| 3.3.1 Fuentes de información primarias  | 29 |
| 3.3.2 Fuentes de información secundarias  | 29 |
| 3.4 Técnicas y procedimientos de recolección de datos                                   | 29 |
| 3.5 Análisis de la información  | 30 |
| 3.6. Metodología  | 30 |
| 3.6.1 Desarrollo de la metodología.   | 31 |
| 4. Desarrollo del problema  | 32 |
| 4.1 Determinación de la problemática  | 32 |

|   |    |
|---|----|
| 4.2 Determinación del tipo la erosión en los tubos de entrada de la pared cortina de la caldera       | 36 |
| 4.3 Diagnóstico de las causas que proceden la erosión en la tubería de la pared cortina de la caldera | 38 |
| 4.4 Formulación de alternativas que prevengan y mitiguen la erosión en el sistema                     | 39 |
| 5. Análisis técnico y económico de alternativas   | 40 |
| 5.1 Evaluación alternativa MANHOLE para caja de aire de sello   | 40 |
| 5.1.1 Análisis por elementos finitos del MANHOLE  | 41 |
| 5.1.2 Diagnóstico del análisis para el diseño del MANHOLE   | 50 |
| 5.1.3 Costos implementación de los MANHOLES   | 50 |
| 5.2. Evaluación alternativa del Ventilador con calentador   | 53 |
| 5.2.1 Evaluación técnica de alternativa ventilador con calentador.                                    | 56 |
| 5.2.2 Diagnóstico del análisis para el diseño del Ventilador con calentador.                          | 57 |
| 5.2.3 Costos de implementación del Ventilador con calentador  | 61 |
| 5.3 Evaluación alternativa del separador ciclónico  | 62 |
| 5.3.1 Evaluación alternativa técnica del separador ciclónico  | 63 |
| 5.3.2 Diagnóstico del análisis para el diseño del separador ciclónico de aire                         | 66 |
| 5.3.3 Costos de implementación para el separador ciclónico  | 67 |
| 6. Conclusiones   | 72 |
| 7. Recomendaciones  | 73 |
| 8. Referencias bibliograficas   | 74 |

## Lista de figuras

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Figura 1. Erosión en la tubería.  | 13          |
| Figura 2. Corrosión por picadura.   | 18          |
| Figura 3. Corrosión por turbulencias.   | 19          |
| Figura 4. Caldera pirotubular.  | 22          |
| Figura 5. Calderas acuotubulares.   | 22          |
| Figura 6. Termoeléctrica TERMOTASAJERO, SAN CAYETANO, NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA. | 23          |
| Figura 7. Ciclo de una termoeléctrica.  | 24          |
| Figura 8. Metodología para el desarrollo del proyecto.                              | 30          |
| Figura 9. Tubería del cabezal de entrada.   | 32          |
| Figura 10. Tubería de la pared cortina.   | 32          |
| Figura 11. Fuga de agua en la tubería de la caldera.                                | 33          |
| Figura 12. Fuga de agua entre la pared frontal y el Curtain.                        | 33          |
| Figura 13. Plano de la Caldera con visualización en los tubos.                      | 34          |
| Figura 14. Caja de aire secundario.   | 35          |
| Figura 15. Caja de aire.  | 36          |
| Figura 16. Medida de la tubería del Curtain y Pared.                                | 36          |
| Figura 17. Plano técnico para construcción del MANHOLE.                             | 40          |
| Figura 18. Modelo 3D del MANHOLE.   | 41          |
| Figura 19. Resultado del Esfuerzo de Von Misess Stress del MANHOLE.                 | 49          |
| Figura 20. Resultado del desplazamiento del MANHOLE.                                | 49          |

|  |    |
|--|----|
| Figura 21. Resultado del factor de seguridad del MANHOLE.                          | 50 |
| Figura 22. Vista de techo caja norte del MANHOLE.                                  | 52 |
| Figura 23. Vista isométrica caja norte del MANHOLE.                                | 52 |
| Figura 24. Vista isométrica del MANHOLE.   | 53 |
| Figura 25. Vista techo caja frontal del MANHOLE.                                   | 53 |
| Figura 26. Determinación del flujo NOX del separador ciclónico.                    | 54 |
| Figura 27. Condiciones de frontera para el análisis del ventilador con calentador. | 55 |
| Figura 28. Resultado en el contorno de presiones del ventilador con calentador.    | 55 |
| Figura 29. Resultado en el contorno de presiones del ventilador con calentador.    | 56 |
| Figura 30. Calentador de resistencias.   | 57 |
| Figura 31. Bosquejo en 3D de los ductos de las cajas de aire.                      | 59 |
| Figura 32. Resultado de las presiones en de los ductos de las cajas de aire.       | 59 |
| Figura 33. Separador ciclónico.  | 62 |
| Figura 34. Dimensiones del ciclón.   | 63 |
| Figura 35. Figura del separador ciclónico de aire.                                 | 65 |
| Figura 36. Contornos de Presión en plano medio del ciclón.                         | 66 |
| Figura 37. Proyección 3D alternativa del separador ciclónico.                      | 71 |

## Lista de tablas

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Tabla 1. Características de la tubería con falla.   | 34          |
| Tabla 2. Información del modelo MANHOLE.  | 42          |
| Tabla 3. Propiedades del estudio MANHOLE.   | 42          |
| Tabla 4. Propiedades del material MANHOLE.  | 43          |
| Tabla 5. Estudio de las cargas y sujeciones de la tapa de la caja de aire del MANHOLE.      | 44          |
| Tabla 6. Resultado del análisis de los conectores del MANHOLE.                              | 45          |
| Tabla 7. Información de contacto de los conectores, análisis del MANHOLE.                   | 48          |
| Tabla 8. Mas información -Resultados detallados de la tapa del MANHOLE.                     | 48          |
| Tabla 9. Presupuesto para el diseño de MANHOLES.  | 51          |
| Tabla 10. Presupuesto del alquiler de equipos para el diseño del MANHOLE.                   | 51          |
| Tabla 11. Presupuesto de la mano de obra para el diseño del MANHOLE.                        | 51          |
| Tabla 12. Flujos para ambas salidas del ventilador con calentador.                          | 56          |
| Tabla 13. Valores de los resultados de las presiones en de los ductos de las cajas de aire. | 60          |
| Tabla 14. Características de los ciclones de alta capacidad.                                | 63          |
| Tabla 15. Resultados de las dimensiones del ciclón.   | 64          |
| Tabla 16. Presupuesto de la mano de obra para separador ciclónico de aire.                  | 69          |
| Tabla 17. Presupuesto del alquiler de equipos para separador ciclónico de aire.             | 69          |
| Tabla 18. Presupuesto de materiales de construcción para separador ciclónico de aire.       | 70          |

## **Introducción**

La central termoeléctrica Termotasajero dos actualmente presenta problemas de erosión en los tubos de entrada en la pared cortina de la caldera, para eso se presentará una propuesta de trabajo que consistirá en explicar y analizar las diferentes alternativas para dar solución a estos problemas presentados, con sus respectiva evaluación técnica y financiera.

El presente documento se trazó como objetivo principal determinar las alternativas que permitirán solucionar la erosión en los tubos de entrada en la pared cortina de la caldera, así mismo, diagnosticar las causas que producen la erosión en las tuberías, formular alternativas que prevengan y mitiguen la erosión en el sistema, analizar estas alternativas a nivel técnico y económico, con el fin de garantizar una información completa y detallada para saber cuál de estas opciones que se estudiarán serán la más viables.

La metodología para desarrollar este proyecto partirá desde una revisión bibliográfica de antecedentes e investigaciones realizadas a nivel nacional e internacional en la solución de problemas similares en las termoeléctricas o sistemas que utilicen calderas, una segunda etapa que consistirá en diagnosticar el problema actual que presenta la termoeléctrica, como tercer paso será la presentación de las propuestas a dar solución a las problemáticas vistas, una cuarta etapa que será el análisis y evaluación financiera de estas propuestas y por último la socialización de los resultados obtenidos de este estudio.

## **1. Problema**

### **1.1. Título**

“Evaluación de alternativas para solucionar la erosión en los tubos de entrada en la pared cortina de la caldera de la Central termoeléctrica Termotasajero S.A E.S. P (Termotasajero dos) San Cayetano, Norte de Santander”

### **1.2. Planteamiento del problema.**

El continuo crecimiento de la población tiene como consecuencia también el aumento en la demanda de diversos recursos y servicios necesarios para el sostenimiento de las sociedades humanas, uno de estos servicios que está presente en casi todas las actividades es la electricidad. Por ser la generación de electricidad tan importante se hace necesario mantener y optimizar los medios por los cuales se genera, y lograr así un aprovechamiento máximo de los recursos.

La central de generación de energía eléctrica Termotasajero dos, es una central de generación de electricidad ubicada en el municipio de San Cayetano Norte de Santander, el proceso de generación consiste en convertir energía química (carbón) en energía térmica (calor), la cual es transferida a un fluido de trabajo (agua) que luego se usa para impulsar una turbina.

La parte que se estudió es la caldera acotubular, la cual consiste principalmente de tubos por los cuales se hace circular agua, dichos tubos están expuestos a unas condiciones de trabajo bastante agresivas actualmente se está presentando un desgaste por erosión en las superficie externa de los tubos esto se traduce en pérdidas de agua ya que el desgaste llega a perforar los tubos, obligando a que se tenga que intervenir y realizar mantenimientos correctivos de forma periódica, dichos mantenimientos obligan a detener la producción de electricidad y conllevan a gastos para la empresa en materiales y en mano de obra.

Termotasajero Dos se ha venido presentando desgaste en la tubería ocasionando erosión por flujo de aire secundario que a su vez cumple la función de aire de sello en el cabezal de entrada de la pared curfían que ingresa al hogar atravesando la tubería de pared de caldera. Esto se puede observar en la figura 1.



**Figura 1.** Erosión en la tubería.

### 1.3. Formulación del problema

¿Por qué solucionar el problema de erosión en los tubos de la caldera de la termoeléctrica Termotasajero dos?

### 1.4. Justificación

**1.4.1 A nivel técnico.** Con el desarrollo de este proyecto se implementó y fortaleció los conocimientos adquiridos durante el curso de estudios de ingeniería mecánica, se produce un intercambio entre la academia y la industria regional

**1.4.2. A nivel social.** El cuidado y mantenimiento de las instalaciones y sistemas de la empresa Termotasajero D\_os es de gran importancia para garantizar un servicio constante y de calidad a la comunidad.

**1.4.3. A nivel económico.** La solución del problema de erosión de los tubos de pared cortina de la caldera de Termotasajero Dos se reduciría los gastos que conlleva la reparación de las fugas producto de la erosión, estos gastos son en materiales ya que el arreglo requiere de reemplazo de tuberías y en mano de obra.

## **1.5. Objetivos**

**1.5.1. Objetivo general.** Determinar las alternativas que permitirán solucionar la erosión en los tubos de entrada en la pared cortina de la caldera.

**1.5.2. Objetivos específicos.** Determinar el tipo de erosión en los tubos de entrada de la pared cortina de la caldera.

Diagnosticar las causas que producen la erosión en las tuberías.

Formular alternativas que prevengan y mitiguen la erosión en el sistema.

Analizar las alternativas a nivel técnico y económico

## **1.6. Alcance y delimitaciones**

**1.6.1. Alcances.** Los alcances de este proyecto fueron el diagnóstico de las causas de la erosión en los tubos de la pared cortina y la evaluación de alternativas que permitan mitigar este problema.

**1.6.2. Limitación.** El proyecto se limitó sólo al análisis de las causas y las alternativas de solución, y no se implementará ninguna alternativa.

### **1.6.3. Delimitaciones**

**1.6.3.1. Delimitación espacial.** El proyecto se desarrollará en la central termoeléctrica Termotasajero dos s.a. e.s.p, ubicada en el municipio de San Cayetano, Norte de Santander.

**1.6.3.2. Delimitación Temporal.** El proyecto será desarrollado durante un periodo de 4 meses a partir de la fecha de aprobación del anteproyecto.

## 2. Marco referencial

### 2.1 Antecedentes

En el ámbito internacional se cuenta con el artículo publicado por (Del Junco Garcia & Noa Aguila, 2021) que tenía como objetivo establecer una metodología para pronosticar la vida útil en los tubos de las calderas en la Central Termoeléctrica de Cienfuegos Carlos Manuel Céspedes, ubicada en Cuba. En dicha central se presentaban fallas en los tubos que podían deberse a termofluencia, termofluencia por adelgazamiento de los tubos durante el doblado de los codos, erosión-corrosión y fatiga. Con el fin de desarrollar la metodología y un algoritmo que predijera el tiempo de vida útil de los tubos los autores describen, desde un punto de vista mecánico de la microestructura del material, las etapas que debido a las condiciones de elevada temperatura y presión a las que están expuestos los tubos, llevan a que los tubos fallen.

Para desarrollar el análisis resaltan la importancia que tiene disponer de los datos de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales con los que se fabrican los tubos, así como de la geometría de los mismos y también de las condiciones de trabajo de la caldera. En este trabajo se compararon 2 materiales; el acero SA-210 A1 y el acero SA-213 T91 considerando que, durante el doblado de los tubos para adecuarlos al lugar de operación, se produjera adelgazamiento de pared y también sin que se produjera dicho adelgazamiento. Los autores concluyen que el acero SA-21 T91 puede alcanzar una vida útil de unas 10 veces la del acero SA-210 A1 y que la presencia del fenómeno de adelgazamiento de pared no tiene una influencia significativa en la vida útil de los tubos siendo un porcentaje de reducción de sólo el 1.8% para el acero SA-210 A1 y del 0.25% para el acero SA-312 T91.

Este trabajo nos permite ver la importancia que tiene la selección del tipo de acero para la elaboración de los tubos que conducen el fluido de trabajo, también que las propiedades mecánicas

de los materiales pueden modificarse durante la adecuación de estos al lugar de operación, finalmente se pudo notar la utilidad de modelos matemáticos sencillos con los cuales se puede ayudar para la selección de materiales.

En el ámbito nacional se tiene un estudio hecho por (Tristancho Reyes, Chacon Navas, & Almeraya Calderón, 2015), con el título de “Resistencia a la corrosión a alta temperatura de recubrimientos NiCrAlY y NiCrFeNbMoTiAl depositados por APS”; en este trabajo se estudia el fenómeno de la corrosión externa en tubos de calderas de vapor atendiendo al hecho de que estos tubos están expuestos al contacto directo con los gases de producto de la combustión y que contienen impurezas inorgánicas que pueden llegar a formar películas sobre las superficies de los tubos y esto tiene como consecuencia la corrosión de los componentes.

El método que analizan en este artículo es emplear recubrimientos que proteja las superficies de los tubos, de los gases de combustión, se describen unas características que deben tener estas películas para asegurar beneficios ya que la aplicación de estos recubrimientos implican un coste adicional al de la sola instalación de los tubos y podrían llegar a tener unos efectos adversos ya que el material podría quedar protegido contra la corrosión pero sus propiedades de conducción de calor y resistencia mecánica podrían modificarse.

En el desarrollo del trabajo los autores emplearon el método de proyección térmica asistida por plasma para aplicar el recubrimiento protector.

Otro trabajo encontrado a nivel nacional se cuenta con uno realizado por (Castrillon , Osorio, Marulanda , & Perez, 2021). Donde Esta investigación se encaminó en la obtención de recubrimientos de aluminio por rociado térmico por arco, que permitieran la protección frente a la

corrosión por sales fundidas de aceros al carbono como lo es el acero ASTM A53 grado B, ya que estos materiales son usados en componentes que operan en condiciones de temperatura y presión y frecuentemente presentan problemas de corrosión por sales fundidas.

## **2.2. Marco teórico.**

**2.2.1 Corrosión.** La corrosión es el producto de la interacción oxidativa entre un metal, el ambiente o el agua en donde se encuentre sumergido, teniendo en cuenta esto se dice que las causas más conocidas de corrosión, son las alteraciones producidas en la estructura química de un metal debido a la exposición al aire, un ejemplo de este serian: la formación de una sustancia de color marrón que se forma en el hierro y el acero, degradando de tal forma a dichos materiales que pueden romperse o quebrantarse, popularmente se le conoce como “óxido o herrumbre”. (Marulanda, Tristacho, & Gonzales, 2015).

**2.2.2 La corrosión en las industrias.** Como lo describe (Biesma & San Cristobal, 2004 ) el mayor problema de la corrosión es la destrucción del metal al que afecta. se puede hablar desde fracturas, hasta fugas en tanques, disminución de la resistencia mecánica de las piezas y muchas otras maneras de efectos por los ataques. Aun así, lo peor de todo es que si no son prevenidas estas clases de ataques por corrosión, la seguridad de las personas es algo que se ve permanentemente muy afectado, hasta el punto de ser inseguro estos elementos.

Existen dos clases de pérdidas desde el punto de vista económico.

Directas: las pérdidas directas son las que afectan de manera inmediata cuando se produce el ataque. Estas se pueden clasificar en varios tipos, de las cuales las más importantes son el costo de las reparaciones, las sustituciones de los equipos deteriorados y costos por medidas preventivas.

Indirectas: se consideran todas las derivadas de los fallos debidos a los ataques de corrosión. Las principales son la detención de la producción debida a las fallas y las responsabilidades por posibles accidentes.

### 2.2.3 Tipos de corrosión.

Corrosión generalizada.

Es el proceso corrosivo más común y se suele ver con mayor frecuencia en la mayoría de metales y sus aleaciones, consiste en la utilización de ácidos minerales para la eliminación de las incrustaciones salinas que son muy frecuentes en la industria cervecera y también en unas ocasiones en la industria de los lácteos.

Corrosión por picadura o “PITTING”

Este tipo de corrosión es altamente localizada, se produce en zonas de baja corrosión generalizada y el proceso (reacción) anódico produce unas pequeñas “picaduras” en el cuerpo que afecta. Puede observarse generalmente en superficies con poca corrosión o con una corrosión generalizada casi nula. Ocurre como un proceso de disolución anódica local donde la pérdida de metal es acelerada por la presencia de un ánodo pequeño y un cátodo mucho mayor. (Marulanda, Tristacho, & Gonzales, 2015)



**Figura 2.** Corrosión por picadura.

Fuente: (BESA LAB, 2020)

### Corrosión por turbulencias

La corrosión por turbulencias se produce sobre todo en el interior de tubos o tuberías, por el flujo de líquidos que van eliminando sucesivamente las capas de óxido que se van formando en su superficie. (BESA LAB, 2020)



**Figura 3.** Corrosión por turbulencias.

Fuente: (BESA LAB, 2020)

### Corrosión galvánica

Esta corrosión es la más común de todas y es una forma de corrosión acelerada que ocurre cuando dos metales distintos entre sí actúan como ánodo uno de ellos y el otro como cátodo. Aquel que tenga el potencial de reducción más negativo procederá como una oxidación y viceversa aquel metal o especie química que exhiba un potencial de reducción más positivo procederá como una reducción. Este par de metales constituye la llamada pila galvánica. En donde la especie que se oxida (ánodo) cede sus electrones y la especie que se reduce (cátodo) acepta los electrones. (Alzate, 2017).

#### **2.2.4 Categorías de corrosividad en ambientes atmosféricos.**

Categoría C1: con pérdidas de espesor de 1,3 micras en acero. Esta categoría está dirigida principalmente a la evaluación de edificios con calefacción y con atmósferas limpias, como pueden ser por oficinas, tiendas, colegios u hoteles.

Categoría C2: para pérdidas de espesor de 1,3 y hasta 25 micras en acero. Categoría definida para la evaluación de atmósferas con bajos niveles de contaminación, o edificios sin calefacción donde pueden ocurrir condensaciones, por ejemplo: almacenes, polideportivos, etc.

Categoría C3: para pérdidas de espesor de 25 y hasta 50 micras en acero. Esta categoría está dirigida a la evaluación de atmósferas urbanas e industriales, con moderada contaminación de dióxido de azufre, o naves de fabricación con elevada humedad y con algo de contaminación del aire, por ejemplo: planta de proceso de alimentos, lavanderías, plantas cerveceras, plantas lácteas.

