

Aprovechamiento del contenido energético de gases de combustión: evaluación  
técnico-financiera de autogeneración eléctrica en centros de cremación

Valeria Duarte Carvajal y Tellus Krisstal Riveros Fabra

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero químico

Modalidad Trabajo de investigación

Director

Giovanni Morales Medina

Doctor en Ingeniería química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

### Agradecimientos

“Agradezco a **Dios** por su guía, bendición y protección en cada paso que di hacia este objetivo.

A mi madre **Ana Rubiela Carvajal Rios**, por su amor infinito, apoyo incondicional y confianza en cada etapa de mi vida. Mamá, este logro es tan tuyo como mío; es el reflejo de tu esfuerzo, tu trabajo, tu ejemplo y tu fe constante en mí. Eres mi mayor motivación y la luz que me impulsa a seguir adelante. Gracias por siempre estar a mi lado, mamá.

A mi familia, especialmente a mis abuelos **Nelly Rios, Hipólito Carvajal** y **Sara Martínez**, por ser un pilar de amor y apoyo constante, por confiar en mí y sostenerme durante este camino.

A mis amigos **Andrés Obando, Rafael Salcedo, Danna Ramírez, Karint Ramírez, Wilson Ramírez** y **Krisstal Riveros**, quienes se convirtieron en mi segunda familia y me acompañaron en esta etapa, llenándola de risas, apoyo y experiencias que atesoraré siempre en mi corazón.”

*-Valeria Duarte Carvajal*

“Agradezco profundamente a mi mamá, **Alba Fabra**, por su amor incondicional, su apoyo firme y la confianza que siempre ha depositado en mí. Su esfuerzo y determinación han sido un faro y motor en mi vida; su ejemplo es lo que me impulsa a seguir adelante y creer en mí.

A mi papá, **Andrés Tolosa**; mi hermana, **Gabriela Tolosa**; mi abuela, **Ana Mosquera**; y mi tío, **Giovanny Fabra**; por su amor y apoyo constante, por creer en mí y por acompañarme en cada paso de este camino.

A mis queridas mascotas **Lunita, Sirius, Tanya y Kyra**, que estuvieron conmigo en los momentos de mayor esfuerzo, brindándome su compañía y alegría cuando más lo necesitaba.

A mis amigos incondicionales: **Susana Valderrama, Danna Ramírez, Karint Ramírez, Hernán Erazo, Rafael Salcedo** y **Valeria Duarte** por su apoyo constante, por su cariño sincero, por alegrarme los días y llenarlos de experiencias inolvidables.”

*-Tellus Krisstal Riveros Fabra*

“Agradecemos a todos los profesores de la **Escuela de Ingeniería Química**, especialmente a nuestro director el **Dr. Giovanni Morales**, por confiar en nuestras capacidades, y brindarnos su apoyo y orientación durante este proceso. A la **Universidad Industrial de Santander** por ser un hogar lleno de aprendizaje, permitirnos crecer tanto personal como profesionalmente, descubrir nuestra pasión y brindarnos las herramientas para hacer realidad este sueño”

*-Valeria Duarte Carvajal y Tellus Krisstal Riveros Fabra*

**Tabla de contenido**

Introducción .....	9
1. Objetivos.....	10
1.1. Objetivo General.....	10
1.2. Objetivos Específicos.....	10
2. Metodología .....	11
Fase I: Diseño conceptual del proceso.....	11
Fase II: Diseño básico del proceso.....	12
Fase III: Cálculo de costos de inversión y capital.....	12
3. Resultados.....	13
3.1. Diseño conceptual.....	13
3.1.1. Definición del problema de diseño .....	13
3.1.2. Limitaciones y restricciones .....	18
3.1.3. Selección de alternativa .....	20
3.1.4. Elaboración del diagrama PFD.....	25
3.1.5. Simulación del proceso en ASPEN PLUS.....	29
3.1.6. Diseño de equipos que componen el proceso. ....	31
3.2. Diseño básico .....	33
3.2.1. Diseño de tuberías que componen el proceso .....	33
3.2.2. Análisis HAZOP .....	36
3.2.3. Diagrama de tuberías e instrumentación - P&ID.....	41
3.2.4. Plano de la planta y distribución espacial de los equipos .....	44
3.3. Costos de inversión y capital .....	45
3.3.1. Costo de capital.....	45
3.3.2. Costos de operación (OPEX).....	46
3.3.3. Flujos de caja .....	46
3.3.4. Escenarios del proceso e indicadores financieros. ....	47
4. Conclusiones.....	50
5. Recomendaciones .....	52
Referencias bibliográficas.....	53
Apéndices.....	66

**Lista de tablas**

Tabla 1. Limitaciones y restricciones. ....	18
Tabla 2. Matriz DOFA. ....	19
Tabla 3. Características de las alternativas .....	23
Tabla 4. Corrientes del proceso de aprovechamiento energético .....	28
Tabla 5. Valores obtenidos en la simulación. ....	31
Tabla 6. Equipos del proceso .....	33
Tabla 7. Diámetros de las tuberías .....	34
Tabla 8. Codos entre tuberías.....	36
Tabla 9. Análisis de riesgos HAZOP .....	38
Tabla 10. Sistema de gestión de alarmas. ....	40
Tabla 11. Lazos de control.....	43
Tabla 12. Costos de capital CAPEX.....	45
Tabla 13. Costos de operación OPEX.....	46
Tabla 14. Comparación entre escenarios .....	48