Categoría C4: para pérdidas de espesor de 50 y hasta 80 micras en acero. Definida para la evaluación de áreas industriales y áreas costeras con moderada salinidad como plantas químicas, piscinas, barcos y astilleros.

Categoría C5, para pérdidas de espesor de 80 y hasta 200 micras en acero. Análisis y evaluación de áreas costeras y marítimas con elevada salinidad, así como edificios o áreas con condensaciones casi permanentes, y con contaminación elevada.

**2.2.5 Calderas.** Las calderas son equipos de transformación de energía que normalmente operan continuamente o durante largos periodos de trabajo, condición que propicia un alto consumo energético en el tiempo. Tal situación hace que sea importante conocer el desempeño energético de estos equipos. Ya que, sabiendo su comportamiento energético, se puede programar su mantenimiento para reducir los costos de operación de los mismos. (Guiza Pineda & Rangel Hernandez, 2017).

**2.2.6 Tipos de calderas.** Las calderas varían extensamente en su diseño dependiendo del método de combustión usado, el combustible utilizado, el campo de uso, tipo de circulación de agua empleada, y la presión del vapor. A continuación, se presentan solo dos de las clasificaciones encontradas en la literatura para calderas: en función de la disposición de los fluidos y del tipo de fluido caloportador (Uceda Martinez, 2012)

Calderas pilotubulares: Las calderas pirotubulares son de baja potencia, mientras que las acuatubulares son de alta potencia ya que la producción de vapor de las primeras puede llegar hasta un máximo de 60 ton/h en el caso de calderas pirotubulares de dos pasos, a una presión máxima de 30 bar. En el caso de las calderas de alta potencia, estas alcanzan producciones de vapor de hasta 2.000 ton/h a presiones superiores a los 100 bar. (Franz, 2012).

Calderas de fundición: por elementos, la transmisión de calor tiene lugar en el hogar, área de intercambio pequeña y rendimientos bajo; tienen poca pérdida de carga en los humos y por ello suelen ser de tiro natural. (KOHAN, 2000).



**Figura 4.** Caldera pirotubular.

Fuente: (COLMAQUINAS, 2019)

Calderas acuotubulares: la llama se forma en un recinto de paredes tubulares que configuran la cámara de combustión. Soporta mayores presiones en el agua, pero es más cara, tiene problemas de suciedad en el lado del agua, y menor inercia térmica. (KOHAN, 2000).



**Figura 5.** Calderas acuotubulares.

Fuente: (COLMAQUINAS, 2019)

**2.2.7. Central termoeléctrica.** Una central termoeléctrica se puede definir como una instalación que es empleada en la generación de energía eléctrica a partir de la energía liberada por combustibles fósiles como petróleo, gas natural, carbón, madera, etc. Este calor es empleado en un ciclo termodinámico convencional para mover un alternador y producir energía eléctrica.



**Figura 6.** Termoeléctrica TERMOTASAJERO, SAN CAYETANO, NORTE DE SANTANDER, COLOMBIA.

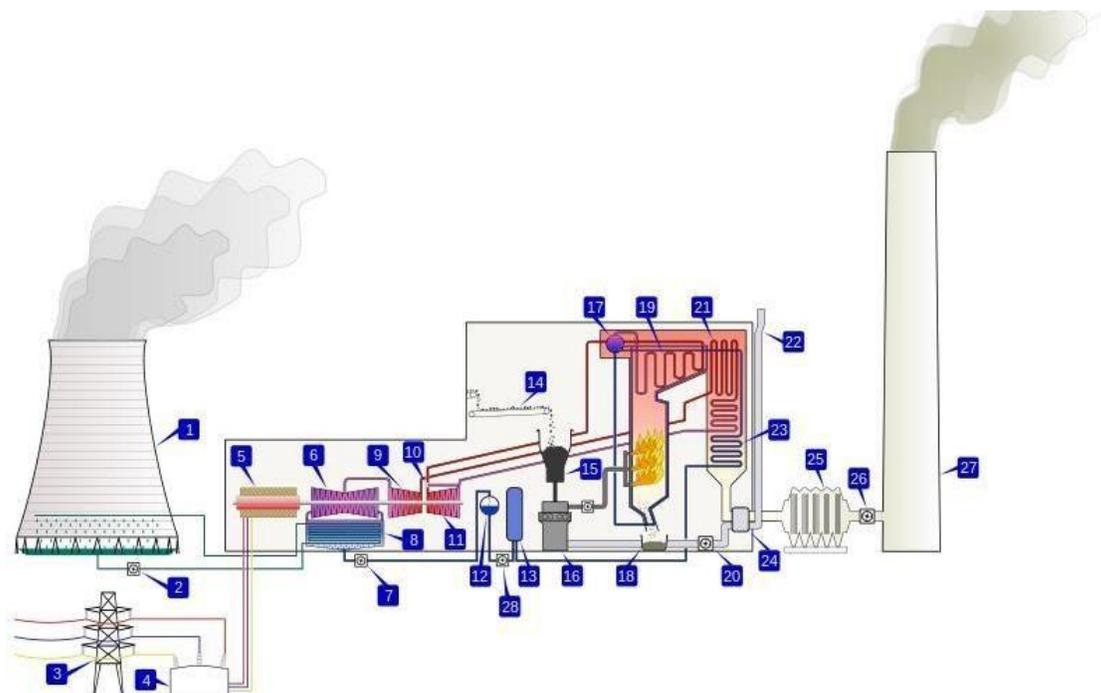
Fuente: (TERMOTASAJERO, 2020)

**2.2.8. Ciclo de una termoeléctrica convencional.** Básicamente, el funcionamiento de este tipo de centrales es el mismo independientemente del combustible que se consuma. Así, este se quema en la caldera, liberando calor que se usa para calentar agua.

El agua calentada se transformará en vapor con una presión muy elevada, que es la que hace girar una turbina de vapor, lo que transformará la energía interna del vapor en energía mecánica (rotación de un eje).

La producción de electricidad se generará en el alternador, por la rotación del rotor (que comparte el mismo eje que la turbina de vapor) y mediante la inducción electromagnética.

La electricidad generada pasa por un transformador, que aumentará su tensión para el transporte. El vapor que sale de la turbina de vapor se envía a un condensador (termodinámica) para transformarlo en líquido y retornarlo a la caldera para empezar de nuevo un nuevo ciclo de producción de vapor.



**Figura 7.** Ciclo de una termoeléctrica.

Fuente: (Creative commons, 2014)

Los ítems que conforman la termoeléctrica se nombran a continuación.

1. Torre de refrigeración.
2. Bomba.
3. Línea de transmisión.
4. Transformador (trifásico).

5. Generador eléctrico (trifásico).
6. Turbina de vapor de baja presión.
7. Bomba de condensación.
8. Condensador de superficie.
9. Turbina de media presión.
10. Válvula de control de gases.
11. Turbina de vapor de alta presión.
12. Desgasificador.
13. Calentador.
14. Cinta transportadora de carbón.
15. Tolva de carbón.
16. Pulverizador de carbón.
17. Tambor de vapor.
18. Tolva de cenizas.
19. Supercalentador.
20. Ventilador de tiro forzado (trifásica).
21. Recalentador.
22. Toma de aire de combustión.
23. Economizador
24. Precalentador de aire.
25. Precipitador electrostático.
26. Ventilador de tiro inducido.
27. Chimenea de emisiones.

## 28. Bomba de alimentación

### **2.3. Fundamentos legales**

Decreto 1076 de 2015 por medio del cual se expide el Decreto Único Ambiental. El decreto 1076 del 26 de mayo de 2015, es una compilación de las normas expedidas por el Gobierno Nacional en cabeza del presidente de la República, en ejercicio de las facultades reglamentarias otorgadas por el numeral 11 del artículo 189 de la Constitución Política.

La pretensión de esta iniciativa es recoger en un solo cuerpo normativo todos los decretos reglamentarios vigentes expedidos hasta la fecha, que desarrollan las leyes en materia ambiental. Teniendo en cuenta esta finalidad este decreto no contiene ninguna disposición nueva, ni modifica las existentes.

La iniciativa encabezada por la Presidencia de la República, tenía por objeto acercar las normas reglamentarias al ciudadano en general, con el fin de que en un solo cuerpo normativo se incorporaran todas las disposiciones de esa índole y le permitieran identificar donde ubicar la regulación ambiental y en general sectorial.

Resolución No. 0822 - Licencia Ambiental de Termotasajero Dos Mediante la resolución 0332 del 04 de abril de 1988 el instituto nacional de los recursos naturales renovables y del ambiente- indera, otorgo la licencia ambiental de acuerdo a lo establecido en el artículo 28 del decreto ley 2811 de 1974 para el proyecto TERMOELECTRICA DE TASAJERO, presentado por el instituto colombiano De energía eléctrica – ICEL en el cual se encuentra ubicado en el departamento de norte de Santander.

Que a través de la Resolución 0783 del 25 de agosto de 1998, el hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, autorizó la cesión de la licencia ambiental otorgada a través de la

Resolución 0332 del 04 de abril de 1988, al INSTITUTO COLOMBIANO DE ENERGIA ELÉCTRICA — ICEL, para la construcción y operación de la CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE TASAJERO, ubicada en el municipio de San Cayetano en el Departamento de Norte de Santander, a la empresa TERMOTASAJERO S.A. E.S.P.

Que mediante la Resolución 1181 del 20 de diciembre de 1999, se modificó la Resolución 0332 del 4 de abril de 1998, en el sentido de autorizar a la empresa TERMOTASAJERO S.A. E.S.P., la construcción y operación de la unidad II de la CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE TASAJERO, ubicada al norte de la unidad actual y adyacente a la misma, la cual está ubicada a 20 km al suroccidente de Cúcuta, margen derecha del río Zulia, en el municipio de San Cayetano, en el departamento de Norte de Santander. Que mediante Resolución 0751 del 24 de julio de 2000 se modificaron los Artículos Décimo Tercero y Décimo Séptimo de la Resolución 1181 del 20 de diciembre de 1999, en el sentido de supeditar las obligaciones de la entrega de informes de interventoría y el cumplimiento de la inversión del 1%, una vez se elaborarán los diseños definitivos de Termotasajero dos, fecha en la cual ya se tendría definido el presupuesto real del total de la inversión del proyecto.

Que con el Auto 1748 del 23 de septiembre de 2005 se efectuaron unos requerimientos a la Empresa

#### RESOLUCION NUMERO 0276 DEL 4 DE MAYO DE 2015 – PERMISOS DE EMISIONES ATMOSFERICA PARA FUENTES FIJAS

El permiso de emisión atmosférica para fuente fija, es el que concede la Autoridad ambiental competente, mediante acto administrativo, para que una persona natural o jurídica, pública o privada, dentro de los límites permisibles establecidos en las normas ambientales respectivas,

pueda realizar emisiones al aire. El permiso sólo se otorgará al propietario de la obra, empresa, actividad, industria o establecimiento que origina las emisiones.

Los permisos de emisión por estar relacionados con el ejercicio de actividades registradas por razones de orden público, no crean derechos adquiridos en cabeza de su respectivo titular, de modo que su modificación o suspensión, podrá ser ordenada por las Autoridades ambientales competentes cuando surjan circunstancias que alteren sustancialmente aquellas que fueron tenidas en cuenta para otorgarlo, o que ameriten la declaración de los niveles de prevención, alerta o emergencia.

### **3. Diseño metodológico**

#### **3.1 Tipo de investigación**

Con el propósito de cumplir con los objetivos este proyecto se enmarca en el tipo de investigación descriptiva, de acuerdo a Hernández, Fernández y Baptista (2014, p.92). “Con los estudios descriptivos se busca especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis”.

#### **3.2 Población y muestra**

**3.2.1 Población.** Termotasajero S.A. E.S.P.

**3.2.2 Muestra.** Caja de viento y tubos pared cortina de la caldera de Termotasajero dos.

#### **3.3 Fuentes de información**

**3.3.1 Fuentes de información primarias.** Según (Moranto y Gonzales, 2015), “Son fuentes primarias aquellas que contienen información original, aportan información directa que aún no ha sido interpretada o filtrada.” Dado que planteamos el tipo de investigación descriptiva las fuentes de información primarias que emplearemos será la observación directa.

**3.3.2 Fuentes de información secundarias.** Las fuentes de información primarias a las que emplearemos en el desarrollo del proyecto consisten de los informes, reportes, manuales y datos recolectados por medio de los técnicos operativos.

#### **3.4 Técnicas y procedimientos de recolección de datos**

En (Fidias Arias, 2012) señala que “Las técnicas de recolección de datos son las distintas formas o maneras de obtener la información.” Para el desarrollo del proyecto nos apoyaremos en

la técnica de observación directa haciendo uso de cámara fotográfica o de video, para registrar la información obtenida en campo.

Los datos serán recolectados mediante entrevistas directas e indirectas al personal técnico operativo con base a su experiencia en la solución de fallas.

### 3.5 Análisis de la información

Para proceder con el análisis de la información primero se reunirán los informes y documentos existentes en la empresa que describen la situación problemática, con el propósito de ubicarnos en campo y poder observar directamente el lugar problemático y su entorno; esto con el ánimo de registrar con fotografías y tenerlas presentes al momento de buscar las alternativas estas se correspondan al espacio disponible.

### 3.6. Metodología

La metodología a utilizar se muestra a continuación.



**Figura 8.** Metodología para el desarrollo del proyecto.

### **3.6.1. Desarrollo de la metodología.**

1- Mediante el uso de las diferentes bases de datos se hará una revisión bibliográfica de antecedentes con el objetivo de comparar las diferentes situaciones presentadas en otras empresas que presente un fenómeno similar.

2- Mediante investigación de campo en la planta se hará un diagnóstico inicial de la problemática que presenta actualmente Termotasajero Dos y de esa manera determinar cuál es el tipo de erosión presentada.

3- Proponer diferentes alternativas, describiendo con detalle cada una de las propuestas planteadas y su impacto a nivel técnico y económico.

4- Realizar una evaluación económica de cada una de las alternativas propuestas, para determinar a un futuro cual será la más viable en termino de costos y eficacia, donde estos costos irán incluidos costos de implementación, costos de mantenimiento, costos de materiales, etc.

5- Presentar un documento final con cada una de las propuestas analizadas técnica y económicamente y las conclusiones finales de cada uno de los ítems analizados. De igual manera se presentarán recomendaciones para la continuidad o mejoramiento de este proyecto en una futura implementación.

6- Presentar una sustentación del proyecto ante un jurado designado por el plan de estudios de ingeniería mecánica.

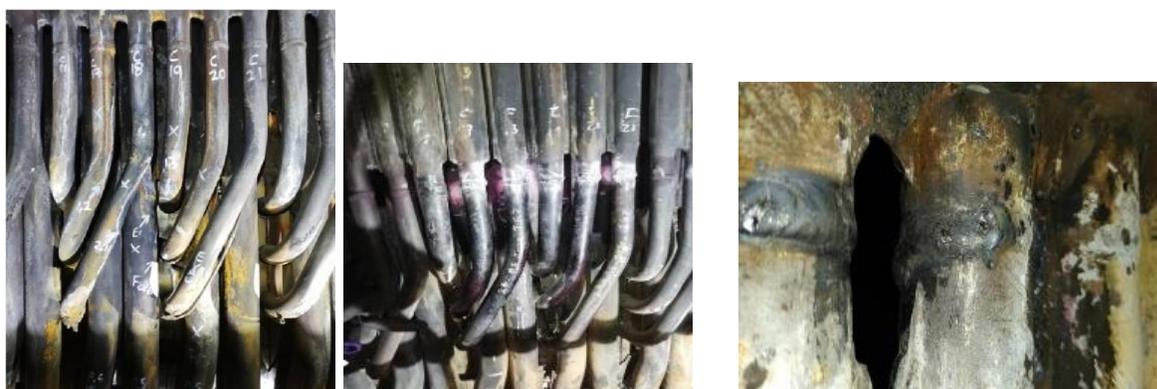
## 4. Desarrollo del problema

### 4.1 Determinación de la problemática

En la central termoeléctrica Termotasajero dos se han venido evidenciando eventos de rotura y perforaciones en las tuberías que deriva del cabezal de vapor y la tubería de la pared cortina ocasionando erosión por flujo de aire secundario que conduce material particulado (ceniza) donde es derivado del calentador (AIR HEATER) que a su vez está cumpliendo con su función de aire de sello en los cabezales de entrada de la pared cortina que ingresa al hogar atravesando la tubería de la pared cortina, esto se puede observar en la siguientes evidencias fotográficas recopiladas.



**Figura 9.** Tubería del cabezal de entrada



**Figura 10.** Tubería de la pared cortina.

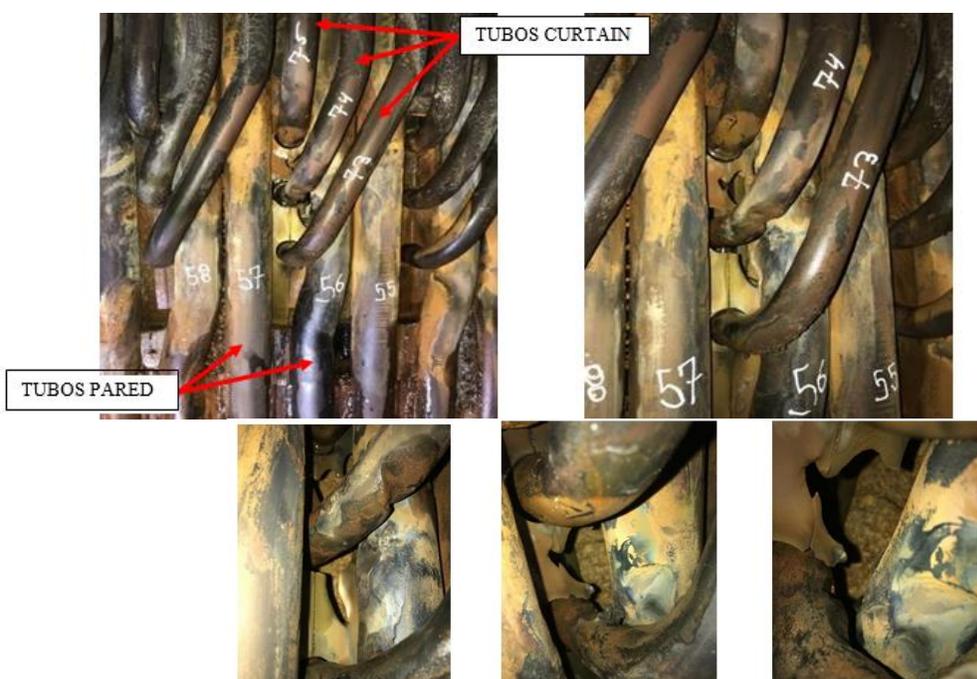
Otros daños encontrados en la caldera, consisten en el aumento de consumo de agua DEMI porque el nivel del DOMO se baja rápidamente, por consiguiente, el personal de operación realizó la revisión de caldera para determinar si existe algún daño de la tubería.

Entonces, se realizó la inspección de la caldera por mirillas y MANHOLES y se encuentra que a la altura del NIVEL 9 de Caldera existe fuga de agua proveniente de la pared frontal, como se puede visualizar en la siguiente figura.



**Figura 11.** Fuga de agua en la tubería de la caldera.

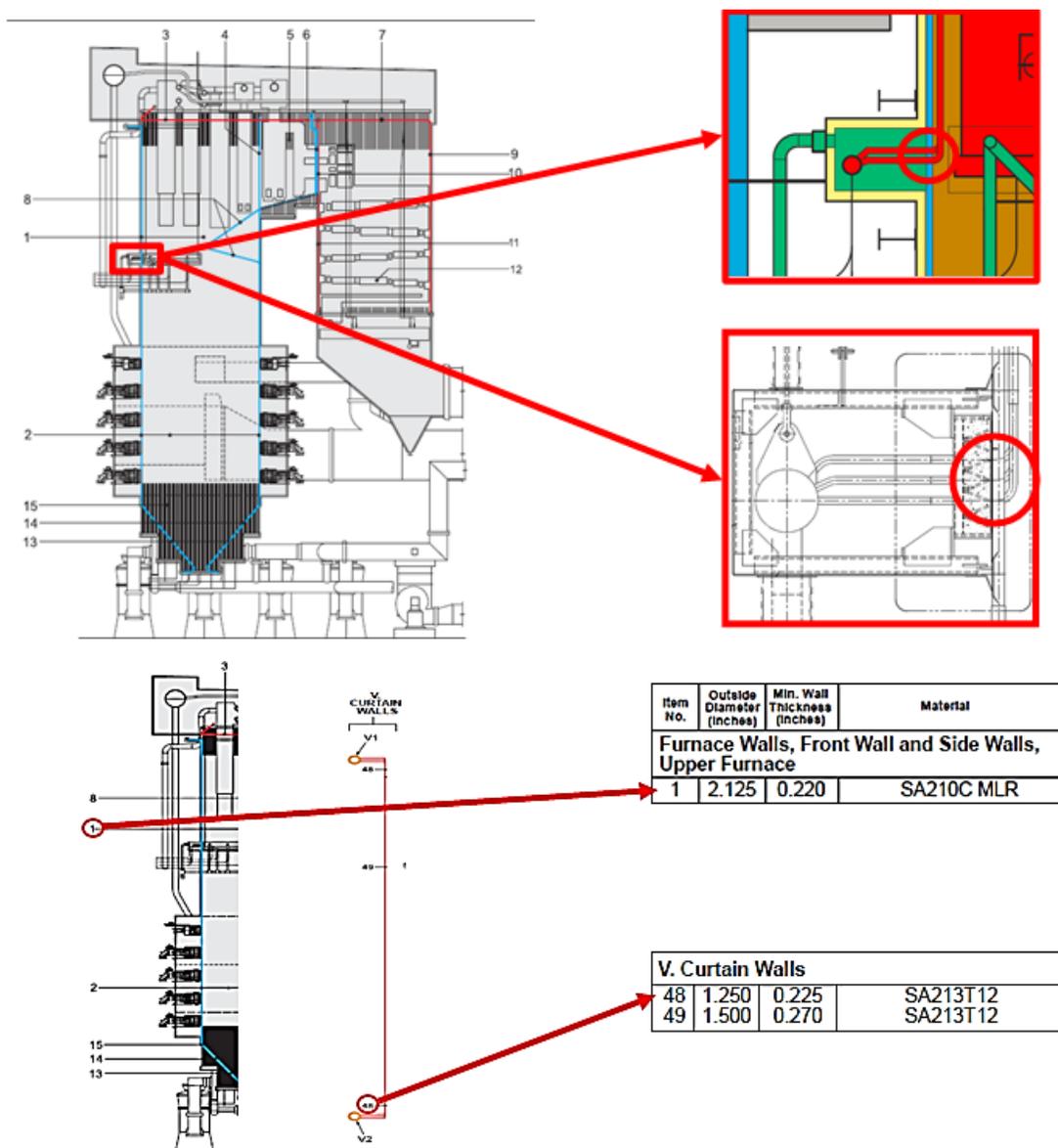
Al ingresar a la caldera se identifico el lugar exacto y la magnitud de la falla, el cual se encuentra entre la pared frontal y el Curtain. (Ver figura 12).



**Figura 12.** Fuga de agua entre la pared frontal y el Curtain.

Después que se identificó el alcance de la falla se procede a buscar información sobre planos, materiales, espesores, WPS. Donde se encontró lo siguiente:

FALLA: En dos tubos de Pared Frontal y en tres tubos salida cabezal entrada Curtain.

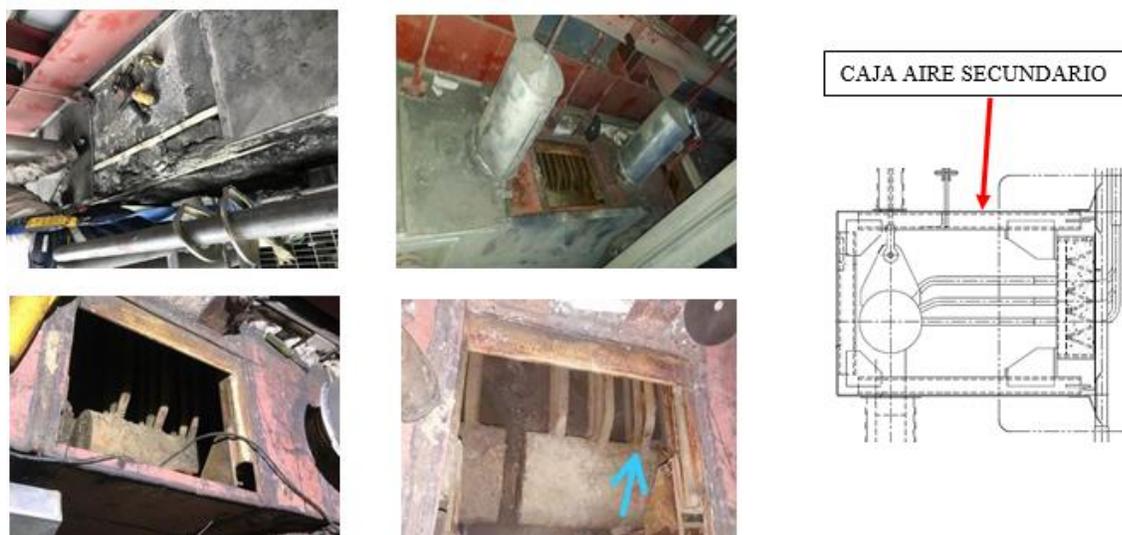


**Figura 13.** Plano de la Caldera con visualización en los tubos.

**Tabla 1.** Características de la tubería con falla.

|                       | ITEM | DIAMETRO TUBERIA | ESPEJOR | MATERIAL   | CODIGO SAP |
|-----------------------|------|------------------|---------|------------|------------|
| PARED FRONTAL TRASERA | 1    | 2.125 "          | 0.220 " | SA210C MLR | 26.00176   |
| CURVAS CURTAIN        | 48   | 1.250 "          | 0.225 " | SA213T12   | 26.00169   |

Por tanto, a lo que se inspecciono la tubería, se observó que la problemática inicia desde adentro o parte interior de esta, lo cual, se debió romper la caja de aire secundario que encierra el cabezal de entrada del Curtain y así mismo se reconoció el espacio disponible para cualquiera implementación necesaria, también como las dimensiones de las cajas de aire y los equipos que se encuentran en sus alrededores, (evidencia fotográfica figura 14 y 15). Por otro lado, se obtuvo acceso a los tubos de la falla con este proceso.



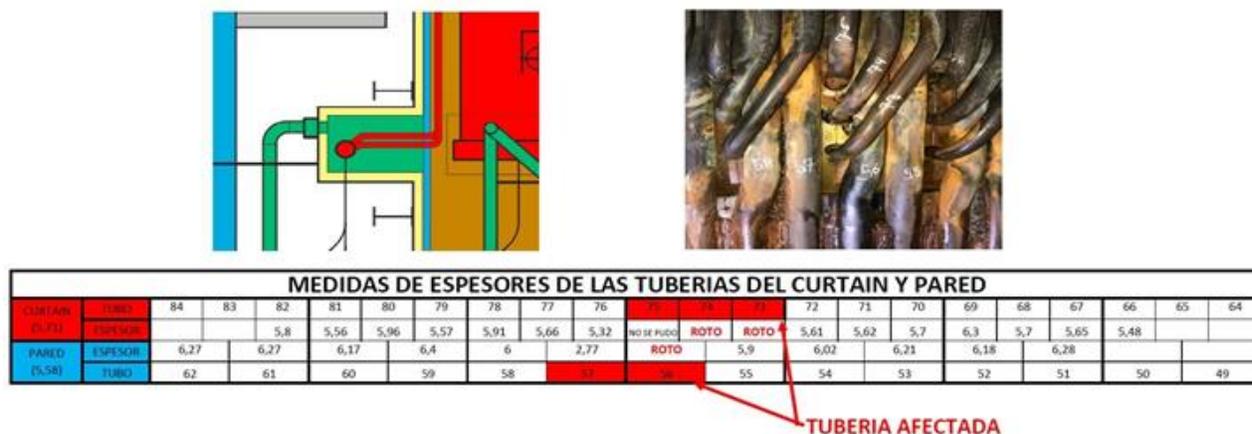
**Figura 14.** Caja de aire secundario.





**Figura 15.** Caja de aire.

Para la solución del problema, se tomaron los espesores de tuberías aledañas para descartar cualquier otra tubería afectada, encontrado correctamente la medida del espesor. Según la referencia de los planos que se pueden visualizar en la siguiente figura.



**Figura 16.** Medida de la tubería del Curtain y Pared.

#### 4.2. Determinación del tipo la erosión en los tubos de entrada de la pared cortina de la caldera

En la determinación del tipo de erosión que se está presentando en los tubos de la pared cortina de la caldera TERMOTASAJERO DOS se realizó una investigación exhaustiva en

acompañamiento con personal del departamento de mantenimiento: mecánico, planeación y predictivo de la empresa TERMOTASAJERO S.A. E.S.P. A continuación, se describe el paso a paso de la combustión, haciendo el inicio del análisis cronológico de los fenómenos de la erosión.

Primeramente, para la combustión se necesita de tres fundamentos principales, que son: combustible, ignición y el aire.

El **combustible** es utilizado como materia prima es el carbón, este es sometido a un proceso de pulverizado y luego es conducido por medio de los ventiladores primarios (la corriente de aire previamente ha sido precalentado en el calentador de aire regenerativo y dirigirlo a los pulverizadores); arrastrando el carbón por medio de tuberías hacia los quemadores.

Los **ignitores** son directamente responsable de proveer la chispa para que se genere la llama en el hogar de caldera.

El tercer componente es el **aire** proporcionado por los ventiladores forzados (su función es tomar aire del medio ambiente donde es orientado por el calentador de aire regenerativo para hacer el proceso de precalentado del aire y posteriormente es transportado por los ductos WINBOX hasta la caldera para la combustión). Este aire secundario también se utiliza para hacer el sello en la caja de vientos del cabezal donde se encuentra ubicado curtían; este flujo es tomado por el ducto WINBOX.

Además, es importante resaltar que dichas quemas generan unos residuos llamados: pesados y volátiles, los residuos **pesados** caen por gravedad depositándose en una tina llamada SCRAPPER y son desalojados por ella misma; seguido a esto llegan a la banda de transporte de ceniza y finalmente son depositados en un silo de almacenamiento para ser retirado de la planta. Los residuos **volátiles** son extraídos de la caldera por medio de unos ventiladores llamados inducidos; estos cumplen la función de realizar una succión a la caldera para retirar los residuos de la

combustión; estos gases pasan por el paso posterior de la caldera (Platem, calentador, Sobrecalentador, economizador), posteriormente circulan por el calentador de aire regenerativo, y son dirigidos hacia la chimenea.

La función del calentador de aire regenerativo es bajar la temperatura de los gases extraídos de la combustión y ganar temperatura en los aires primario, secundario; este dispositivo regenerativo reúne una serie de canastillas en forma circular; girando por los ductos (seccionándose en tres ductos), por un ducto pasa los gases de la combustión y calientan las canastillas donde giran calientes, así mismo son enfriadas por medio de los ductos de aire primario y el ducto de aire secundario; consecutivamente los aires toman la temperatura de las canastillas frías reiniciando su ciclo calentándose en el ducto de aire gases. Los gases de la combustión desprenden cenizas en las canastillas. También, el calentador regenerativo cuenta con un sistema de limpieza a vapor con el fin de limpiar las respectivas canastillas desalojando todo residuo en ellas. En base a lo anterior, la ceniza que no es expulsado por el sistema de limpieza es direccionada al WIMBOX derivándose a la caja de vientos donde se ubica el cabezal, afectando directamente los tubos de la pared cortina de la caldera.

Este tipo de fenómeno recibe el nombre “EROSIÓN POR FRICCIÓN DE PARTÍCULAS” y principalmente surge a raíz de la colisión de partículas filtradas por cada uno de los elementos mencionados anteriormente, como se pudo evidenciar en las figuras 9, 10, 11 y 12.

#### **4.3. Diagnóstico de las causas que proceden la erosión en la tubería de la pared cortina de la caldera**

Con lo recolectado anteriormente, se procedió a diagnosticar las causas principales por las que se está presentando el fenómeno llamado “EROSIÓN POR FRICCIÓN DE PARTÍCULAS”, con el personal de la empresa TERMOTASAJERO DOS.

El cual explico que la erosión es un proceso físico de desgaste gradual de una superficie sólida debido a la abrasión. En las tuberías de vapor y condensado. Se trata de un problema común en las plantas, al grado que en algunas secciones de la tubería que son erosionadas causan importantes fugas de vapor, entonces, debido al arrastre de ceniza que hay en el calentador de aire regenerativo proporcionado del aire secundario dejando partículas contaminante de ceniza, la segunda causa de erosión en la tubería es la mala fundición del agente aislante refractario denominado “CONCRAX” dejando porosidades y espacios sin fundir produciendo una mala hermeticidad en la caja de vientos posibilitando el ingreso de aire contaminado de ceniza. También, la otra causal de la erosión en las tuberías, es la falta de soldadura en la platina de la membrana que hace el sello entre la pared cortina y el cabezal, estos agentes presentes en la pared cortina son inyectados por el ciclo que genera el aire regenerativo ocasionando el daño.

#### **4.4. Formulación de alternativas que prevengan y mitiguen la erosión en el sistema**

Con base al análisis de la anterior información, se formulan tres posibles para solucionar la erosión en los tubos de entrada en la pared cortina de la caldera de la Central termoeléctrica Termotasajero S.A E.S. P (Termotasajero dos) San Cayetano, Norte de Santander, las cuales son:

- 1- “MANHOLE” para servicio de mantenimiento en sitio.
- 2- Ventilador y calentador por resistencia descripción breve de la función del equipo y como esta ayudaría al proyecto).
- 3- Separador ciclónico.

Estas tres alternativas fueron estudiadas a continuación, para seleccionar la opción más factible y de fácil aplicación para la solución del problema.

## 5. Análisis técnico y económico de alternativas

### 5.1. Evaluación alternativa MANHOLE para caja de aire de sello

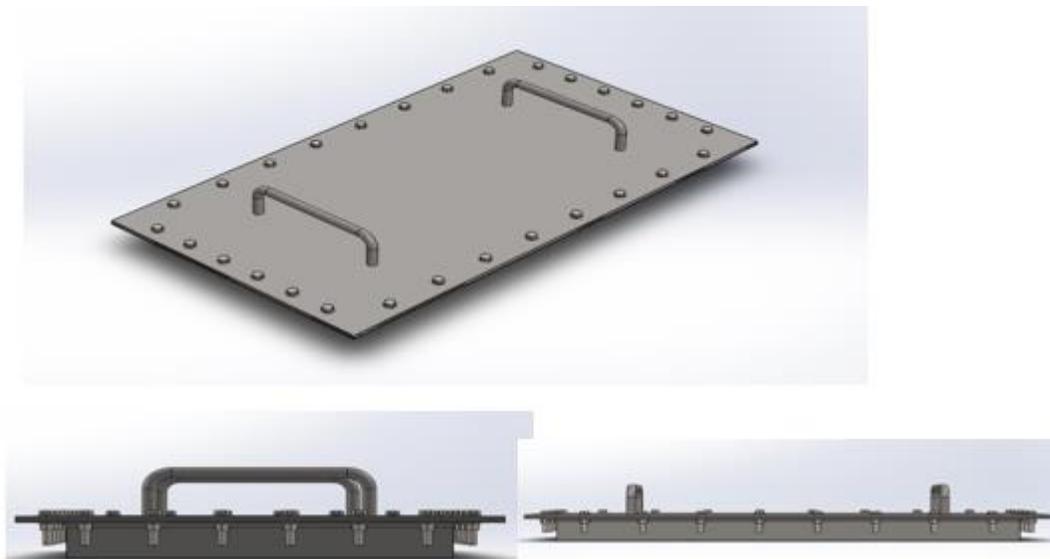
Los MANHOLES son accesorios que ayudan al venteo del tanque, ingreso del personal para realizar inspecciones, mantenimiento que se puede realizar por medio del MANHOLE del cuerpo o del techo.

Para el diseño, luego de realizar la visita al nivel 9 de la caldera y recoger la evidencia fotográfica junto con medidas que complementarían las que aparecen en los planos facilitados se procedió a dimensionar el tamaño del MANHOLE; se tuvo en cuenta la opinión de los operarios ya que el objetivo era que el MANHOLE permitieran inspeccionar el interior de las cajas de aire y agilizar el proceso de localización de las averías en la pared cortina.

Con esta información se realizó un bosquejo en el software de diseño SolidWorks en 3D de las cajas de aire, teniendo así un mejor diagnóstico del problema. Ver figura 18 y 19.



**Figura 17.** Plano técnico para construcción del MANHOLE.



**Figura 18.** Modelo 3D del MANHOLE.

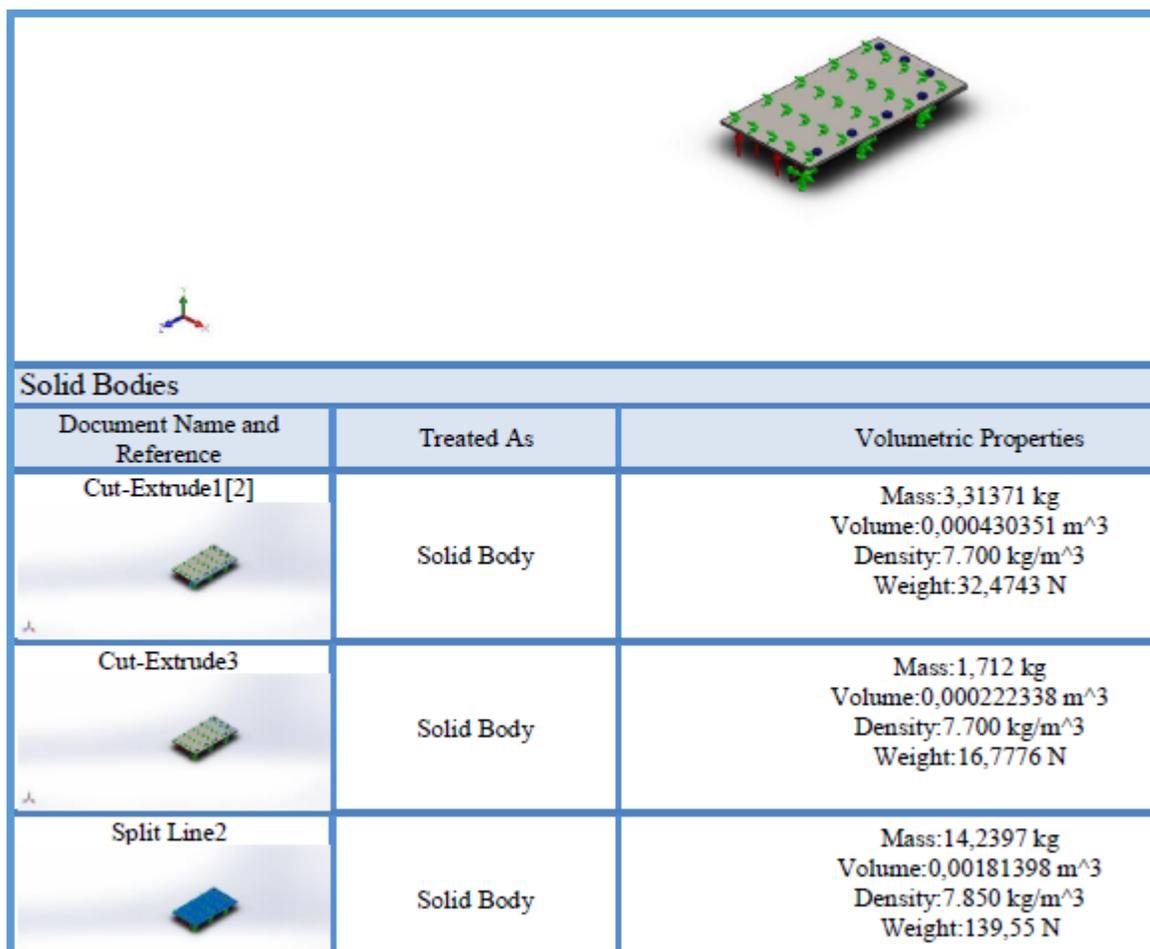
**5.1.1 Análisis por elementos finitos del MANHOLE.** Con el propósito de analizar y evaluar el diseño propuesto para el MANHOLE en la caja de aire de sello se realizó una simulación considerando las condiciones de trabajo del sitio donde se instalará el MANHOLE, dada las dimensiones de la tapa en el estudio se consideró solo un cuarto de la tapa para optimizar los recursos computacionales hacer buen uso de las herramientas disponibles y de la opción simétrica que nos ofrece el software SolidWorks.