**Lista de figuras**

Figura 1. Metodología..... 13

Figura 2. Esquema de un horno crematorio ..... 14

Figura 3. Diagrama entrada y salida del proceso..... 16

Figura 4 . Diagrama del ciclo orgánico de Rankine..... 21

Figura 5. Esquema del diseño de la turbina. .... 22

Figura 6. Diagrama de flujo del proceso PFD ..... 27

Figura 7. Simulación en Aspen Hysys..... 30

Figura 8. Diagrama de tuberías e instrumentación del proceso..... 42

Figura 9. Plano de distribución de equipos en planta. .... 44

Figura 10. Flujos de caja a 20 años..... 47

Figura 11. Indicadores financieros para los escenarios planteados. .... 49

Figura 12. Disminución precio de la electricidad. .... 49

**Lista de apéndices**

Apéndice A. Funcionamiento de hornos crematorios.....	66
Apéndice B. Calor residual y su clasificación de calidad.....	69
Apéndice C. Comparación entre hornos crematorios ofertados en el mercado.....	70
Apéndice D. Definición del flujo de gases de combustión.....	71
Apéndice E. Comparación entre el Ciclo de Rankine y el Ciclo Orgánico de Rankine.....	72
Apéndice F. Fluidos orgánicos propuestos para el diseño.....	74
Apéndice G. Sistemas de aspersion. ....	76
Apéndice H. Elección de la boquilla de aspersion.....	78
Apéndice I. Composición elemental del cuerpo humano.....	79
Apéndice J. Diseño de intercambiadores de calor.....	81
Apéndice K. Elección de bomba.....	95
Apéndice L. Elección de turbina.....	96
Apéndice M. Elección de tanques de almacenamiento.....	99
Apéndice N. Referencia para el diseño del plano de la planta.....	101
Apéndice O. Evaluación financiera.....	102
Apéndice P. Cálculo de la cantidad de agua necesaria para enfriar el gas.....	103
Apéndice Q. Cálculo de la eficiencia térmica del ORC.....	105
Apéndice R. Cálculo del diámetro óptimo del sistema de tuberías.....	105

## Resumen

**Título:** Aprovechamiento del contenido energético de gases de combustión: evaluación técnico-financiera de autogeneración eléctrica en centros de cremación\*

**Autores:** Valeria Duarte Carvajal, Tellus Krisstal Riveros Fabra\*\*

**Palabras clave:** Generación eléctrica, aprovechamiento energético, gases de combustión, Ciclo Orgánico de Rankine, energías no convencionales, calor residual.

**Descripción:** La presente investigación tiene como finalidad realizar un estudio de viabilidad técnico-financiero del aprovechamiento energético de los gases de combustión de hornos crematorios mediante un Ciclo Orgánico de Rankine (ORC). Para esto se simuló el sistema en Aspen Plus y se desarrolló el diseño básico de la planta, incluyendo equipos, sistema de control de procesos, plot plan, análisis financiero y evaluación de tres escenarios de factibilidad.

Los resultados indican que el sistema es viable para los tres escenarios planteados, con eficiencias del 14% al 15% utilizando etanol como fluido de trabajo para el ORC, generando entre 146,577 y 489,894 kWh/año, con ganancias entre \$37,898 y \$602,561 USD y un tiempo de recuperación de 2.5 a 8 años aproximadamente.

Se destaca la contribución de este proyecto con la investigación de fuentes no convencionales de energías para la generación eléctrica, que sean sostenibles y que aporten al cumplimiento de Colombia con el acuerdo de Paris, así mismo, este trabajo de fin de carrera puede recibir financiamiento de acuerdo con lo estipulado en la ley 1715 de 2014.

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Giovanni Morales Medina

**Abstract**

**Title:** Utilization of the energy content of flue gases: technical-financial evaluation of electrical self-generation in cremation centers\*

**Authors:** Valeria Duarte Carvajal, Tellus Krisstal Riveros Fabra\*\*

**Keywords:** Electricity generation, energy use, flue gases, Organic Rankine Cycle, non-conventional energies, waste heat.

**Description:** The purpose of this research is to conduct a technical and financial feasibility study of the energy use of the flue gases of crematorium ovens using an Organic Rankine Cycle (ORC). For this, the system was simulated in Aspen Plus and the basic plant design was developed, including equipment, a process control system, a plot plan, financial analysis, and the evaluation of three feasibility scenarios.

The results indicate that the system is viable for all three scenarios, with efficiencies ranging from 14% to 15% using ethanol as the working fluid for the ORC, generating between 146,577 and 489,894 kWh/year, with profits between \$37,898 and \$602,561 USD and a payback period of approximately 2.5 to 8 years.

The contribution of this project to the research on non-conventional energy sources for electricity generation is highlighted, which are sustainable and contribute to Colombia's compliance with the Paris Agreement. Likewise, this final degree project may receive funding in accordance with Law 1715 of 2014.

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Giovanni Morales Medina

## Introducción

La electricidad es una necesidad fundamental para el sostenimiento y el constante desarrollo de la sociedad a nivel mundial (Corte Constitucional de Colombia, 2017). En Colombia, la demanda del sector eléctrico para el 2024 aumentó 2.03% anual con respecto al año 2023, alcanzando un valor de 82.084.9 GWh/año (XM, Comunicaciones, 2024). La matriz eléctrica está constituida por generación hidroeléctrica, 68.3%, generación termoeléctrica, 30.7%, energía eólica, 0.1%, energía solar, 0.1% y cogeneración eléctrica, 0.9% (Corficolombiana, Paniguana, & Duarte Pérez, 2021). Si bien, esta distribución hace que la matriz eléctrica nacional sea limpia, respecto al promedio mundial (Otero, 2022), el compromiso de Colombia con el acuerdo de París motiva la búsqueda de estrategias de descarbonización (República de Colombia, 2021); aún se tiene un aporte significativo por generación termoeléctrica. Una posible fuente de energía no convencional es el aprovechamiento del calor generado por los hornos de cremación para la generación de electricidad. Este aprovechamiento se ha implementado recientemente en algunos lugares como en Reino Unido, Dinamarca y Suecia (Heredero, 2011).

Según estudios realizados en los países mencionados anteriormente, el calor producido durante las cremaciones podría llegar a suministrar energía suficiente para alimentar 1500 TV por una hora (Wolchover, 2011). Asimismo, los estudios reportan que la recuperación de la inversión depende del tiempo de operación de los hornos crematorios; en operación continua la inversión se recuperaría en 5 años, mientras que en operación batch (8 h/día) se recuperaría en un lapso de 15 a 20 años (Heredero, 2011). Por su parte, Colombia cuenta con 90 hornos crematorios distribuidos por todo el territorio, con una capacidad de procesamiento promedio de 9 cuerpos/horno/día (Sistema de Información ambiental de Colombia SIAC, 2020). Considerando el valor de 375 kW/horno/día de recuperación energética reportado por Beatrice et al. (2023), Colombia tendría

un potencial de recuperación de 147.82 GWh/año. Sin embargo, considerando la eficiencia promedio de un ciclo Rankine de 15% (Pinzon Camacho, 2018), la energía recuperada correspondería a 22.174 GWh/año, energía eléctrica suficiente para abastecer una población de 16,555 viviendas durante un año, teniendo en cuenta que se consumen 1,339.37 kWh/año/vivienda (Alcaldía Mayor de Bogotá; Secretaría de Planeación, 2021). Para la aplicación práctica de la recuperación de energía de estos gases de combustión, una evaluación técnico-financiera es requerida para establecer la viabilidad de su aplicación en el contexto colombiano. Debido a la novedad de este aprovechamiento, no se han encontrado estudios técnico-financieros en la literatura abierta consultada.

Con base a lo anterior, el presente documento expone los resultados más relevantes de un trabajo de grado relacionado con la factibilidad del aprovechamiento energético de los gases producidos en los hornos crematorios. La pregunta de investigación correspondió a, ¿en cuáles escenarios resulta factible el aprovechamiento de los gases de combustión de hornos de cremación para la generación eléctrica?

## **1. Objetivos**

### **1.1.Objetivo General**

Desarrollar un estudio de viabilidad técnico-financiera del aprovechamiento energético de los gases generados en hornos de cremación.

### **1.2.Objetivos Específicos**

1. Diseñar un proceso de generación de electricidad a nivel conceptual y básico, teniendo en cuenta un flujo de gases de combustión promedio, ecuaciones de balance, diferentes aspectos

técnicos y normas ingenieriles, así como un análisis de riesgos, definiendo la viabilidad técnica de la iniciativa.

2. Evaluar los indicadores financieros VPN, TIR y ROI sobre un flujo de caja a 20 años, mediante aproximaciones de costos de inversión y costos de capital, estableciendo la viabilidad financiera del proceso.

3. Explorar diferentes escenarios financieros para la generación eléctrica a partir de los gases de combustión en hornos crematorios, definiendo el escenario que presente un mejor desempeño.

## **2. Metodología**

Se utiliza un enfoque metodológico combinando la simulación de proceso con el análisis financiero con tres fases:

### **Fase I: Diseño conceptual del proceso**

Actividad 1: Búsqueda de información de parámetros operativos, dimensiones del horno de cremación y métodos de generación eléctrica, a partir de referencias de literatura, utilizando palabras claves como “Horno crematorio”, “crematory oven”, “aprovechamiento energético”, “gases de combustión”, “recuperación de calor”, “métodos de generación eléctrica” y selección del horno crematorio comparando diferentes modelos de hornos crematorios encontrados en la literatura, teniendo en cuenta el proceso de cremación, el combustible empleado y el tiempo de operación por cremación.

Actividad 2: Especificación de las limitaciones y restricciones técnicas, ambientales y sociales, y la elaboración de un análisis DOFA sobre la implementación del proyecto.

Actividad 3: Planteamiento de alternativas para generación eléctrica a partir de los gases de combustión de un horno crematorio y selección de la alternativa más adecuada, teniendo en cuenta características, como son eficiencia, rangos de operación, costos, entre otros.

Actividad 4: Definición del flujo de gas a utilizar en el diseño teniendo en cuenta el modelo del horno crematorio seleccionado, elaboración del diagrama PFD y especificación de cada una de las corrientes que componen el proceso mediante ecuaciones de balance.

Actividad 5: Dimensionamiento de los equipos necesarios para el proceso y simulación del proceso en Aspen Hysys.

## **Fase II: Diseño básico del proceso**

Actividad 1: Diseño del sistema de control del proceso mediante la metodología de análisis de riesgos HAZOP y sistema de gestión de alarmas.

Actividad 2: Elaboración del diagrama de tuberías e instrumentación del proceso (P&ID).

Actividad 3: Elaboración del Plot plant teniendo en cuenta la distribución de equipos, diámetro de tuberías y accesorios, garantizando que cumplan con los estándares de seguridad de procesos.

Actividad 4: Planteamiento de escenarios del proceso variando el flujo de entrada de gases de combustión producidos por hornos crematorios al sistema ORC.

## **Fase III: Cálculo de costos de inversión y capital**

Actividad 1: Cálculo del potencial económico 2 del proceso.