#### Consideraciones

Las condiciones de sujeción de la tapa se asumieron como sujeciones fijas para el borde inferior de los ángulos donde se uniera los ángulos con la caja de aire por medio de cordones de soldadura, la carga que soportara la tapa sería una presión uniforme con un valor de  $121 \text{ mmH}_2\text{O}$ , información proporcionada por sala de mandos por el jefe de la planta; esta presión se convierte en una unidad útil para los cálculos, Que es equivalente a  $1185 \text{ Pa}$  los pernos que se les realizó su análisis son M12 clase 4.8 al contar el almacén con estos pernos, se considera apropiado utilizar estos pernos

y mantener una uniformidad de los materiales empleados en los diferentes elementos presentes en la planta, esto facilita el mantenimiento y el cambio al tiempo que se ahorraría recursos.

**Tabla 2.** Información del modelo MANHOLE.



| Solid Bodies  |            |   |
|---|------------|---|
| Document Name and Reference   | Treated As | Volumetric Properties   |
| <br>Cut-Extrude1[2] | Solid Body | Mass:3,31371 kg<br>Volume:0,000430351 m <sup>3</sup><br>Density:7.700 kg/m <sup>3</sup><br>Weight:32,4743 N |
| <br>Cut-Extrude3   | Solid Body | Mass:1,712 kg<br>Volume:0,000222338 m <sup>3</sup><br>Density:7.700 kg/m <sup>3</sup><br>Weight:16,7776 N   |
| <br>Split Line2    | Solid Body | Mass:14,2397 kg<br>Volume:0,00181398 m <sup>3</sup><br>Density:7.850 kg/m <sup>3</sup><br>Weight:139,55 N   |

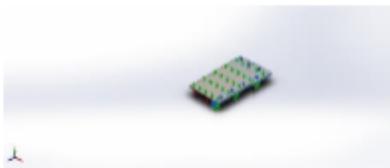
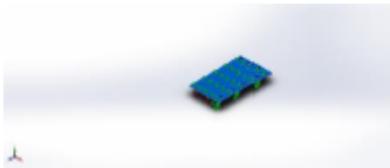
**Tabla 3.** Propiedades del estudio MANHOLE.

|                                |                           |
|--------------------------------|---------------------------|
| <b>Study name</b>              | Analisis Pernos           |
| <b>Analysis type</b>           | Static                    |
| <b>Mesh type</b>               | Solid Mesh                |
| <b>Thermal Effect:</b>         | On                        |
| <b>Thermal option</b>          | Include temperature loads |
| <b>Zero strain temperature</b> | 298 Kelvin                |

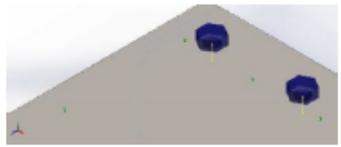
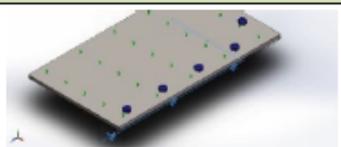
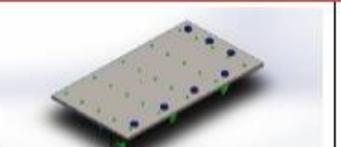
|   |                      |
|---|----------------------|
| <b>Include fluid pressure effects from SOLIDWORKS Flow Simulation</b> | Off                  |
| <b>Solver type</b>  | Direct sparse solver |
| <b>Inplane Effect:</b>  | Off                  |
| <b>Soft Spring:</b>   | On                   |
| <b>Inertial Relief:</b>   | Off                  |
| <b>Incompatible bonding options</b>                                   | Simplified           |
| <b>Large displacement</b>   | On                   |
| <b>Compute free body forces</b>                                       | Off                  |
| <b>Friction</b>   | Off                  |
| <b>Use Adaptive Method:</b>   | Off                  |

A continuación, se tabulan las propiedades de los materiales.

**Tabla 4.** Propiedades del material MANHOLE.

| Model Reference   | Properties   |
|---|--|
|  | Name: Alloy Steel<br>Model type: Linear Elastic Isotropic<br>Default failure criterion: Max von Mises Stress<br>Yield strength: 6,20422e+08 N/m <sup>2</sup><br>Tensile strength: 7,23826e+08 N/m <sup>2</sup><br>Elastic modulus: 2,1e+11 N/m <sup>2</sup><br>Poisson's ratio: 0,28<br>Mass density: 7.700 kg/m <sup>3</sup><br>Shear modulus: 7,9e+10 N/m <sup>2</sup><br>Thermal expansion coefficient: 1,3e-05 /Kelvin |
| Curve Data:N/A  |  |
|  | Name: ASTM A36 Steel<br>Model type: Linear Elastic Isotropic<br>Default failure criterion: Max von Mises Stress<br>Yield strength: 2,5e+08 N/m <sup>2</sup><br>Tensile strength: 4e+08 N/m <sup>2</sup><br>Elastic modulus: 2e+11 N/m <sup>2</sup><br>Poisson's ratio: 0,26<br>Mass density: 7.850 kg/m <sup>3</sup><br>Shear modulus: 7,93e+10 N/m <sup>2</sup>   |

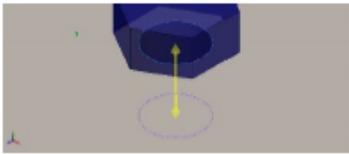
**Tabla 5.** Estudio de las cargas y sujeciones de la tapa de la caja de aire del MANHOLE.

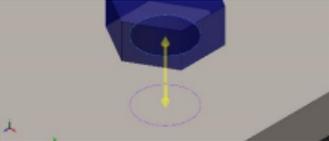
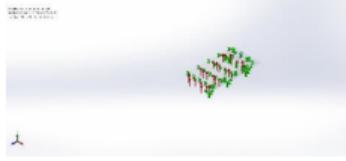
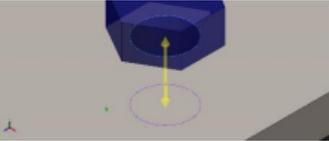
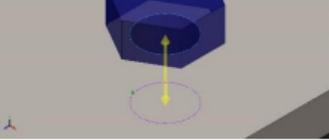
| Fixture name         | Fixture Image   | Fixture Details  |             |           |
|----------------------|---|--|-------------|-----------|
| Symmetry-1           |    | Entities: 1 face(s)<br>Type: Symmetry  |             |           |
| Resultant Forces     |   |  |             |           |
| Components           | X   | Y  | Z           | Resultant |
| Reaction force(N)    | 53,876  | -1,62532   | -0,00499851 | 53,9005   |
| Reaction Moment(N.m) | 0   | 0  | 0           | 0         |
| Fixed-2              |    | Entities: 2 face(s)<br>Type: Fixed Geometry  |             |           |
| Resultant Forces     |   |  |             |           |
| Components           | X   | Y  | Z           | Resultant |
| Reaction force(N)    | 55,6172   | -148,125   | 39,4798     | 163,074   |
| Reaction Moment(N.m) | 0   | 0  | 0           | 0         |
| On Flat Faces-1      |  | Entities: 1 face(s)<br>Type: On Flat Faces<br>Translation: 0; 0; ---<br>Units: mm                                    |             |           |
| Resultant Forces     |   |  |             |           |
| Components           | X   | Y  | Z           | Resultant |
| Reaction force(N)    | -109,814  | 0  | 5,88938     | 109,972   |
| Reaction Moment(N.m) | 0   | 0  | 0           | 0         |
| Symmetry-2           |  | Entities: 1 face(s)<br>Type: Symmetry  |             |           |
| Load name            | Load Image  | Load Details   |             |           |
| Pressure-2           |  | Entities: 1 face(s)<br>Type: Normal to selected face<br>Value: 1.185<br>Units: N/m^2<br>Phase Angle: 0<br>Units: deg |             |           |

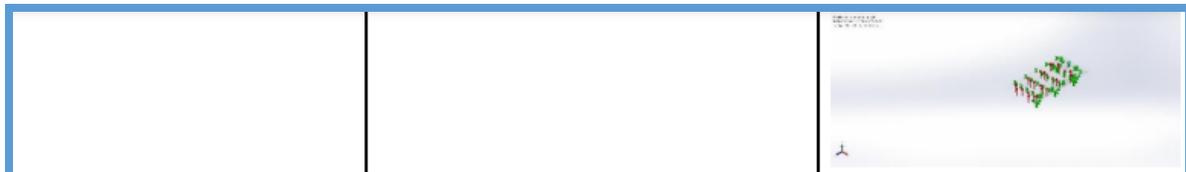
## Conectores

La tabla siguiente muestran los resultados obtenidos para los conectores en nuestro caso corresponden a pernos M12 clase 4.8. puede apreciarse que se fijó un factor de seguridad mínimo de 1,5 y los resultados de todos los pernos presentan un cumplimiento de esta condición lo cual nos asegura una buena sujeción de las tapas a los ángulos que conforman el marco de MANHOLE.

**Tabla 6.** Resultado del análisis de los conectores del MANHOLE.

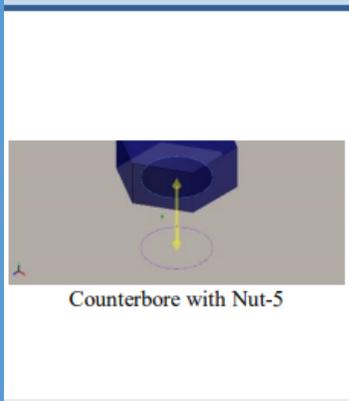
| Model Reference   | Connector Details  | Strength Details |             |           |
|---|--|------------------|-------------|-----------|
|  <p>Counterbore with Nut-1</p> | Entities: 2 edge(s)<br>Type: Bolt(Head/Nut diameter)(Counterbore)<br>Head diameter: 20,25 mm<br>Nut diameter: 20,25 mm<br>Nominal shank diameter: 13,5 mm<br>Preload (Axial): 1.500<br>Young's modulus: 2,1e+11<br>Poisson's ratio: 0,28<br>Preload units: N | Bolt Check:      | OK          |           |
|   |  | Calculated FOS:  | 16,5        |           |
|   |  | Desired FOS:     | 1,5         |           |
|                             |  |                  |             |           |
| Connector Forces  |  |                  |             |           |
| Type  | X-Component  | Y-Component      | Z-Component | Resultant |
| Axial Force (N)   | 0,0025614  | 1,4942           | -0,064612   | 1,4942    |

| Shear Force (N)   | -12,431   | 0,00051858   | 11,5        | 16,934    |                 |             |              |             |           |                 |          |         |            |         |                 |         |           |         |        |                      |          |             |          |         |
|---|---|--|-------------|-----------|-----------------|-------------|--------------|-------------|-----------|-----------------|----------|---------|------------|---------|-----------------|---------|-----------|---------|--------|----------------------|----------|-------------|----------|---------|
| Bending moment (N.m)  | -0,094858   | -3,3584e-06  | -0,081425   | 0,12501   |                 |             |              |             |           |                 |          |         |            |         |                 |         |           |         |        |                      |          |             |          |         |
|  <p>Counterbore with Nut-2</p>   | Entities: <b>2 edge(s)</b><br>Type: <b>Bolt(Head/Nut diameter)(Counterbore)</b><br>Head diameter: <b>20,25 mm</b><br>Nut diameter: <b>20,25 mm</b><br>Nominal shank diameter: <b>13,5 mm</b><br>Preload (Axial): <b>1.500</b><br>Young's modulus: <b>2,1e+11</b><br>Poisson's ratio: <b>0,28</b><br>Preload units: <b>N</b> | <table border="1"> <tr> <td>Bolt Check:</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>Calculated FOS:</td> <td>16,</td> </tr> <tr> <td>Desired FOS:</td> <td>1,5</td> </tr> </table>    | Bolt Check: | OK        | Calculated FOS: | 16,         | Desired FOS: | 1,5         |           |                 |          |         |            |         |                 |         |           |         |        |                      |          |             |          |         |
|   | Bolt Check:   | OK   |             |           |                 |             |              |             |           |                 |          |         |            |         |                 |         |           |         |        |                      |          |             |          |         |
| Calculated FOS:   | 16,   |  |             |           |                 |             |              |             |           |                 |          |         |            |         |                 |         |           |         |        |                      |          |             |          |         |
| Desired FOS:  | 1,5   |  |             |           |                 |             |              |             |           |                 |          |         |            |         |                 |         |           |         |        |                      |          |             |          |         |
| <b>Connector Forces</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Type</th> <th>X-Component</th> <th>Y-Component</th> <th>Z-Component</th> <th>Resultant</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Axial Force (N)</td> <td>0,019125</td> <td>1.504,7</td> <td>-0,006882</td> <td>1.504,7</td> </tr> <tr> <td>Shear Force (N)</td> <td>-34,467</td> <td>0,0003835</td> <td>-11,939</td> <td>36,476</td> </tr> <tr> <td>Bending moment (N.m)</td> <td>0,095376</td> <td>-2,4008e-06</td> <td>-0,25992</td> <td>0,27687</td> </tr> </tbody> </table> |   |  |             |           | Type            | X-Component | Y-Component  | Z-Component | Resultant | Axial Force (N) | 0,019125 | 1.504,7 | -0,006882  | 1.504,7 | Shear Force (N) | -34,467 | 0,0003835 | -11,939 | 36,476 | Bending moment (N.m) | 0,095376 | -2,4008e-06 | -0,25992 | 0,27687 |
| Type  | X-Component   | Y-Component  | Z-Component | Resultant |                 |             |              |             |           |                 |          |         |            |         |                 |         |           |         |        |                      |          |             |          |         |
| Axial Force (N)   | 0,019125  | 1.504,7  | -0,006882   | 1.504,7   |                 |             |              |             |           |                 |          |         |            |         |                 |         |           |         |        |                      |          |             |          |         |
| Shear Force (N)   | -34,467   | 0,0003835  | -11,939     | 36,476    |                 |             |              |             |           |                 |          |         |            |         |                 |         |           |         |        |                      |          |             |          |         |
| Bending moment (N.m)  | 0,095376  | -2,4008e-06  | -0,25992    | 0,27687   |                 |             |              |             |           |                 |          |         |            |         |                 |         |           |         |        |                      |          |             |          |         |
|  <p>Counterbore with Nut-3</p>  | Entities: <b>2 edge(s)</b><br>Type: <b>Bolt(Head/Nut diameter)(Counterbore)</b><br>Head diameter: <b>20,25 mm</b><br>Nut diameter: <b>20,25 mm</b><br>Nominal shank diameter: <b>13,5 mm</b><br>Preload (Axial): <b>1.500</b><br>Young's modulus: <b>2,1e+11</b><br>Poisson's ratio: <b>0,28</b><br>Preload units: <b>N</b> | <table border="1"> <tr> <td>Bolt Check:</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>Calculated FOS:</td> <td>16,</td> </tr> <tr> <td>Desired FOS:</td> <td>1,5</td> </tr> </table>  | Bolt Check: | OK        | Calculated FOS: | 16,         | Desired FOS: | 1,5         |           |                 |          |         |            |         |                 |         |           |         |        |                      |          |             |          |         |
|   | Bolt Check:   | OK   |             |           |                 |             |              |             |           |                 |          |         |            |         |                 |         |           |         |        |                      |          |             |          |         |
| Calculated FOS:   | 16,   |  |             |           |                 |             |              |             |           |                 |          |         |            |         |                 |         |           |         |        |                      |          |             |          |         |
| Desired FOS:  | 1,5   |  |             |           |                 |             |              |             |           |                 |          |         |            |         |                 |         |           |         |        |                      |          |             |          |         |
| <b>Connector Forces</b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Type</th> <th>X-Component</th> <th>Y-Component</th> <th>Z-Component</th> <th>Resultant</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Axial Force (N)</td> <td>0,093321</td> <td>1.494,4</td> <td>-0,0025373</td> <td>1.494,4</td> </tr> <tr> <td>Shear Force (N)</td> <td>-25,101</td> <td>0,0015442</td> <td>-13,745</td> <td>28,618</td> </tr> <tr> <td>Bending moment (N.m)</td> <td>0,10374</td> <td>-6,8131e-06</td> <td>-0,19703</td> <td>0,22267</td> </tr> </tbody> </table> |   |  |             |           | Type            | X-Component | Y-Component  | Z-Component | Resultant | Axial Force (N) | 0,093321 | 1.494,4 | -0,0025373 | 1.494,4 | Shear Force (N) | -25,101 | 0,0015442 | -13,745 | 28,618 | Bending moment (N.m) | 0,10374  | -6,8131e-06 | -0,19703 | 0,22267 |
| Type  | X-Component   | Y-Component  | Z-Component | Resultant |                 |             |              |             |           |                 |          |         |            |         |                 |         |           |         |        |                      |          |             |          |         |
| Axial Force (N)   | 0,093321  | 1.494,4  | -0,0025373  | 1.494,4   |                 |             |              |             |           |                 |          |         |            |         |                 |         |           |         |        |                      |          |             |          |         |
| Shear Force (N)   | -25,101   | 0,0015442  | -13,745     | 28,618    |                 |             |              |             |           |                 |          |         |            |         |                 |         |           |         |        |                      |          |             |          |         |
| Bending moment (N.m)  | 0,10374   | -6,8131e-06  | -0,19703    | 0,22267   |                 |             |              |             |           |                 |          |         |            |         |                 |         |           |         |        |                      |          |             |          |         |
|  <p>Counterbore with Nut-4</p>   | Entities: <b>2 edge(s)</b><br>Type: <b>Bolt(Head/Nut diameter)(Counterbore)</b><br>Head diameter: <b>20,25 mm</b><br>Nut diameter: <b>20,25 mm</b><br>Nominal shank diameter: <b>13,5 mm</b><br>Preload (Axial): <b>1.500</b><br>Young's modulus: <b>2,1e+11</b><br>Poisson's ratio: <b>0,28</b><br>Preload units: <b>N</b> | <table border="1"> <tr> <td>Bolt Check:</td> <td>OK</td> </tr> <tr> <td>Calculated FOS:</td> <td>16,</td> </tr> <tr> <td>Desired FOS:</td> <td>1,5</td> </tr> </table>   | Bolt Check: | OK        | Calculated FOS: | 16,         | Desired FOS: | 1,5         |           |                 |          |         |            |         |                 |         |           |         |        |                      |          |             |          |         |
|   | Bolt Check:   | OK   |             |           |                 |             |              |             |           |                 |          |         |            |         |                 |         |           |         |        |                      |          |             |          |         |
| Calculated FOS:   | 16,   |  |             |           |                 |             |              |             |           |                 |          |         |            |         |                 |         |           |         |        |                      |          |             |          |         |
| Desired FOS:  | 1,5   |  |             |           |                 |             |              |             |           |                 |          |         |            |         |                 |         |           |         |        |                      |          |             |          |         |



Connector Forces

| Type                 | X-Component | Y-Component | Z-Component | Resultant |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| Axial Force (N)      | 0,11182     | 1.495       | -0,0021214  | 1.495     |
| Shear Force (N)      | -29,996     | 0,00225     | 4,452       | 30,325    |
| Bending moment (N.m) | -0,030757   | 1,9396e-06  | -0,25441    | 0,25626   |