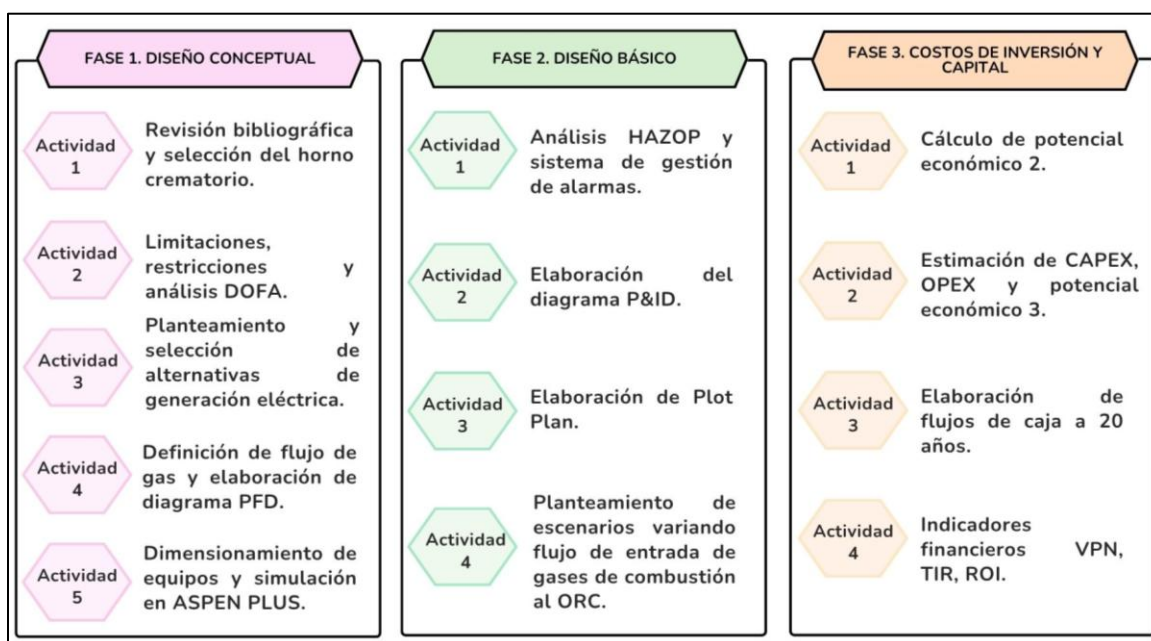
Actividad 2: Estimación de los costos de capital (CAPEX), costos operativos (OPEX) y potencial económico 3 del proceso.

Actividad 3: Análisis y proyección de flujos de caja a un horizonte de 20 años, considerando variables financieras tales como costos de inversión, ingresos, depreciaciones, entre otros.

Actividad 4: Evaluación económica mediante el cálculo de indicadores financieros: valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR) y retorno sobre la inversión (ROI).

**Figura 1.**

*Etapas metodológicas para el aprovechamiento energético de gases de combustión de hornos crematorios.*



### 3. Resultados

#### 3.1. Diseño conceptual

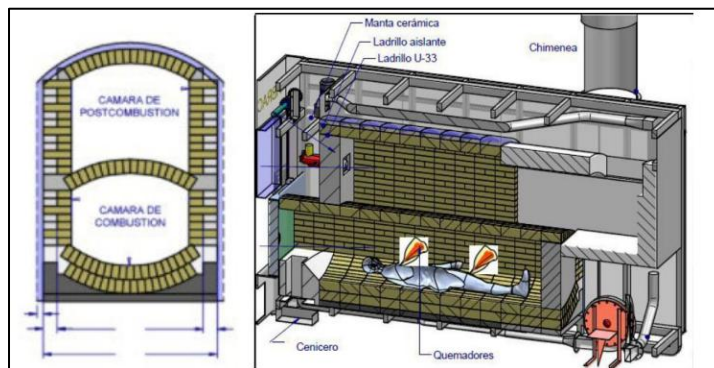
##### 3.1.1. Definición del problema de diseño

La cremación es la disposición final de un cuerpo humano o animal muerto por medio de la incineración controlada en un horno de combustión, conocido como horno crematorio (Rendon Valles & Cardona Sepulveda, 2017). Estos hornos están compuestos principalmente por una cámara de combustión primaria, una cámara de combustión secundaria o de post combustión y en

algunos casos cuentan con un sistema de tratamiento de gases de combustión (Funeral natural, 2022) (ver Apéndice A). En la Figura 2, se presenta el esquema de un horno crematorio con la distribución de sus cámaras:

**Figura 2.**

*Esquema de un horno crematorio.*



Tomado de: Naranjo Contento, A. L., Velasco Jaramillo, E. J., & Zambrano Arejuela, O. I. (2022). Estudio y diseño funcional de un horno crematorio energizado térmicamente con resistencias eléctricas. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/22763/1/CD%2012236.pdf>

Según el DECC (Department of Energy and Climate Change of Imperial College), el potencial o la calidad del calor residual para ser recuperado y aprovechado, se clasifica según la temperatura de la fuente de calor (Sánchez Daza, 2021). Los gases de combustión de salida de hornos crematorios tienen una temperatura de aproximadamente 760 °C (CALTEC Hornos Industriales), por lo que según esta clasificación (ver Apéndice B), cuentan con un alto potencial para ser aprovechados como fluido de calentamiento o para generación eléctrica.

En el trabajo reciente de Beatrice et al. (2023), se analizó el aprovechamiento de los gases de combustión emitidos por los hornos de cremación y la factibilidad en la implementación de un ciclo Rankine para la generación eléctrica a partir de estos gases. El estudio proporciona información relevante como la cantidad de energía necesaria para operar los hornos crematorios (17KWh/cremación), y la energía que se desaprovecha con la expulsión de los respectivos gases

(375KWh/horno/día), en donde se concluye que su implementación es factible y la energía producida es suficiente para abastecer dos escuelas, un gimnasio y una piscina (Marchi, Nardin, Barazzutti, & Giust, 2023). Además, en el crematorio de Haycombe, ubicada en el condado de Somerset, Inglaterra, el calor recuperado se utiliza para climatizar la capilla y las oficinas del establecimiento, mientras que en Redditch, Worcestershire, se emplea para calentar una piscina pública cercana (Heredero, 2011).

Con base a lo anterior, el objetivo de este proyecto es realizar un estudio técnico financiero sobre el aprovechamiento del calor residual de los gases de combustión de hornos crematorios para producir energía eléctrica, a partir del proceso tipo batch de un horno crematorio que realice al menos 6 cremaciones/día, en un lapso de 12 horas/día en donde cada cremación dure un tiempo de máximo 2 horas. Este trabajo de fin de carrera está diseñado para implementarse en centros crematorios que cuenten con el espacio e infraestructura necesarios para instalar el sistema de generación eléctrica. Se priorizarán ubicaciones urbanas o periurbanas con alta demanda de servicios crematorios, operación continua y acceso a servicios básicos.