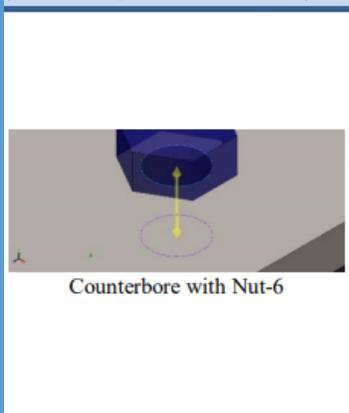


Entities: 2 edge(s)  
 Type: Bolt(Head/Nut diameter)(Counterbore)  
 Head diameter: 20,25 mm  
 Nut diameter: 20,25 mm  
 Nominal shank diameter: 13,5 mm  
 Preload (Axial): 1.500  
 Young's modulus: 2,1e+11  
 Poisson's ratio: 0,28  
 Preload units: N

|                 |     |
|-----------------|-----|
| Bolt Check:     | OK  |
| Calculated FOS: | 16, |
| Desired FOS:    | 1,5 |

Connector Forces

| Type                 | X-Component | Y-Component | Z-Component | Resultant |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| Axial Force (N)      | 0,0036489   | 1.508,4     | -0,017775   | 1.508,4   |
| Shear Force (N)      | -1,1759     | 0,00029385  | 24,695      | 24,723    |
| Bending moment (N.m) | -0,20163    | 2,038e-07   | -0,024099   | 0,20307   |

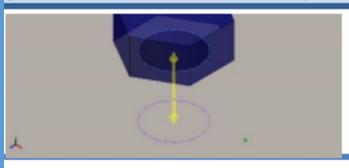


Entities: 2 edge(s)  
 Type: Bolt(Head/Nut diameter)(Counterbore)  
 Head diameter: 20,25 mm  
 Nut diameter: 20,25 mm  
 Nominal shank diameter: 13,5 mm  
 Preload (Axial): 1.500  
 Young's modulus: 2,1e+11  
 Poisson's ratio: 0,28  
 Preload units: N

|                 |     |
|-----------------|-----|
| Bolt Check:     | OK  |
| Calculated FOS: | 16, |
| Desired FOS:    | 1,5 |

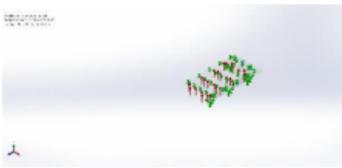
Connector Forces

| Type                 | X-Component | Y-Component | Z-Component | Resultant |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| Axial Force (N)      | 0,062798    | 1.496,8     | -0,0039685  | 1.496,8   |
| Shear Force (N)      | -15,921     | 0,00061408  | -20,317     | 25,812    |
| Bending moment (N.m) | 0,15732     | -6,9249e-06 | -0,1225     | 0,19939   |

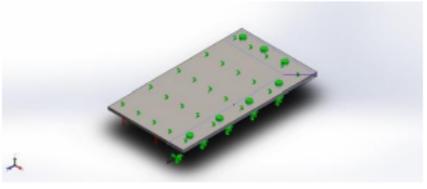
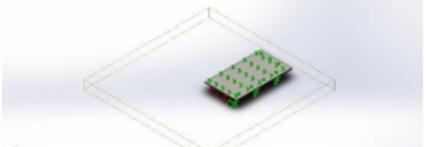


Entities: 2 edge(s)  
 Type: Bolt(Head/Nut diameter)(Counterbore)  
 Head diameter: 20,25 mm

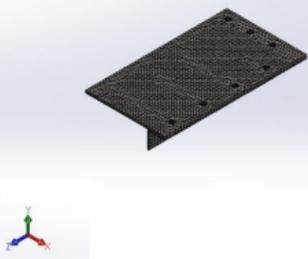
|                 |     |
|-----------------|-----|
| Bolt Check:     | OK  |
| Calculated FOS: | 16, |

| Counterbore with Nut-7  | Nut diameter: <b>20,25 mm</b><br>Nominal shank diameter: <b>13,5 mm</b><br>Preload (Axial): <b>1.500</b><br>Young's modulus: <b>2,1e+11</b><br>Poisson's ratio: <b>0,28</b><br>Preload units: <b>N</b> |              |             |           |
|---|--|--------------|-------------|-----------|
|   |  | Desired FOS: | 1,5         |           |
|  |  |              |             |           |
| Connector Forces  |  |              |             |           |
| Type  | X-Component  | Y-Component  | Z-Component | Resultant |
| Axial Force (N)   | 0,002697   | 1.496,6      | -0,045742   | 1.496,6   |
| Shear Force (N)   | 8,9913   | 0,00033166   | 11,382      | 14,505    |
| Bending moment (N.m)  | -0,093049  | 2,4746e-06   | 0,075481    | 0,11981   |

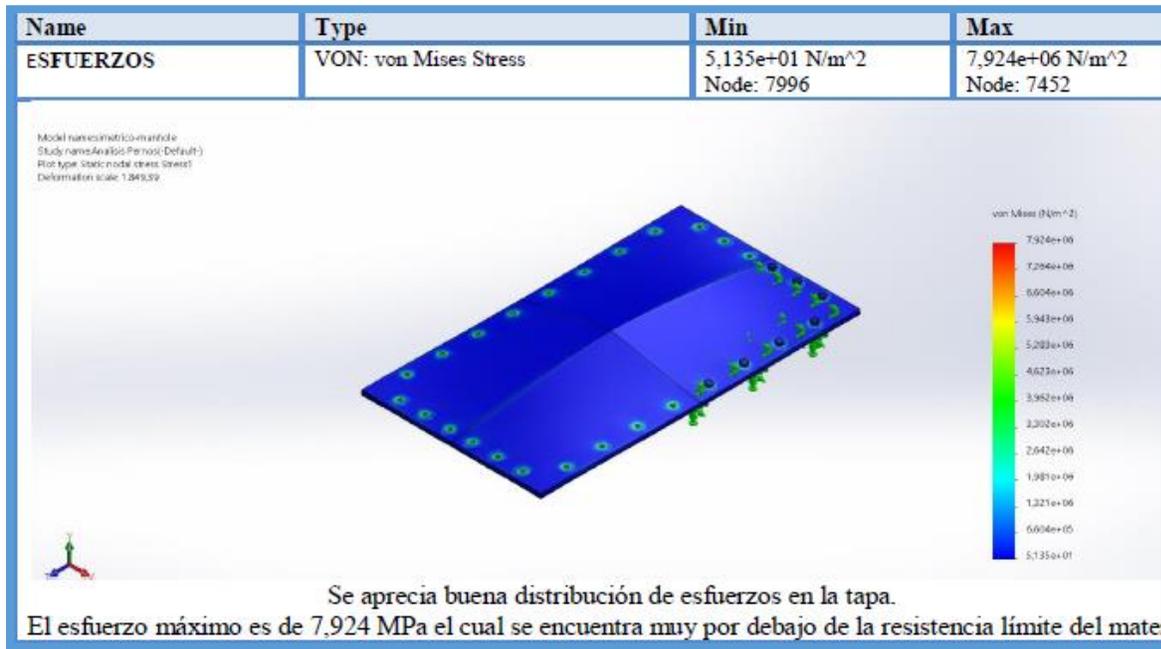
**Tabla 7.** Información de contacto de los conectores, análisis del MANHOLE.

| Contact                | Contact Image   | Contact Properties   |         |           |
|------------------------|---|--|---------|-----------|
| Contact Set-11         |   | Type: <b>No Penetration contact pair</b><br>Entities: <b>3 face(s)</b><br>Gap/Clearance: <b>Always ignore clearance</b><br>Advanced: <b>Surface to surface</b> |         |           |
| Contact/Friction force |   |  |         |           |
| Components             | X   | Y  | Z       | Resultant |
| Contact Force(N)       | 0,12608   | -6,4459E-08  | 0,12607 | 0,1783    |
| Global Contact         |  | Type: <b>No penetration (Surface to surface)</b><br>Components: <b>1 component(s)</b>  |         |           |

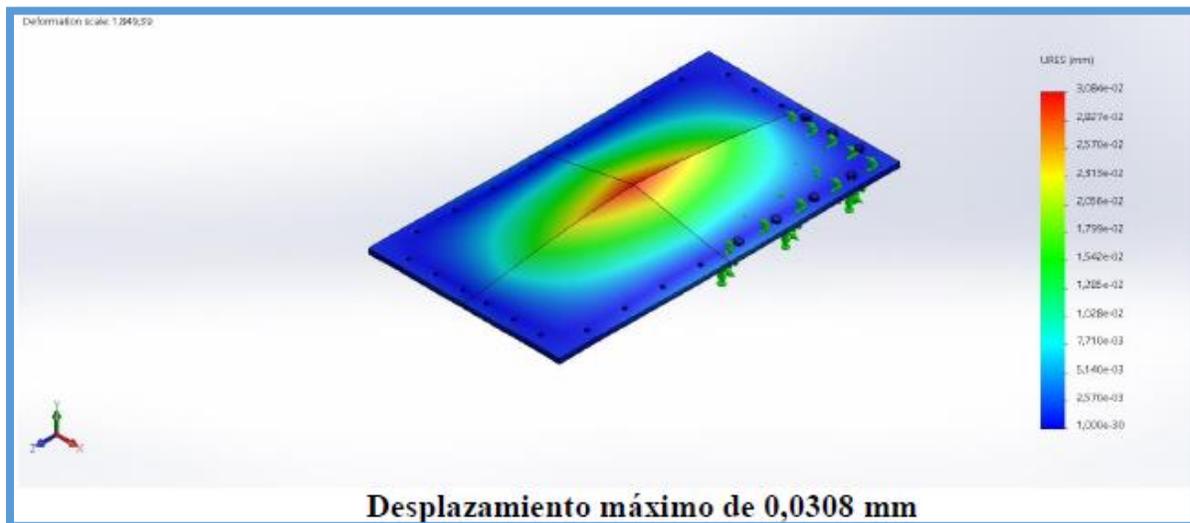
**Tabla 8.** Mas información -Resultados detallados de la tapa del MANHOLE.

|   |  |          |
|---|--|----------|
|  | <b>Total Nodes</b>                             | 32783    |
|   | <b>Total Elements</b>                          | 16063    |
|   | <b>Maximum Aspect Ratio</b>                    | 7,5746   |
|   | <b>% of elements with Aspect Ratio &lt; 3</b>  | 97,9     |
|   | <b>% of elements with Aspect Ratio &gt; 10</b> | 0        |
|   | <b>% of distorted elements(Jacobian)</b>       | 0        |
|   | <b>Time to complete mesh(hh:mm:ss):</b>        | 00:00:02 |
|   | <b>Computer name:</b>                          |          |

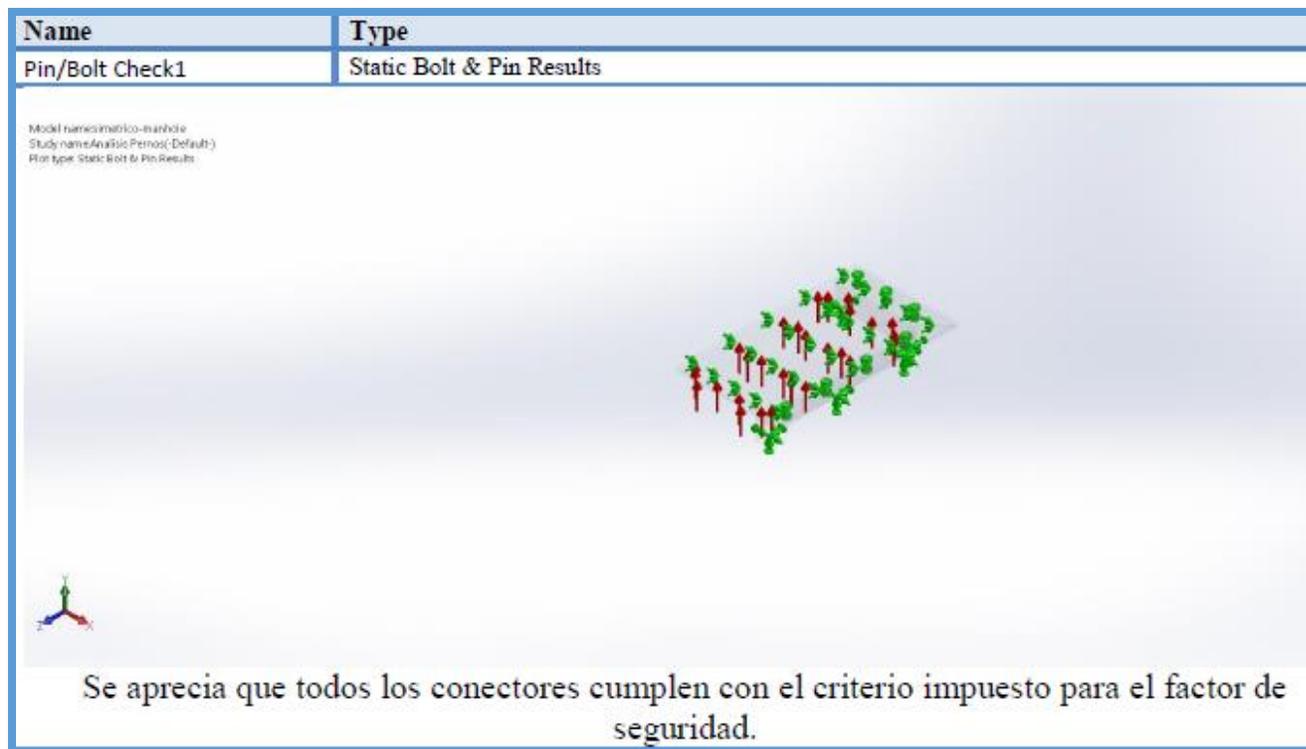
Resultados: En las siguientes gráficas se representó de forma visual los resultados de esfuerzos, desplazamientos y conectores(pernos) respectivamente.



**Figura 19.** Resultado del Esfuerzo de Von Mises Stress del MANHOLE.



**Figura 20.** Resultado del desplazamiento del MANHOLE.



**Figura 21.** Resultado del factor de seguridad del MANHOLE.

**5.1.2 Diagnóstico del análisis para el diseño del MANHOLE.** Según lo analizado anteriormente, se pudo demostrar que las dimensiones y materiales son apropiados para el diseño del MANHOLE al exhibir esfuerzos bajos tanto en la platina como en los pernos esto se encontraba dentro del rango de lo esperado dado que las condiciones de carga a las que se espera se someta el componente son bajas y los esfuerzos generados se encuentran muy por debajo de la resistencia de los materiales.

### **5.1.3. Costos implementación de los MANHOLES.**

#### **Materiales**

En la siguiente tabla se muestra las cantidades de los materiales y el valor que conllevaría la implementación de los MANHOLES en los 3 ductos de los cabezales de entrada de la pared cortina.

**Tabla 9.** Presupuesto para el diseño de MANHOLES.

|   | Precio unidad | Cantidad material | Unidad | total            |
|---|---------------|-------------------|--------|------------------|
| Angulos (2x2x1/4")                          | 24.900        | 6m                | mts    | 124.500          |
| Pernos (12mm x 15mm)                        | 3.300         | 252               | und    | 831.600          |
| Platina A36                                 | 726.000       | 6                 | m2     | 4.356.000        |
| Aislamiento (Lana mineral, lamina aluminio) | 280.000       | 8                 | m2     | 2.240.000        |
| Soldadura (7018)                            | 18.000        | 9                 | kg     | 162.000          |
| Consumibles (Discos corte, discos desbaste, | 12.600        | 20                | und    | 252.000          |
| <b>Valor total:</b>                         |               |                   |        | <b>7.965.500</b> |

Alquiler de equipos

Al valor anterior se le debe agregar el valor de los equipos que se requieren para la solución del problema y la mano de obra que conllevaría la implementación del MANHOLE en los 3 ductos de los cabezales de entrada de la pared cortina.

**Tabla 10.** Presupuesto del alquiler de equipos para el diseño del MANHOLE.

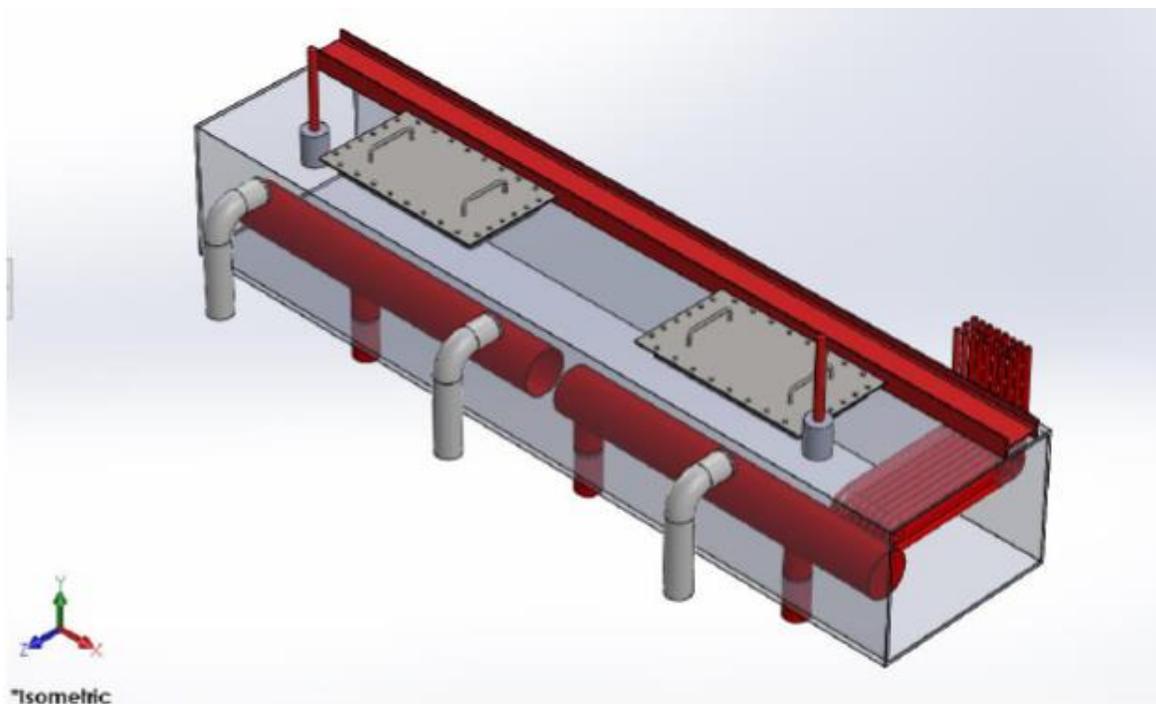
|                     | Precio  | Cantidad equipos | Cantidad dias | total            |
|---------------------|---------|------------------|---------------|------------------|
| Equipo soldadura    | 475.000 | 2                | 15            | 950.000          |
| Pulidoras           | 285.000 | 3                | 15            | 855.000          |
| Arnes               | 349.000 | 4                | 15            | 1.396.000        |
| Taladro             | 269.000 | 1                | 8             | 269.000          |
| Arnes               | 349.000 | 2                | 8             | 698.000          |
| <b>Valor total:</b> |         |                  |               | <b>4.168.000</b> |

**Tabla 11.** Presupuesto de la mano de obra para el diseño del MANHOLE.

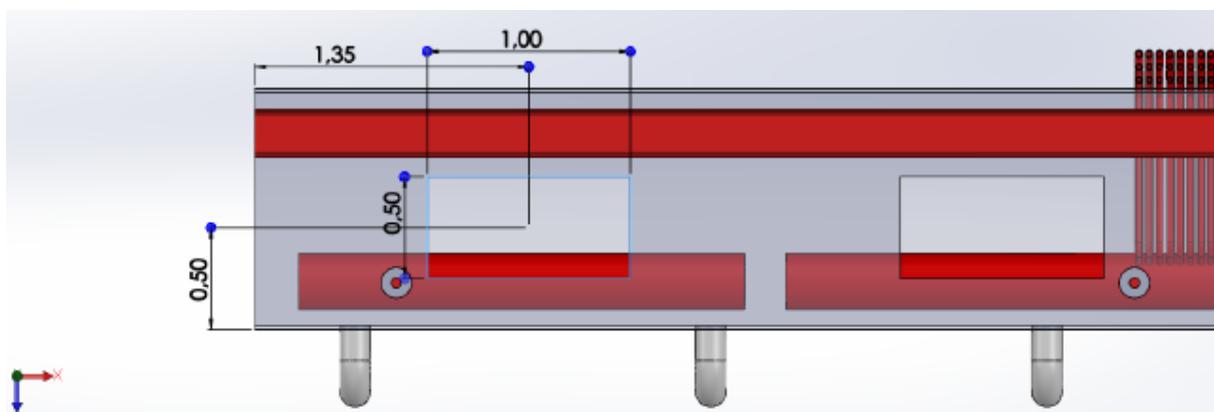
|                     | Precio Dia | Cantidad Personal | Duracion trabajo | total            |
|---------------------|------------|-------------------|------------------|------------------|
| Soldadores          | 120.000    | 2                 | 15               | 3.600.000        |
| Auxiliar soldadura  | 80.000     | 2                 | 15               | 2.400.000        |
| Aisladores          | 170.000    | 2                 | 8                | 2.720.000        |
| <b>Valor total:</b> |            |                   |                  | <b>8.720.000</b> |

Proyección final de las cajas de viento con MANHOLE.