Para este estudio se compararon varios modelos de hornos crematorios disponibles en el mercado, seleccionando finalmente el diseño de la empresa CALTEC por su disponibilidad de información técnica detallada, como tipo y consumo de combustible, temperaturas del proceso y tiempos de cremación (ver Apéndice C). Si bien este horno no cumple inicialmente con el límite de temperatura de emisión estipulado en la Ley 909 de junio de 2008, esta condición puede corregirse mediante la implementación del sistema de recuperación para generación eléctrica, asegurando que los gases de salida no superen los 250 °C (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2020). El flujo de gases de combustión generado es de 3.08 m<sup>3</sup>/s, con una temperatura de salida de 760 °C

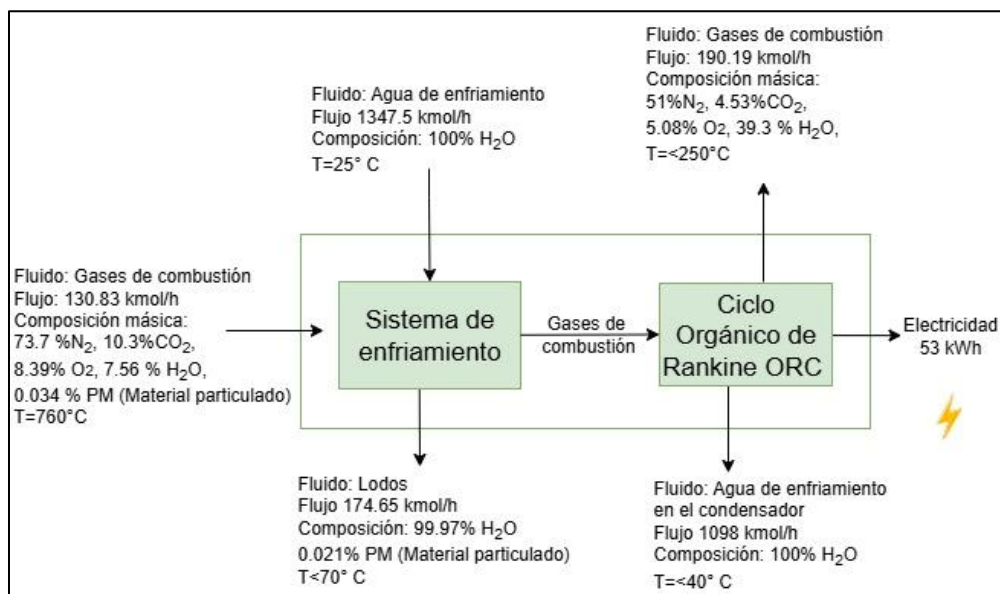
(CALTEC Hornos Industriales) y una presión de 101,363 Pa (Gómez Díaz, 2015) (ver Apéndice D).

Dado que la recuperación del calor residual de estos hornos cuenta con poca información técnica, para seleccionar el método de generación eléctrica se deben tener en cuenta factores como eficiencia del proceso, condiciones óptimas de operación, los costos de su implementación y mantenimiento y la viabilidad financiera del sistema. Se espera que con la implementación del sistema de generación eléctrica se obtenga una eficiencia térmica de 14% y una generación eléctrica de 200,000 kWh/año.

A continuación, se presenta el diagrama entrada y salida del sistema:

**Figura 3.**

*Diagrama de entradas y salidas del proceso del sistema de generación eléctrica.*



Para la implementación de este proyecto es importante tener en cuenta la normativa vigente colombiana presentada a continuación:

- La Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), mediante la Resolución 281 de 2015 (Unidad de Planeación Minero Energética, Resolución 281 de 2015), establece que el

límite máximo para ser considerado un autogenerador a pequeña escala es 1 MW de capacidad instalada.

- La Resolución 174 de 2021 (Comisión de Regulación de Energía y Gas, Resolución 174 de 2021), establece un procedimiento simplificado de conexión a través de la ventanilla única, un mecanismo de gestión que permite a los usuarios que desean conectarse a un sistema eléctrico realizar los trámites requeridos para la conexión al sistema eléctrico por parte de autogeneradores a pequeña o gran escala en un solo lugar. Esta resolución también regula la medición bidireccional y permite que los auto generadores a pequeña escala inyecten el excedente a la red, siendo compensados en la factura eléctrica o vendidos al comercializador en caso de superar el consumo propio.
- Las comunidades energéticas permiten que ciudadanos, organizaciones o entidades territoriales se agrupen para generar y gestionar energía de manera colectiva, priorizando el uso de fuentes renovables. Estas fueron reconocidas legalmente en el artículo 235 de la Ley 2294 de 2023 (El Congreso de Colombia, Ley 2294 de 2023) y regulados bajo el decreto 2236 de 2023 (El Presidente de la República de Colombia, Decreto 2236 de 2023), en donde se establecen lineamientos para la conformación y operación de esquemas de autogeneración colectiva. En dicho decreto se especifica que, para que una comunidad energética pueda vender la electricidad generada, primero debe satisfacer la demanda total de energía de sus habitantes.
- Las leyes 142 de 1994 (El Congreso de Colombia, Ley 142 de 1994) y 143 de 1994 (El Congreso de Colombia, Ley 143 de 1994) establecen el marco legal para los servicios públicos domiciliarios y la organización del mercado eléctrico. En estas leyes, se señala

que los comercializadores de energía son los agentes autorizados para comprar energía en el mercado mayorista y venderla a usuarios regulados y no regulados.

**3.1.2. Limitaciones y restricciones**

El aprovechamiento energético de gases de combustión generados en hornos crematorios enfrenta varias limitaciones y restricciones para su implementación en Colombia, debido a la controversia que genera este tema. En la Tabla 1 se puede observar las limitaciones y restricciones del proceso, teniendo en cuenta puntos clave como especificaciones técnicas, ambientales, sociales y económicos.

**Tabla 1.**

*Limitaciones y restricciones del sistema de aprovechamiento energético de gases de combustión de hornos crematorios.*

<b>Especificación</b>	<b>Limitaciones</b>	<b>Restricciones</b>
<b>Técnico</b>	Los sistemas de recuperación de energía requieren mantenimiento especializado y continuo.	Posibles modificaciones en la estructura del horno para implementar el sistema de aprovechamiento de gases.
<b>Social</b>	Poco conocimiento en la industria funeraria con respecto a la recuperación energética.	Rechazo social debido a percepciones éticas y religiosas. Desinterés de los propietarios de centros de cremación en el proyecto.
<b>Ambiental</b>	A pesar de generar electricidad, el proceso sigue siendo una fuente de emisiones debido a la combustión.	Integración de sistemas recuperación de energía sin modificaciones del tratamiento de gases.
<b>Económico</b>	Rentabilidad incierta dependiendo de la cantidad de incineraciones diarias.	Alta inversión para instalación y operación del proceso.

*Fuente: Elaboración propia.*

Para evaluar la viabilidad del aprovechamiento energético de gases de combustión, se realizó un análisis DOFA, el cual se presenta en la Tabla 2. Este análisis facilita la identificación de debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas asociadas con este método dentro del contexto colombiano.

**Tabla 2.**

*Matriz DOFA del sistema de aprovechamiento energético de gases de combustión de hornos crematorios.*

<p><b>Debilidades:</b></p> <p>La eficiencia de los sistemas de recuperación de energía generalmente es baja, lo que implica que solo una pequeña fracción de la energía recuperada puede ser aprovechada. Es un tema muy poco estudiado, por lo tanto, la información encontrada es muy limitada y en muchos casos, carece de profundidad técnica y financiera, lo que dificulta el análisis detallado de su viabilidad y aplicación práctica. Si no se utiliza un sistema adecuado de limpieza de los gases a la salida de la chimenea, el sistema de aprovechamiento de calor de estos puede verse afectado, lo que incrementaría los costos de mantenimiento debido a la acumulación de residuos y partículas en los equipos del sistema.</p>	<p><b>Oportunidades:</b></p> <p>La <b>Ley 1715 de 2014</b> en Colombia es crucial para proyectos como aprovechamiento energético de gases de combustión, ya que favorece la inversión en tecnologías limpias y facilitan su financiamiento. Esta ley ofrece incentivos fiscales, que reducen los costos iniciales de instalación y operación. Entre los beneficios, se encuentran la exención del 50% del impuesto de renta durante los primeros 15 años de operación, la exoneración del IVA en la compra de equipos nacionales o importados y materiales relacionados con la instalación y la producción, y la posibilidad de aplicar una depreciación acelerada de los activos, de una tasa anual de 33.33%. Para acceder a estos incentivos, es necesario obtener una certificación como proyecto de generación de energía eléctrica a partir de fuentes no convencionales (El Congreso Nacional de Colombia, Ley 1715 de 2014).</p> <p>La <b>Ley 2099 de 2021</b> modifica y adiciona información a la Ley 1715, y uno de sus principales beneficios es que permite acceder a condiciones financieras favorables, tanto en tasas de interés como en plazos de repago, promoviendo así la viabilidad financiera (El Congreso de la Republica, Ley 2099 de 2021).</p> <p>El <b>Decreto 1073 de 2015</b> permite a empresas e individuos producir energía para su consumo y vender los excedentes a la red eléctrica, promoviendo la autosuficiencia y reduciendo la dependencia a la red nacional (Presidente de la República de Colombia, Decreto 1073 de 2015).</p>
<p><b>Fortalezas:</b></p> <p>La capacidad para generar energía a partir de una fuente no convencional contribuiría a la sostenibilidad ambiental del país. Genera un aporte al compromiso de Colombia con el <b>Acuerdo de París</b>, al promover la descarbonización del sector energético alineándose con los objetivos globales de reducción de emisiones de CO2 equivalente (<b>República de Colombia, 2021</b>). Al implementar esta alternativa, el dueño del centro de cremación tendría electricidad de manera continua, asegurando un suministro autónomo de energía para las operaciones diarias del crematorio, generando ahorros y reduciendo dependencia de fuentes externas de energía.</p>	<p><b>Amenazas:</b></p> <p>La fluctuación en la cantidad de cremaciones diarias puede influir directamente en la cantidad de energía a recuperar. En Colombia los hornos crematorios deben estar actualizados tecnológicamente para cumplir con los lineamientos estipulados en las <b>Resoluciones 909 de 5 Junio de 2008</b> del Ministerio de Ambiente, <b>619 de 1997</b> y <b>6982 del 2011</b> del Distrito (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2020). Los hornos crematorios deben contar con un sistema que registre la temperatura a la salida, la cuál debe ser inferior a 250°C. Si la temperatura excede este límite, se debe incluir un sistema de enfriamiento para reducirlo a 250°C. Además, los gases de salida deben cumplir con estándares de emisiones establecidos (ver Apéndice E) (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2018).</p>

*Fuente: Elaboración propia.*

### 3.1.3. *Selección de alternativa*

Existen diferentes métodos para aprovechar el calor residual producido en diferentes procesos industriales para generar electricidad, como son, la implementación del ciclo de Rankine (Becerra Rodríguez, Aguilar Díaz, Bernardino González, Santana Ramírez, & Serrano García, 2022), el ciclo orgánico de Rankine (Jiménez García, Ruiz, Pacheco Reyes, & Rivera, 2023) y las turbinas eólicas con difusor DAWT (Mann & Singh, 2018).

El ciclo de Rankine tiene como objetivo convertir calor trabajo con el fin de crear energía eléctrica por medio de un intercambiador de calor, una turbina, un condensador y una bomba. El ciclo de Rankine es un ciclo que permite convertir temperaturas de entre 350 a 600°C en electricidad (Moran & Shapiro, 2006). Así mismo, este ciclo es apropiado para generación de electricidad desde 20 a 30 MW (Méndez, 2018). La eficiencia de este ciclo está en 31.43%, es típica para un ciclo de Rankine simple, aunque puede mejorarse mediante técnicas como el sobrecalentamiento del vapor o recalentamientos intermedios (Flores, Campos, Sánchez, Bustos, & José, 2019).