A continuación, se presentan renderizados de los modelos 3D del MANHOLE adaptado a las cajas para una mejor perspectiva de los resultados de esta alternativa.



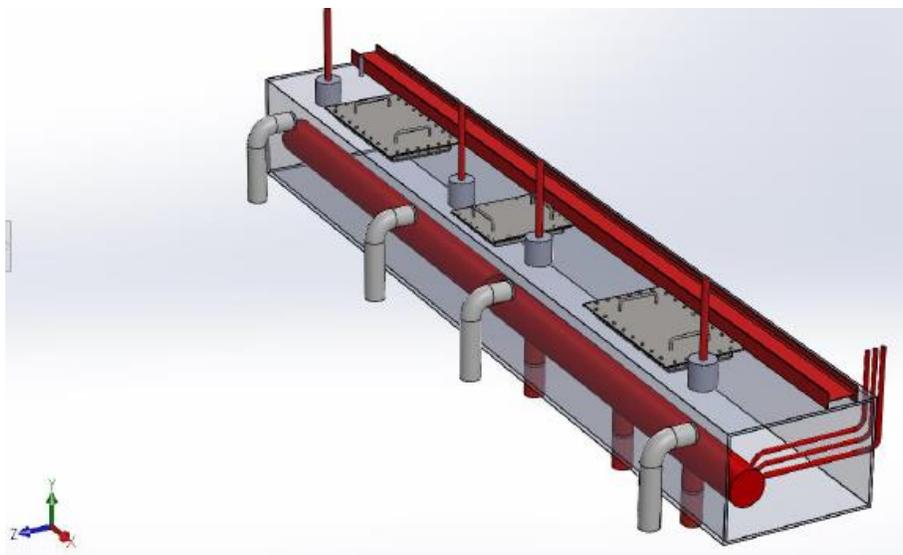
**Figura 22.** Vista de techo caja norte del MANHOLE.



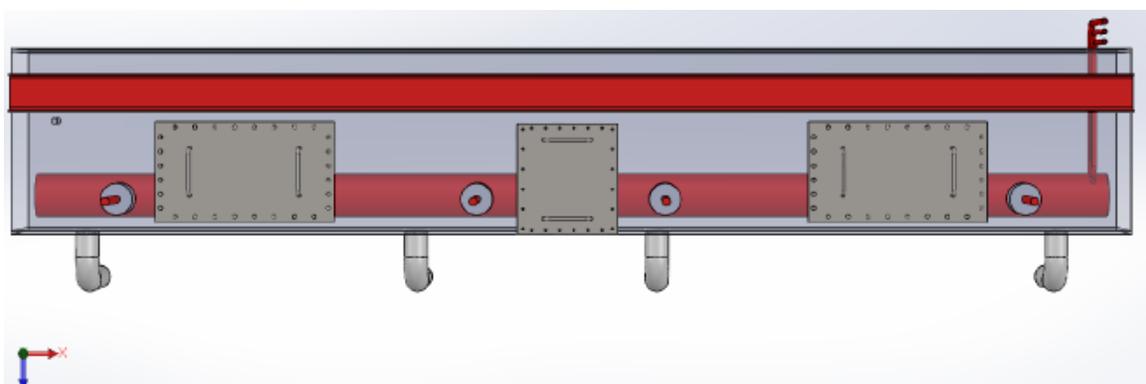
**Figura 23.** Vista isométrica caja norte del MANHOLE.

Caja frontal con MANHOLES

Después del análisis se vio que debido al tamaño de la caja de aire frontal era necesario incluir un tercer MANHOLES en el centro de la caja para que permitiera la inspección de toda la caja.



**Figura 24.** Vista isométrica del MANHOLE.



**Figura 25.** Vista techo caja frontal del MANHOLE.

## 5.2 Evaluación alternativa del Ventilador con calentador

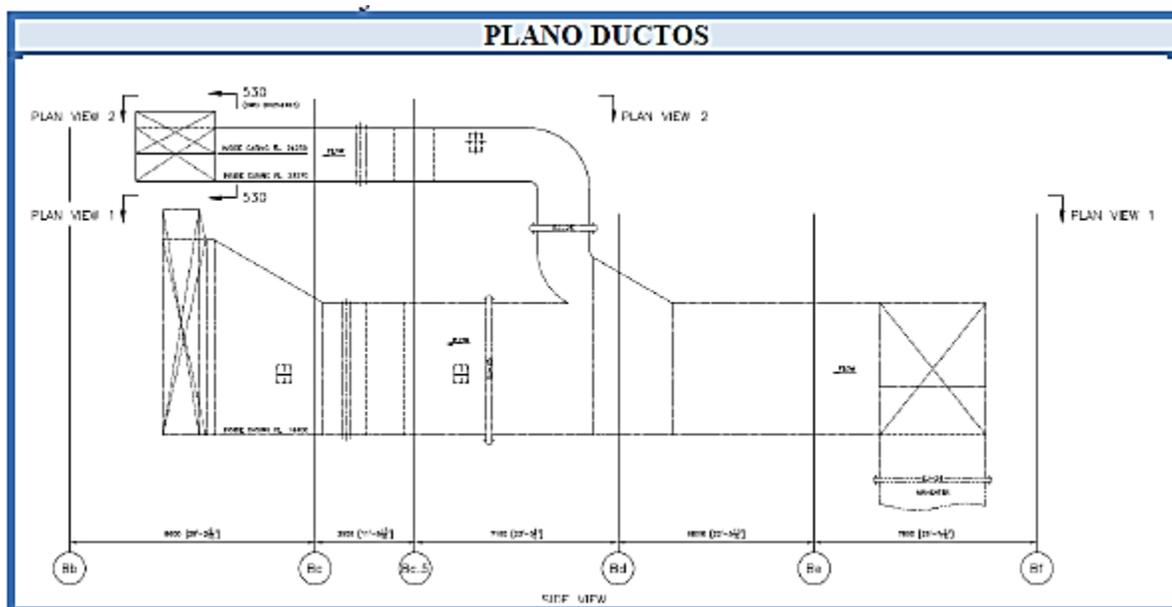
Un ventilador con calentador está diseñado para calentar aire recirculado en todas las localizaciones o ductos, y así regular la temperatura.

Recolección de información y cálculos preliminares

Con el propósito de analizar la alternativa correspondiente al ventilador con calentador y al separador de partículas ciclónico, fue necesario contar con el flujo de aire que sale del WINDBOX

hacia las cajas de aire de sello, para ello se recolectaron datos de temperaturas y presiones en la sala de mandos.

Para determinar el flujo de aire de sello que llega al WINDBOX se realizó una simulación de un modelo 3D preparado con los planos de estos ductos



**Figura 26.** Determinación del flujo NOX del separador ciclónico.

Se proporcionaron los siguientes datos de flujo másico en la entrada y presiones en las salidas, y se convirtieron a unidades más apropiadas para realizar los cálculos

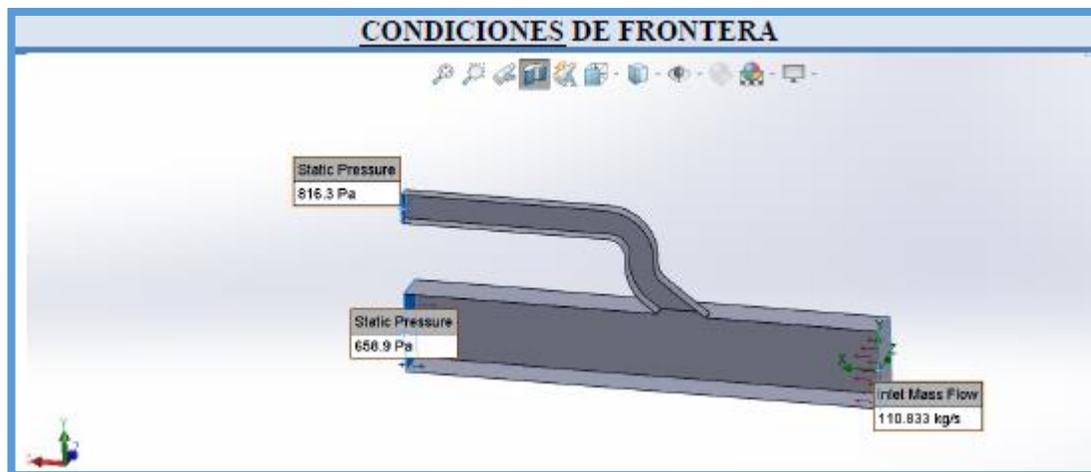
Temperatura:  $326^{\circ}\text{C} \approx 600\text{K}$

$$\text{Flujo másico: } 399 \frac{\text{MT}}{\text{hora}} \times \frac{1 \text{ horas}}{3600 \text{ s}} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ MT}} = 110.833 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\text{Presión salida NOX: } 83 \text{ mmH}_2\text{O} \times \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} \times \frac{101.3 \text{ kpa}}{10.3 \text{ mH}_2\text{O}} = 816.3 \text{ Pa}$$

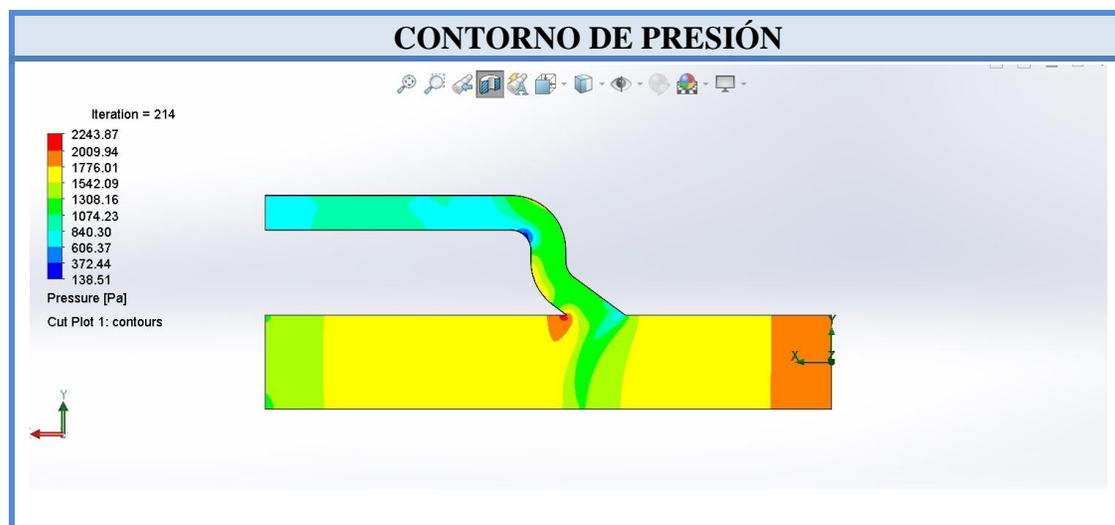
$$\text{Presión salida caldera: } 67 \text{ mmH}_2\text{O} \times \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} \times \frac{101.3 \text{ kpa}}{10.3 \text{ mH}_2\text{O}} = 658.9 \text{ Pa}$$

Los datos anteriores son las condiciones de frontera para el análisis computacional que permite obtener los flujos en cada una de las salidas.



**Figura 27.** Condiciones de frontera para el análisis del ventilador con calentador.

Obteniendo el siguiente resultado en el contorno de presiones.



**Figura 28.** Resultado en el contorno de presiones del ventilador con calentador.

En la siguiente tabla se muestran los flujos para ambas salidas, con esta información se analizó la alternativa del ventilador con calentador y el separador de partículas ciclónico.

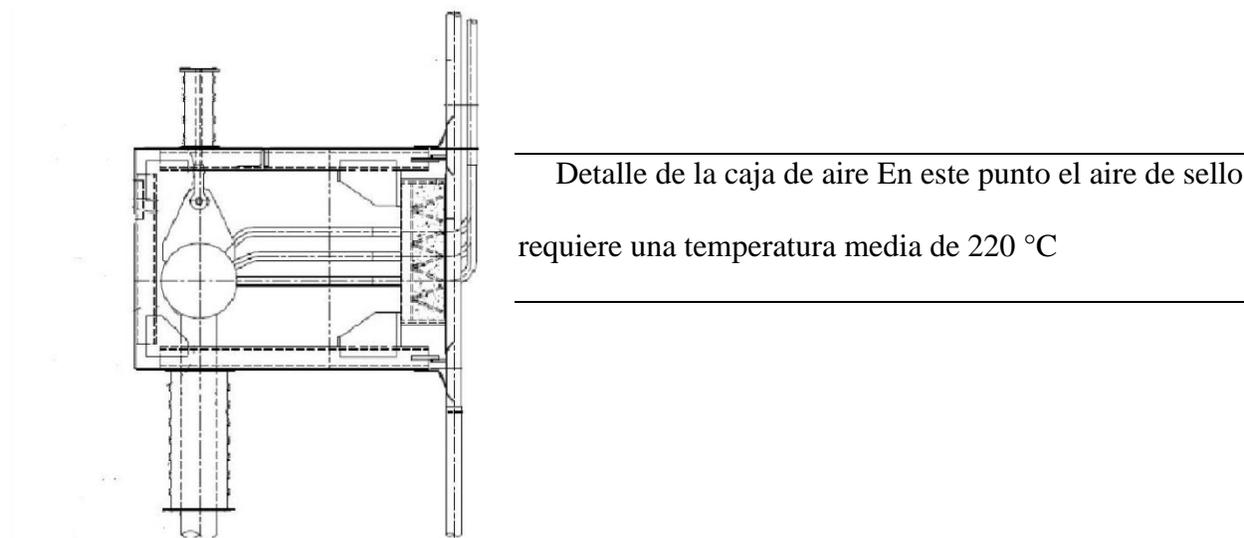
**Tabla 12.** Flujos para ambas salidas del ventilador con calentador.

| Goal Name            | Unit    | Value   | Progress [%] | Use In Convergence |
|----------------------|---------|---------|--------------|--------------------|
| FLUJO MASICO NOX     | [kg/s]  | -12,16  | 100          | Yes                |
| FLUJO MASICO CALDERA | [kg/s]  | -98,67  | 100          | Yes                |
| NOX Ton/H            | [MT/HR] | -43,77  | 100          | Yes                |
| CALDERA Ton/H        | [MT/HR] | -355,23 | 100          | Yes                |
| TOTAL                | [MT/HR] | -399,73 | 100          | Yes                |

**5.2.1. Evaluación técnica de alternativa ventilador con calentador.** Se analizó el ventilador con calentador junto al WINDBOX, esta toma el aire atmosférico y lo lleve hacia las cajas de aire libre de ceniza esto con el objeto de sellar el WINDBOX para que no pase aire con la ceniza que es la causante de la erosión en los tubos de la pared cortina.

#### Consideraciones

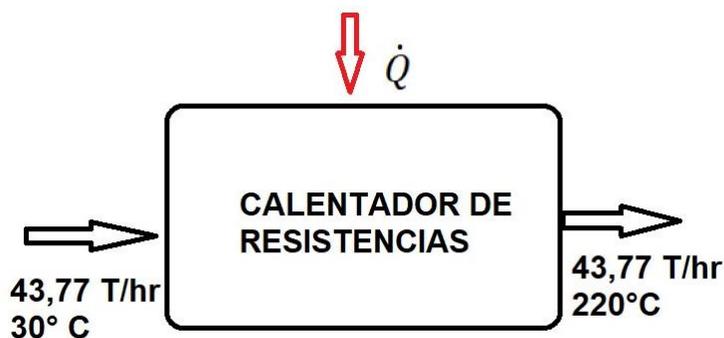
En la siguiente figura se presentan los parámetros importantes para realizar los cálculos.

**Figura 29.** Detalle de la caja de aire

### Cálculo de la carga térmica

Como el aire que se va a llevar a la caja de viento se toma de la atmosfera requiere de un calentamiento para evitar un choque térmico al momento de entrar a la caja de aire de sello. La temperatura a la cual debe calentarse fue reportada por sala de mandos y corresponde a un valor promedio de 220°C.

El otro parámetro importante para el análisis es el flujo másico de aire es el NOX con un valor de 43,77 Ton/HR, el cual fue encontrado en el análisis preliminar que se hizo sobre el ducto. En la siguiente figura se puede visualizar lo anterior.



**Figura 30. Calentador de resistencias**

**5.2.2. Diagnóstico del análisis para el diseño del Ventilador con calentador.** Se tomó el calentador como volumen de control y con la siguiente ecuación de conservación de la energía para un sistema estacionario:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}_s \left( h + \frac{v^2}{2g} + z \right) - \dot{m}_e \left( h + \frac{v^2}{2g} + z \right)$$

$$\dot{m}_s = \dot{m}_e \quad h = cp(T)$$

Reordenando los términos obtenemos una expresión para el cálculo de la potencia del calentador:

$$\dot{Q} = \dot{m}_e \times cp \times (T_s - T_e)$$

Donde:

$$\dot{m}_e = 43.77 \times 10^3 \frac{kg}{h} \times \frac{1h}{3600s} = 12.16 \frac{kg}{s}$$

Temperatura promedio:  $T_p = \frac{220+30}{2} = 125^\circ\text{C} \approx 400k$

El valor del calor específico  $cp = 1.014 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ\text{C}}$ , tomado de Fundamentos de transferencia de calor; Incropera y DeWitt.

Reemplazando valores:

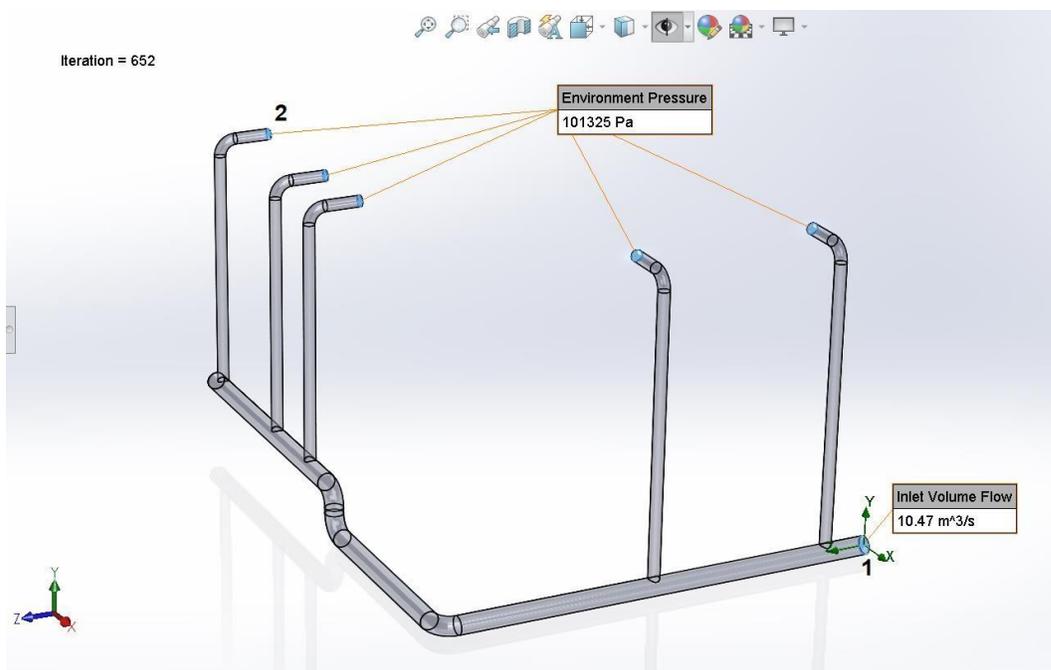
$$\dot{Q} = 12.16 \frac{kg}{s} \times 1.014 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ\text{C}} \times (220 - 30)^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q} = 2342.75 \text{ kW}$$

Se obtuvo que el valor de la carga térmica para calentar el aire a la temperatura requerida corresponde aproximadamente a 2,34 megavatios.

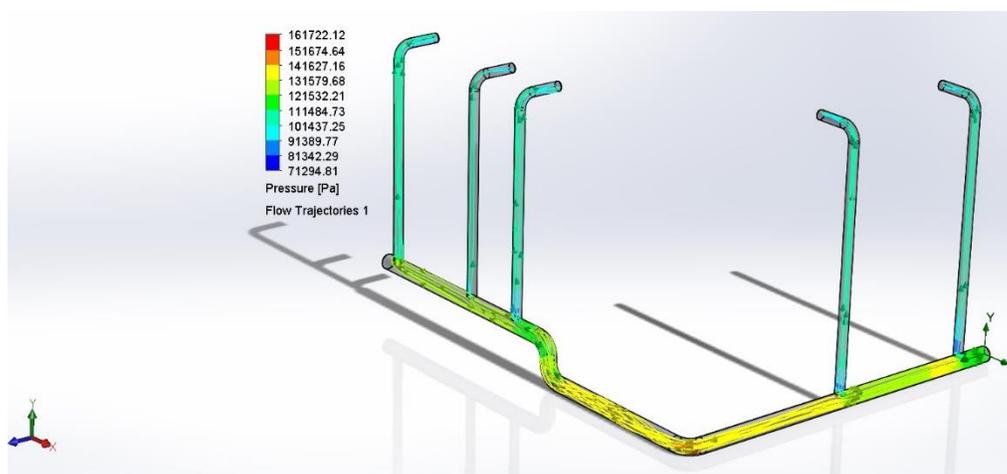
Potencia del ventilador

Para el cálculo de la potencia del ventilador fue necesario conocer la caída de presión en los ductos de las cajas de aire para ello se buscaron los planos y se llevó a un modelo 3D, donde se simuló el flujo encontrado en el análisis del ducto NOX y se tuvo como objetivo hallar la diferencia de presiones en la entrada al ramal y el punto más alejado como se ve en la siguiente imagen



**Figura 31.** Bosquejo en 3D de los ductos de las cajas de aire.

En el resultado para obtener la diferencia de presión se estableció como condición de frontera una presión de referencia atmosférica de 101325 Pa y se fijó una ecuación para el cálculo de la presión 1 menos la presión 2 obteniendo los siguientes resultados:



**Figura 32.** Resultado de las presiones en de los ductos de las cajas de aire.

**Tabla 13.** Valores de los resultados de las presiones en de los ductos de las cajas de aire.

| Goal Name | Unit | Value     | Progress [%] | Use In Convergence |
|-----------|------|-----------|--------------|--------------------|
| P2        | [Pa] | 101325    | 100          | Yes                |
| P1        | [Pa] | 118368,82 | 100          | Yes                |
| DELTA P12 | [Pa] | 17043,82  | 100          | Yes                |

Se puede visualizar de la anterior figura y tabla que con el valor de 17043,82 Pa se representa la diferencia de presión en la ruta crítica podemos obtener la potencia del ventilador mediante la siguiente formula:

$$\dot{W} = \dot{V} \times \Delta P$$

Donde,  $\dot{V}$  es el caudal total que maneja el ventilador cuyo valor encontrado en el análisis previo del NOX corresponde a  $12.16 \frac{kg}{s}$  debemos calcular el flujo volumétrico para ello empleamos la relación  $\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho}$ , donde  $\rho$  es la densidad del aire a 400K.

El valor de  $\rho = 0.8711 \frac{kg}{m^3}$  tomado de Fundamentos de transferencia de calor; Incropera y DeWitt. Luego,

$$\dot{V} = \frac{12.16 \frac{kg}{s}}{0.8711 \frac{kg}{m^3}} = 13.96 \frac{m^3}{s}$$

y  $\Delta P$  la caída de presión entre la entrada del ventilador y el punto 2; reemplazando valores obtenemos la potencia del ventilador.

$$\dot{W} = 13.96 \frac{m^3}{s} \times 17043,82 \text{ Pa} = 237.93 \text{ kW}$$

$$\dot{W} = 237.93 \text{ kW}$$

En este punto se procedió a realizar una consulta con el ingeniero eléctrico y se visitó el nivel 8 para inspeccionar cual sería el lugar más adecuado para instalar el ventilador y calentador de

resistencias. Llegando a la conclusión de que en el lugar no era posible la instalación de dichos equipos esto debido a la gran demanda de potencia por parte del calentador, potencia que supera por mucho la disponibilidad, pues las instalaciones actuales no son capaces de entregar dicha potencia y se requeriría de un proyecto aparte para instalar sistemas de media tensión que puedan con la demanda de estos equipos.

**5.2.3. Costos de implementación del Ventilador con calentador.** Cabe resaltar que para esta alternativa es el costo de operación del sistema lo que representa una disminución importante en la capacidad de servicio de la planta y no tendría nunca un periodo de devolución de la inversión, pues cada hora que esté en funcionamiento sería un gasto continuo aparte de los gastos que implica adquirir equipos de estas dimensiones, así como la instalación y mantenimiento de nuevas redes de alimentación eléctrica para poderlos operar.

Para el estudio, se tomó la potencia del calentador y la potencia también carga térmica ( $\dot{Q}$ ) del ventilador o (no se ha tenido en cuenta las pérdidas que se producen debido al paso del aire por el calentador) obtenemos la siguiente potencia para la operación.

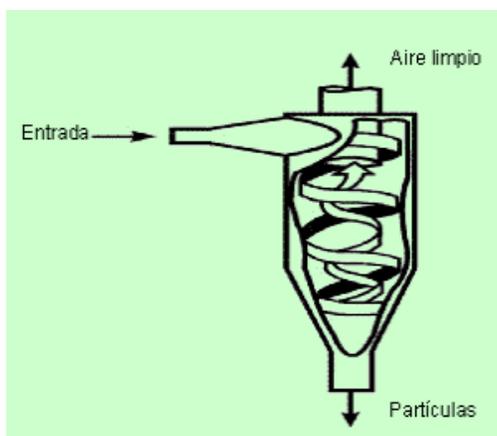
$$\dot{W} = 2342.75kW + 237.93kW = 2581 \text{ kW}$$

$$\dot{W} = 2.581 \text{ MW}$$

Al valor anterior se le sumo la perdida de presión debida al calentador y también la ineficiencia de este; resultando la potencia total de operación en un valor rodeado y comercial de 3 MW, si se toma el precio del megavatio hora en 500.000 pesos cada hora de operación de los equipos costaría 1,5 millones que en un año de 130 días de operación de la planta resultarían en 4680 millones de pesos, lo cual es mucho más costoso que el mantenimiento correctivo de cambiar los tubos que se vayan erosionando;

### 5.3. Evaluación alternativa del separador ciclónico

El separador ciclónico, también conocido como ciclones industriales, son un sistema que depura partículas mediante el uso de la fuerza centrífuga que, en vez de gravitatorias, la velocidad de sedimentación de las partículas se incrementa en gran medida haciéndose más efectiva la separación. Este está compuesto básicamente por un cilindro vertical con fondo cónico, dotado de una entrada tangencial normalmente rectangular. Como se puede visualizar en la siguiente figura.



**Figura 33.** Separador ciclónico.

Fuente: (Diquima, 2022)

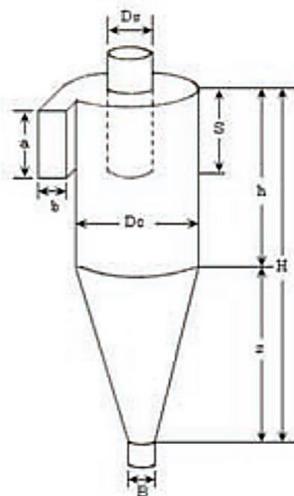
Se analiza un separador ciclónico para hacer pasar por éste, el flujo que sale del WINDBOX que se ha reportado contiene partículas de ceniza. De esta manera el flujo de aire de sello llegaría a las cajas de viento libre de la ceniza que está causando la erosión de los tubos de la pared cortina de la caldera. Para proceder con esta evaluación primero se hizo una búsqueda bibliográfica de la aplicación de separadores ciclónicos encontrando algunos trabajos que tenían como referencia común una publicación con el nombre DISEÑO ÓPTIMO DE CICLONES, por parte de un autor Carlos Alberto Echeverri Londoño. Esta publicación se tomó como referente para el diseño del separador ciclónico que aquí presentamos.

**5.3.1. Evaluación alternativa técnica del separador ciclónico.** En la siguiente tabla se muestran las relaciones de los parámetros geométricos que constituyen las dimensiones del ciclón en relación al diámetro del mismo, que el autor toma como parámetro principal.

**Tabla 14.** Características de los ciclones de alta capacidad.

| Dimensión                   | Nomenclatura | Tipo de ciclón |       |
|-----------------------------|--------------|----------------|-------|
|                             |              | Stairmand      | Swift |
| Diámetro del ciclón         | $D_c/D_c$    | 1.0            | 1.0   |
| Altura de entrada           | $a/D_c$      | 0.75           | 0.8   |
| Ancho de entrada            | $b/D_c$      | 0.375          | 0.35  |
| Altura de salida            | $S/D_c$      | 0.875          | 0.85  |
| Diámetro de salida          | $D_s/D_c$    | 0.75           | 0.75  |
| Altura parte cilíndrica     | $h/D_c$      | 1.5            | 1.7   |
| Altura parte cónica         | $z/D_c$      | 2.5            | 2.0   |
| Altura total del ciclón     | $H/D_c$      | 4.0            | 3.7   |
| Diámetro salida partículas  | $B/D_c$      | 0.375          | 0.4   |
| Factor de configuración     | $G$          | 29.79          | 30.48 |
| Número cabezas de velocidad | $NH$         | 8.0            | 7.96  |
| Número de vórtices          | $N$          | 3.7            | 3.4   |

En la siguiente figura se representan las medidas correspondientes a cada sección del ciclón



**Figura 34.** Dimensiones del ciclón.

Se realizó, una hoja de cálculo en Excel e introducir los datos como caudal y velocidad de entrada y propiedades del aire y partículas obteniendo las dimensiones del ciclón para el de tipo

Stairmand y el de tipo Swift, los cuales son ciclones de alta capacidad con eficiencias de remoción del 90% en partículas de más de 20 micras con la ventaja de ser ciclones más compactos.

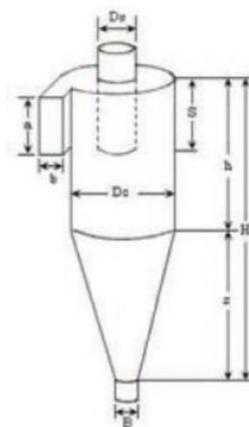
Flujo del ciclón; para este cálculo usamos el flujo másico encontrado de  $12.16 \frac{kg}{s}$  y una densidad, evaluada a una temperatura de 600 K cuyo valor es de  $0.5804 \frac{kg}{m^3}$ .

$$\dot{V} = \frac{12.16 \frac{kg}{s}}{0.5804 \frac{kg}{m^3}} = 20.95 \frac{m^3}{s}$$

Con este flujo y tomando una velocidad de entrada promedio al ciclón recomendada de 22 m/s, se obtuvo los siguientes resultados.

**Tabla 15.** Resultados de las dimensiones del ciclón.

| DATOS DE ENTRADA |  | DIMENSIONES DEL CICLÓN |                              |                  |
|------------------|--|------------------------|------------------------------|------------------|
|                  |  |                        | STAIRMAND                    | SWIFT            |
| 1                | CAUDAL (m <sup>3</sup> /s)                 | 20,95                  |                              |                  |
| 2                | VELOCIDAD (m/s)                            | 22                     |                              |                  |
| 3                | Temperatura (K)                            | 600                    | DIÁMETRO DEL CICLÓN          | 2,254 1,84       |
| 4                | Densidad Aire (kg/m <sup>3</sup> )         | 0,5804                 | ALTURA DE ENTRADA            | 1,127 1,48       |
| 5                | Viscosidad dinámica (Pa*s)                 | 3,058E-05              | ANCHO DE ENTRADA             | 0,845 0,65       |
| 6                | Densidad (partículas) (kg/m <sup>3</sup> ) | 890                    | ALTURA DE SALIDA             | 1,972 1,57       |
| 7                |  |                        | DIÁMETRO DE SALIDA (aire)    | 1,690 1,38       |
| 8                |  |                        | ALTURA CILINDRO              | 3,380 3,14       |
| 9                |  |                        | ALTURA CONO                  | 5,634 3,69       |
| 10               |  |                        | ALTURA TOTAL                 | 9,014 6,82       |
| 11               |  |                        | DIÁMETRO SALIDA (partículas) | 0,845 0,74       |
| 12               | Velocidad equivalente                      | 1,018008476            | FACTOR CONFIGURACIÓN         | 29,790 30,48     |
| 13               |  |                        | NÚMERO CABEZAS VELOCIDAD     | 5,333 7,96       |
| 14               |  |                        | NÚMERO VÓRTICES              | 3,700 3,40       |
| 15               |  |                        | Kb (b/Dc)                    | 0,375 0,35       |
| 16               |  |                        | Ka (a/Dc)                    | 0,500 0,80       |
| 17               |  |                        | VELOCIDAD SALTACIÓN          | 32,760 31,035    |
| 18               |  |                        | RELACIÓN VELOCIDADES         | 0,672 0,709      |
| 19               |  |                        | CAIDA PRESIÓN (Pa)           | 749,103 1118,660 |
| 20               |  |                        |                              |                  |
| 21               |  |                        |                              |                  |
| 22               |  |                        |                              |                  |

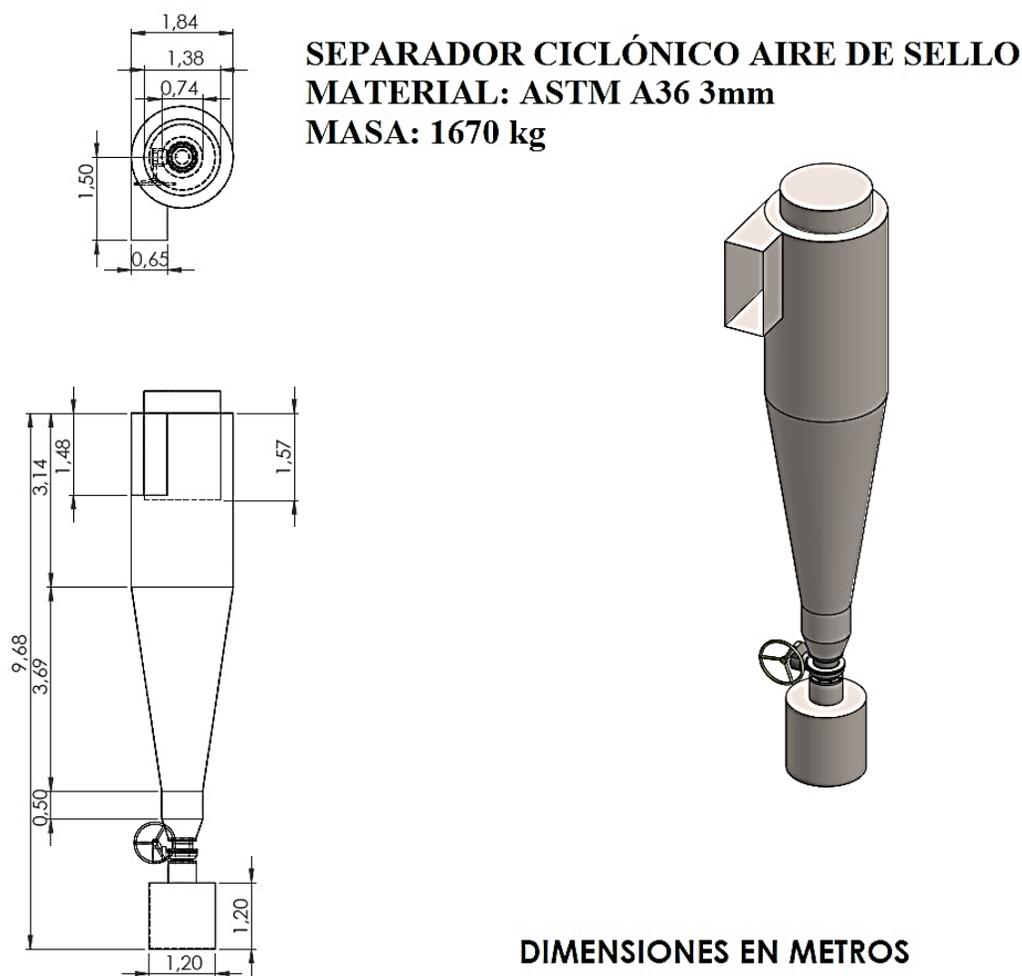


De la tabla anterior se tomaron las medidas correspondientes al ciclón tipo Swift por ser el más compacto dadas las limitaciones de espacio en los alrededores del “WINDBOX”,

### Modelo 3D

Con las dimensiones obtenidas de la tabla anterior se modelo el separador ciclónico en software CAD (Diseño Asistido por Computadora), al cual se le añadieron algunos detalles que complementaran el diseño como lo es un depósito donde se pueda acumular la ceniza atrapada, así como una válvula de compuerta para poder realizar el vaciado de la ceniza periódicamente sin interrumpir la operación de la planta.

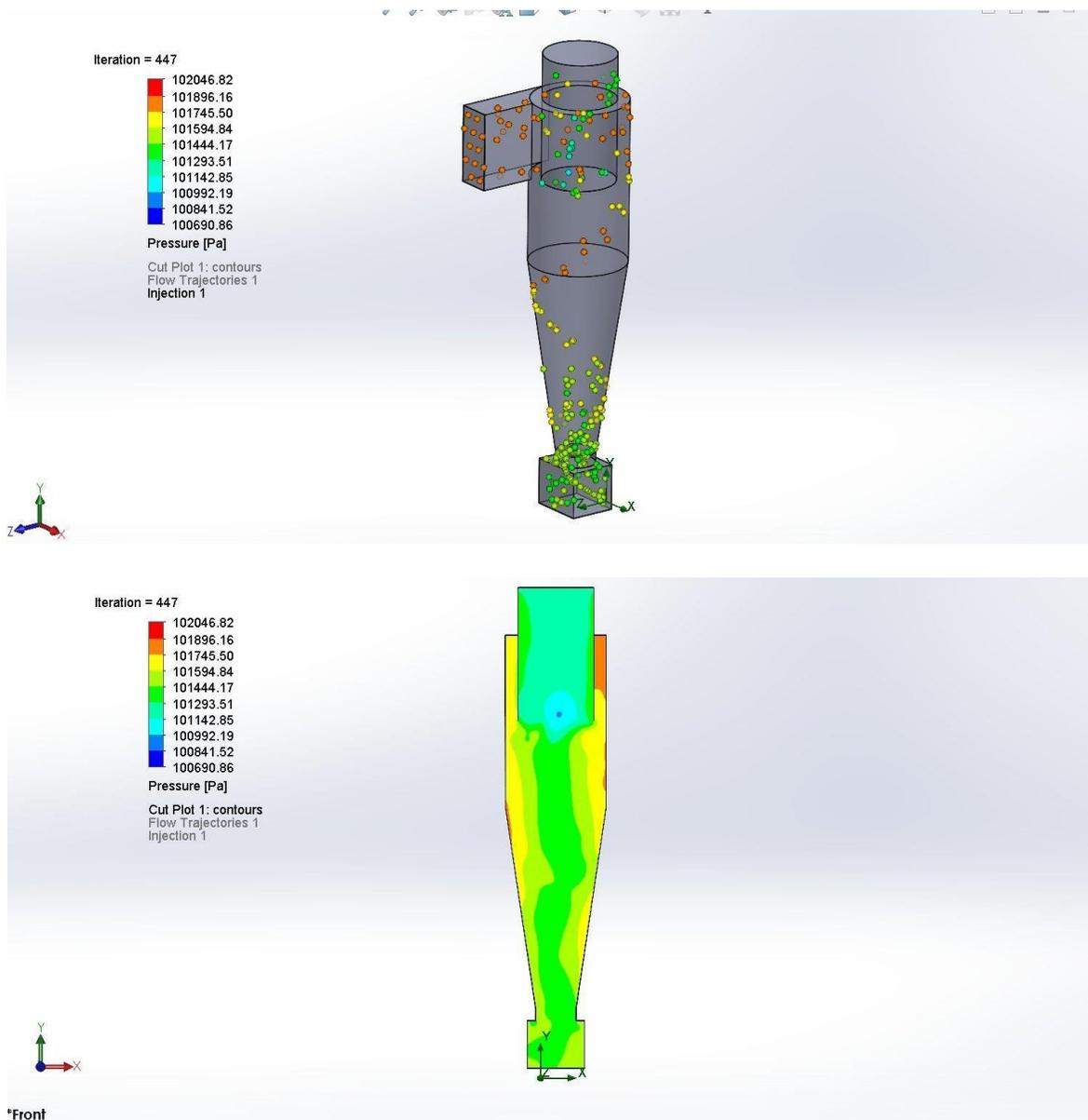
A continuación, se muestra el plano del diseño con las dimensiones y material correspondiente.