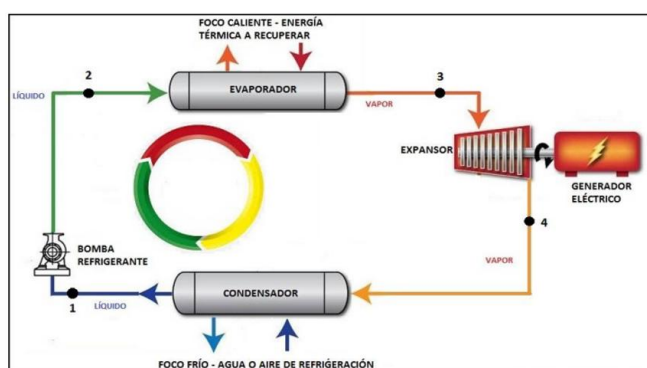
Otra alternativa es el ciclo Orgánico de Rankine (ORC), el cual es un ciclo termodinámico que puede convertir energía térmica en un rango de 80 a 350 °C en electricidad (Veloso Freire & Romero Gómez, 2019). Este proceso es similar al ciclo de Rankine convencional, a diferencia de que como fluido de trabajo se utiliza un fluido orgánico de elevado peso molecular. (Sánchez, 2012). La eficiencia térmica del ORC, normalmente varía entre un 2% a un 19% y para sistemas pequeños (<5kW) su eficiencia es menor (Mahmoudi & M. Fazli, 2018). El ORC puede alcanzar un rendimiento eléctrico del 10 al 20%, dependiendo de la temperatura de la fuente de calor. Entre mayor sea la temperatura de la fuente de calor, mayor será el rendimiento del ciclo (Sánchez, 2012). Además, la turbina utilizada en este proceso puede alcanzar una alta eficiencia de hasta el 80% aproximadamente (Heberle & Brüggemann, 2016). Según Castellanos Villamil (2023), el

costo de instalación de un ORC para un flujo de gas de combustión de 23.830 kg/h, una temperatura de ingreso de 320 °C y una presión de 14.65 psia, es de aproximadamente \$343,443 dólares y, produce una generación de potencia de 55 kW/h.

En la Figura 4 se presenta el diagrama del proceso que aplica para el ciclo de Rankine y el ciclo orgánico de Rankine.

**Figura 4.**

*Diagrama del ciclo orgánico de Rankine.*



Tomado de: Sánchez Daza, J. E. (2021). Optimización térmica y económica de un ciclo Rankine orgánico que aprovecha el calor residual de los motores de combustión interna. [https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/14058/2021\\_Tesis\\_Jesus\\_Sanchez\\_Daza.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/14058/2021_Tesis_Jesus_Sanchez_Daza.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

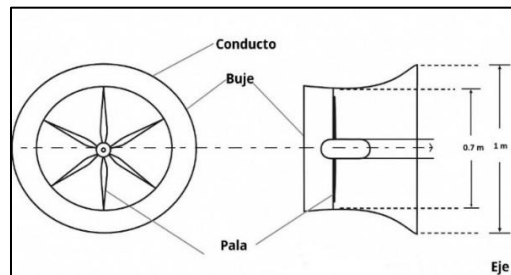
El proceso inicia con una bomba que transporta el fluido hacia el evaporador, donde el fluido de trabajo absorbe el calor de la fuente térmica y se evapora. Después el fluido ingresa a la turbina, donde se expande al tiempo que genera la energía mecánica deseada (Sánchez Daza, 2021). El trabajo mecánico es transformado en energía eléctrica mediante un generador, aquí mismo la presión y temperatura disminuyen; finalmente, el vapor pasa por el condensador que cumple su función, obteniendo líquido comprimido que ingresa a la bomba y comienza nuevamente el proceso descrito (Castellanos Villamil, 2023).

Una alternativa para aprovechar el calor residual es el uso de turbinas eólicas con difusor (DAWT, Ducted Axial Wind Turbines). Son instaladas en la parte superior de las chimeneas para

maximizar la velocidad de los gases (Castellanos Villamil, 2023). Estas turbinas, incorporan un ducto con una hélice en su sección más estrecha y una salida de mayor diámetro; representan una versión optimizada de las turbinas eólicas en ducto. El difusor acelera el flujo de aire hacia el rotor, generando una diferencia de presión que hace girar las palas y produce energía mecánica, la cual se convierte en energía eléctrica mediante un generador (Agha, Chaudhry, & Wang, 2018).. Gracias al difusor, el rotor alcanza mayores revoluciones por minuto y genera más potencia que las turbinas sin este componente (Castellanos Villamil, 2023). En la Figura 4 se observa el esquema del diseño de una turbina DAWT.

**Figura 5.**

*Esquema del diseño de la turbina DAWT.*



*Tomado de: Mann, H., & Singh, P. (2018). Effect of number of blades in ducted turbine system on kinetic energy extraction from chimney flue gases – benchmarking with wind energy system (Vol. 32). Journal of Mechanical Science and Technology.*

Una de las ventajas de estas turbinas es que al trabajar con TSR (revoluciones por minuto del rotor), el ruido producido es menor. Además, el difusor disipa el ruido generado en su operación, por lo que estos equipos trabajan de manera silenciosa (Cruz Sánchez & Mendoza Hebert, 2017). Según Castellanos Villamil (2023), el costo de instalación de una DAWT para un flujo de gas de combustión de 23,830 kg/h, una temperatura de ingreso de 320 °C y 14.65 psia, es de aproximadamente, \$2,680 dólares y produce una generación de potencia de 3 kW/h. En la Tabla 3 se presenta una comparación entre los diferentes métodos de aprovechamiento de calor residual para generación eléctrica.