**Figura 35.** Figura del separador ciclónico de aire.

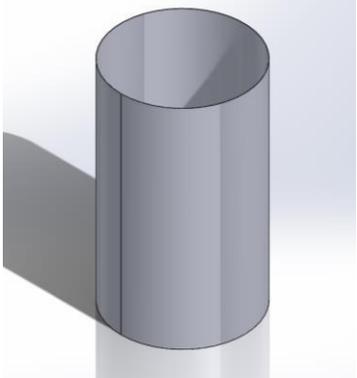
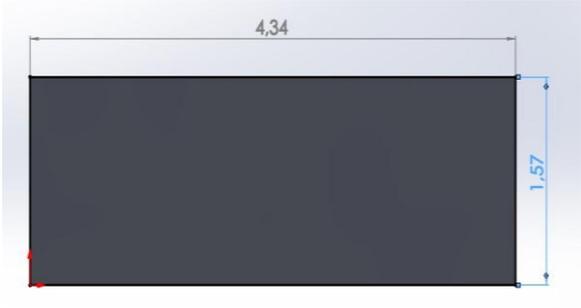
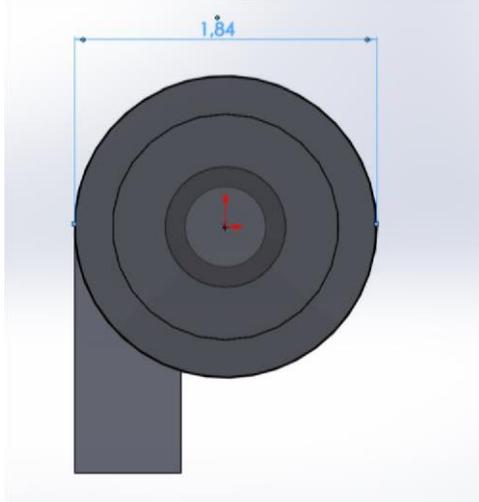
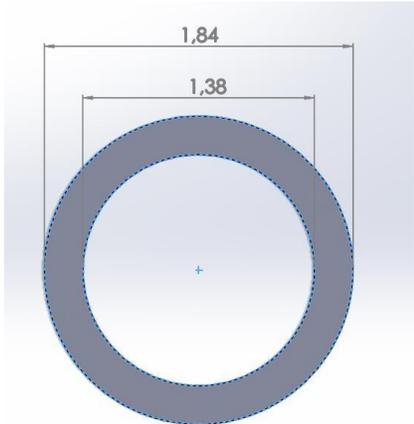
**5.3.2. Diagnóstico del análisis para el diseño del separador ciclónico de aire.** A continuación, se puede visualizar algunos resultados de un análisis preliminar mediante técnicas CFD (dinámica de fluidos computacional) realizado sobre el modelo para unas condiciones de operación estacionarias; un flujo de  $20.95 \frac{m^3}{s}$  a temperatura de  $600 K$ .

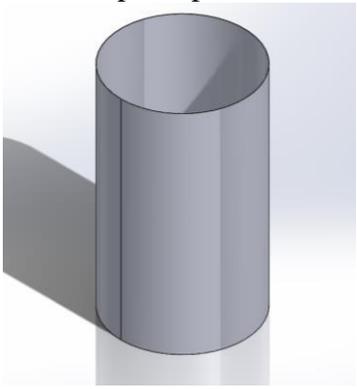
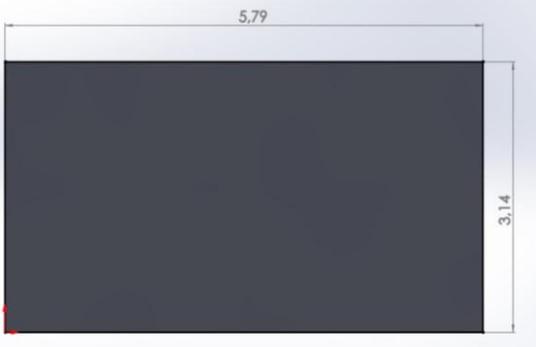
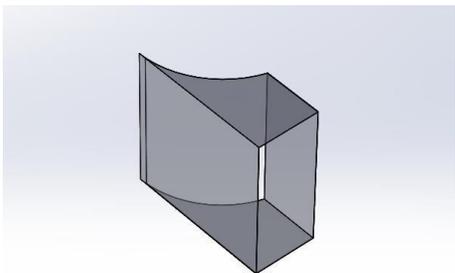
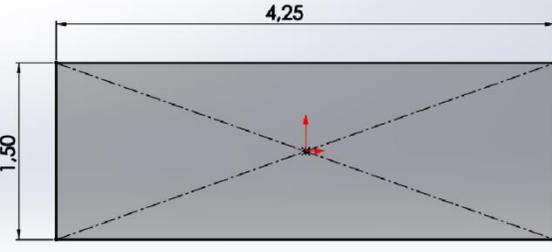
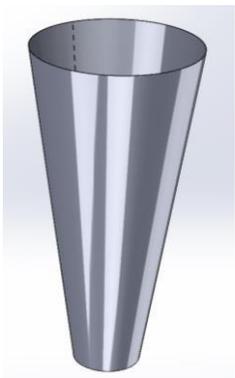
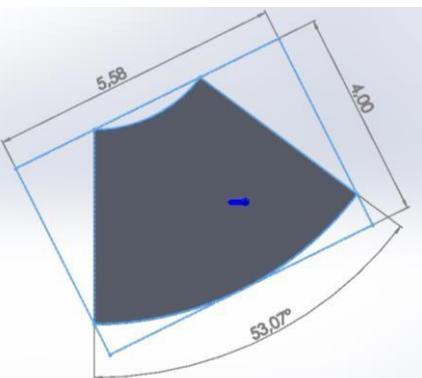
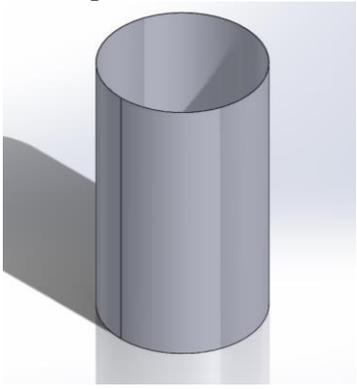
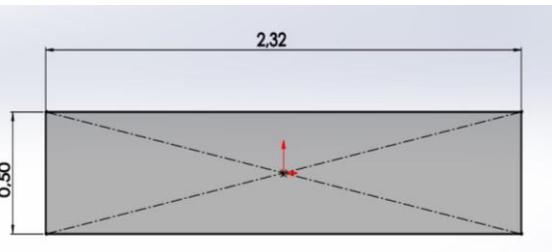
Trayectorias de Inyección de partículas (20 micrómetros).

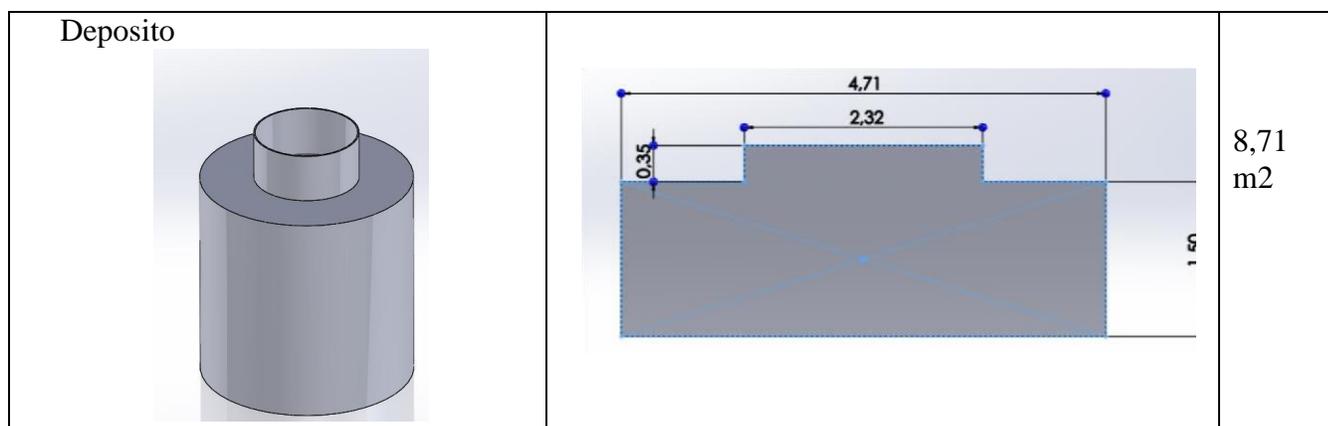


**Figura 36.** Contornos de Presión en plano medio del ciclón.

**5.3.3 Costos de implementación para el separador ciclónico.** En la siguiente tabla se muestra detalladamente las secciones necesarias para construcción del ciclón y el área de estas para su coste.

| SECCION DEL CICLÓN   |  | AREA       |
|--|--|------------|
| <p>Salida aire</p>     |    | 6,82<br>m2 |
| <p>Tapa superior</p>  |  | 3,39<br>m2 |

|  |  |                                |
|--|--|--------------------------------|
| <p>Cilindro principal</p>   |    | <p>18,18<br/>m<sup>2</sup></p> |
| <p>Entrada al ciclón</p>    |    | <p>6,38<br/>m<sup>2</sup></p>  |
| <p>Sección cónica</p>     |  | <p>22,32<br/>m<sup>2</sup></p> |
| <p>Salida partículas</p>  |  | <p>1,16<br/>m<sup>2</sup></p>  |



**Tabla 16.** Presupuesto de la mano de obra para separador ciclónico de aire.

|                     | Precio Dia | Cantidad Personal | Duración trabajo | Total                |
|---------------------|------------|-------------------|------------------|----------------------|
| Soldadores          | 120.000    | 2                 | 15 día           | 3.600.000            |
| Auxiliar soldadura  | 80.000     | 2                 | 15 día           | 2.400.000            |
| Aisladores          | 170.000    | 2                 | 8 día            | 2.720.000            |
| Doblador de Lamina  | 100.000    | 2                 | 15 día           | 3.000.00             |
| <b>Valor total:</b> |            |                   |                  | <b>\$ 11.720.000</b> |

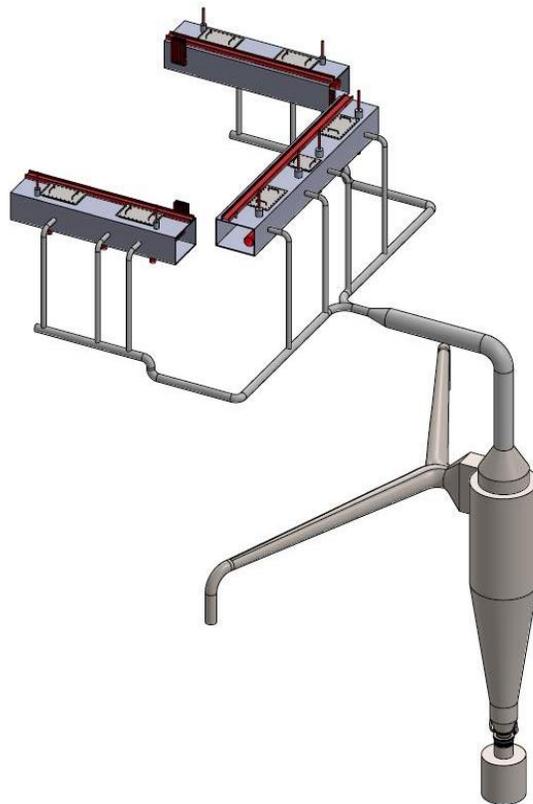
**Tabla 17.** Presupuesto del alquiler de equipos para separador ciclónico de aire.

|                     | Precio    | Cantidad equipos | Cantidad días | Total                |
|---------------------|-----------|------------------|---------------|----------------------|
| Equipo soldadura    | 475.000   | 2                | 15            | 950.000              |
| Pulidoras           | 285.000   | 3                | 15            | 855.000              |
| Arnes               | 349.000   | 4                | 15            | 1.396.000            |
| Taladro             | 269.000   | 1                | 8             | 269.000              |
| Arnes               | 349.000   | 2                | 8             | 698.000              |
| Equipo Dobladora    | 7.855.000 | 1                |               | 7.855.000            |
| <b>Valor total:</b> |           |                  |               | <b>\$ 12.023.000</b> |

**Tabla 18.** Presupuesto de materiales de construcción para separador ciclónico de aire.

|   | Precio unidad | Cantidad | Unidad | Total                |
|---|---------------|----------|--------|----------------------|
| Angulos (3 x 3/8)                           | 51.800        | 10       | mts    | 518.000              |
| Pernos (12mm x 15mm)                        | 3.300         | 150      | und    | 495.000              |
| Lamina de A36 (3mm)                         | 726.000       | 67       | m2     | 48.642.000           |
| Aislamiento (Lana mineral, lamina aluminio) | 280.000       | 49       | m2     | 13.720.000           |
| Soldadura (7018)                            | 18.000        | 40       | kg     | 720.000              |
| Consumibles (Discos corte, discos desbaste, | 12.600        | 40       | und    | 504.000              |
| Válvula Mariposa 15"                        | 2.550.000     | 1        | unid   | 2.550.000            |
| Tubería 12" SCH40                           | 479.000       | 26       | mts    | 12.454.000           |
| Tubería 24" SCH40                           | 1.850.000     | 23       | mts    | 42.550.000           |
| Tubería Codo 12" SCH40                      | 390.000       | 4        | unid   | 1.560.000            |
| Tubería T 12" SCH 40                        | 630.000       | 1        | Unid   | 630.000              |
| Reducción de 24" a 16"                      | 1.690.000     | 1        | unid   | 1.690.000            |
| Reducción de 16" a 8"                       | 320.000       | 1        | unid   | 320.000              |
| Juntas de Dilataciones 8"                   | 2.500.000     | 2        | unid   | 2.500.000            |
| Viga IMP (1" ¼ espesor)                     | 46.750        | 12       | mts    | 561.000              |
| <b>Valor Total:</b>                         |               |          |        | <b>\$129.414.000</b> |

De las tablas anteriores se concluye que para implementar esta alternativa el presupuesto es de \$153.157.000.



**Figura 37.** Proyección 3D alternativa del separador ciclónico.

## 6. Conclusiones

Se determinó las alternativas que permitirán solucionar la erosión en los tubos de entrada en la pared cortina de la caldera, las cuales pueden ser: MANHOLE, ventilador y calentador por resistencia o un separador ciclónico.

Se determinó el tipo de erosión en los tubos de entrada de la pared cortina de la caldera, el cual es llamado: EROSIÓN POR FRICCIÓN DE PARTÍCULAS.

Se diagnosticó que la principal causa para el actual diseño del MANHOLE, en la parte de la platina como en los pernos los valores de los esfuerzos generados se encuentran muy por debajo de la resistencia de los materiales, esto produce la erosión en las tuberías.

De estas tres alternativas propuestas se analiza lo siguiente:

La primera alternativa tiene una característica distinta de las otras dos, pues lo que se logra implementándola es permitir la inspección reduciendo los gastos de tiempo y dinero en la determinación del punto problemático cuando este se produce

La segunda alternativa asegura la eliminación del problema, pero su implementación no es viable debido al elevado coste operativo y la necesidad de trabajos complementarios que conllevan más gastos

La tercera alternativa se presenta como la más viable, aunque es claro que hay un límite en la eficiencia del separador de partículas, alargaría notablemente la vida útil de los tubos de pared cortina.

## **7. Recomendaciones**

Se puede hacer una implantación dual, es decir optar por la alternativa del separador ciclónico en conjunto con la alternativa de los MAHOLES para las cajas de aire; esto se justifica debido a que las dos se complementan.

Hacer un estudio si es necesario cambiar el material y el diseño de la tubería actual, ya sea por deterioro y desgaste.

## 8. Referencias bibliográficas.

- Alzate, O. (2017). Estudio de la corrosión sufrida a altas temperaturas por sales fundidas en aceros para caldera tipo ASTM A193 Y ASTM A53. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- BESA LAB. (12 de marzo de 2020). Tipos de corrosión y categorías de corrosividad. Obtenido de <https://lab.bernardoecenarro.com/pintura-anticorrosiva-tipos-corrosion/>
- Biesma, M., & San Cristobal, J. (2004 ). Análisis Económico de la Corrosión. Santander: Universidad de Cantabria.
- Castrillon , A., Osorio, D., Marulanda , A., & Perez, M. (2021). Estudio de la corrosión sufrida a altas temperaturas por sales fundidas en aceros para caldera tipo ASTM A193 y ASTM A53 recubiertos con aluminio por rociado termico. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- COLMAQUINAS. (2019). Calderas pirotubulares horizontales. Obtenido de : <https://www.colmaquinas.com/calderas-pirotubulares-horizontal/>
- Del Junco Garcia, J. E., & Noa Aguila, J. G. (2021). Pronóstico de la vida útil por termofluencia en tubos de calderas de la central Termoeléctrica de cienfuegos. Revista Centro Azucar, 48(2), 45-55. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v48n2/2223-4861-caz-48-02-45.pdf>
- Franz. (2012). ). Comparativa de caldera pirotubular y caldera acuotubular. Informe técnico. Markus Tuffner,Bosch Industriekessel GmbH.
- Guiza Pineda, R. F., & Rangel Hernandez, V. H. (2017). Metodología para determinar la eficiencia energética de calderas de baja potencia. Jóvenes en la ciencia - Revista de divulgación científica, 2628-2634.
- Hernandes Sampieri, r., Fernandes Collado, c., & Baptista Lucio, p. (2014). metodología de la investigación (6 ed.). mc graw hill.
- Kohan, A. L. (2000). Manual de calderas. México: McGraw Hills.

Marulanda, Tristacho, & Gonzales. (2015). Rociado Termico. Pereira: Universidad Tecnologica de Pereira.

Termotasajero. (2020). TERMOTASAJERO. Obtenido de: <https://termotasajero.com.co/nosotros/>

Tristancho Reyes, J. L., Chacon Navas, J. G., & Almeraya Calderón, F. (2015). Resistencia a la corrosión a alta temperatura de recubrimientos NiCrAlY y NiCrFeNbMoTiAl depositados por APS. Revista Facultad de Ingenierias, 21-27. Obtenido de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S012111292015000100002&script=sci\\_abstract&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S012111292015000100002&script=sci_abstract&tlng=es)

Uceda Martinez, J. (2012). Guía basica de calderas industriales eficientes. Consejería de Economía y Hacienda. Comunidad de Madrid., 71-78.