**Tabla 3.**

*Comparación de características de las alternativas de generación eléctrica.*

<b>Característica</b>	<b>Ciclo de Rankine</b>	<b>Ciclo Orgánico de Rankine (ORC)</b>	<b>Turbina eólica con difusor (DAWT)</b>
<b>Eficiencia térmica</b>	Eficiencia alta aproximadamente de 5 a 30% y se puede aumentar mediante mejoras en el proceso (Méndez, 2018).	Alta eficiencia entre 2% a 19%, sin embargo, es baja comparada con el Ciclo de Rankine (Mahmoudi & M. Fazli, 2018).	Baja eficiencia térmica. Su eficiencia depende de la velocidad del fluido, alcanzando rangos entre 35% a 45% (Mann & Singh, 2016).
<b>Rango de operación</b>	Permite el manejo de temperaturas que oscilan entre 350°C y 600°C (Moran & Shapiro, 2006).	Es apto para aprovechar el calor de fuentes de calor de baja o media temperatura entre 80 a 350 °C (Gómez, 2019).	No depende de la temperatura sino de la velocidad del fluido, se agregan en la chimenea con el fin de aprovechar al máximo la velocidad (Castellanos Villamil, 2023).
<b>Costos o inversión</b>	La inversión para el ciclo de Rankine no es elevada, esta varía de medio a alto (Paredes, 2015).	El costo de inversión varía de medio a alto, sin embargo, para plantas de generación pequeña su costo es bajo (Sánchez Daza, 2021).	El costo oscila alrededor de \$2,555 dólares (Castellanos Villamil, 2023).
<b>Fluido de trabajo</b>	Utiliza principalmente el vapor como fluido de trabajo, aumentando la corrosión en el sistema (Méndez, 2018).	Fluidos orgánicos con punto de ebullición menor al del agua, sin embargo, algunos fluidos pueden ser tóxicos e inflamables (Gómez, 2019).	Trabaja directamente con el flujo de gases de combustión que se generan en el proceso (Castellanos Villamil, 2023).
<b>Potencia</b>	20-30 MW (Méndez, 2018).	0.5 a 5 MW para aplicaciones de recuperación de calor (Sánchez, 2012).	Más de 40 MW (Núñez, 2018).
<b>Aplicaciones</b>	Geotérmica, solar y recuperación de calor residual (Fernández, 2017) (Ciclo de Rankine, 2022).	Geotérmica, biomasa y recuperación de calor residual (Fiter, 2012).	Instalación en parques eólicos, energía eólica marina, aplicaciones aeroespaciales (Agha, Chaudhry, & Wang, 2018).

Según la información registrada en la Tabla 3, se observa que la DAWT puede presentar una mayor eficiencia (20-50%), en comparación con el ciclo de Rankine (5 a 30%) y el ORC (2 a 19%). Sin embargo, la eficiencia de la DAWT no depende directamente de la temperatura del fluido de trabajo, sino que varía con su densidad y velocidad, por lo que son equipos que están diseñados para aprovechar la energía cinética para generar electricidad (Tanoue, 2018) y no la energía térmica por lo que la DAWT, no es una alternativa viable para el aprovechamiento del calor residual en comparación con las otras alternativas planteadas.

También se observa que el fluido de trabajo del ciclo de Rankine es el agua; sin embargo, aunque con este fluido se puede aprovechar fuentes de calor con rangos temperaturas más elevadas (mayor a 350 °C), su uso aumenta la corrosión de los equipos, generando mayores costos en mantenimiento y disminuyendo la vida útil de los equipos utilizados. El ORC que utiliza fluidos orgánicos como fluido de trabajo, lo que minimiza la degradación en la integridad de los equipos que componen el proceso. Por lo anterior, este método es más adecuado para fuentes de calor con temperaturas medias o bajas (menor a 350 °C) (ver Apéndice E). Por tanto, a partir del análisis realizado se seleccionó como método para la generación eléctrica a partir de gases de combustión de hornos crematorios, el ciclo orgánico de Rankine – ORC.

Para la selección del fluido de trabajo utilizado en el ORC se consideraron factores clave como la temperatura de la fuente de calor, la temperatura de ebullición del fluido orgánico, su temperatura crítica, su impacto ambiental, inflamabilidad y toxicidad (ver Apéndice F). Por tanto, se seleccionaron como fluidos de trabajo potenciales a utilizar en el ORC, el benceno, n-heptano y etanol.

Según el estudio realizado por Saiz (2019), en la simulación de un ORC operando a una temperatura de 200 °C, las eficiencias reportadas para los fluidos orgánicos seleccionados fueron,

para el n-heptano 18.18%, benceno 21.46% y para el etanol 22.1%. Además, según el análisis realizado por Benítez Fundora (2019), en donde se evaluaron 29 sustancias para el diseño de un ORC estándar para la recuperación de calor de efluentes gaseosos industriales a temperaturas superiores a 180 °C, el etanol fue uno de los mejores fluidos de trabajo, destacando por su comportamiento cuasi-isentrópico en el diagrama T-S y por ofrecer una eficiencia del 12.72%.

Por su parte, en el estudio de Amicabile (2015), donde se realizó el diseño y optimización de ciclos ORC para la recuperación de calor de motores diesel con diferentes fluidos como etanol, pentano y R245fa; el etanol fue seleccionado como el fluido de trabajo más eficiente y rentable, especialmente en configuraciones subcríticas con regeneración, alcanzando una potencia neta de 8.19 kW y una eficiencia del 3.43%, con el menor costo de capital y un tiempo de recuperación de la inversión (PBT) entre 3.5 y 4 años. A partir de lo anterior, se seleccionó como fluido de trabajo el etanol, ya que presenta altas eficiencias térmicas en aplicaciones de ORC y posee una baja toxicidad e impacto ambiental en comparación con otros fluidos orgánicos.

#### ***3.1.4. Elaboración del diagrama PFD***

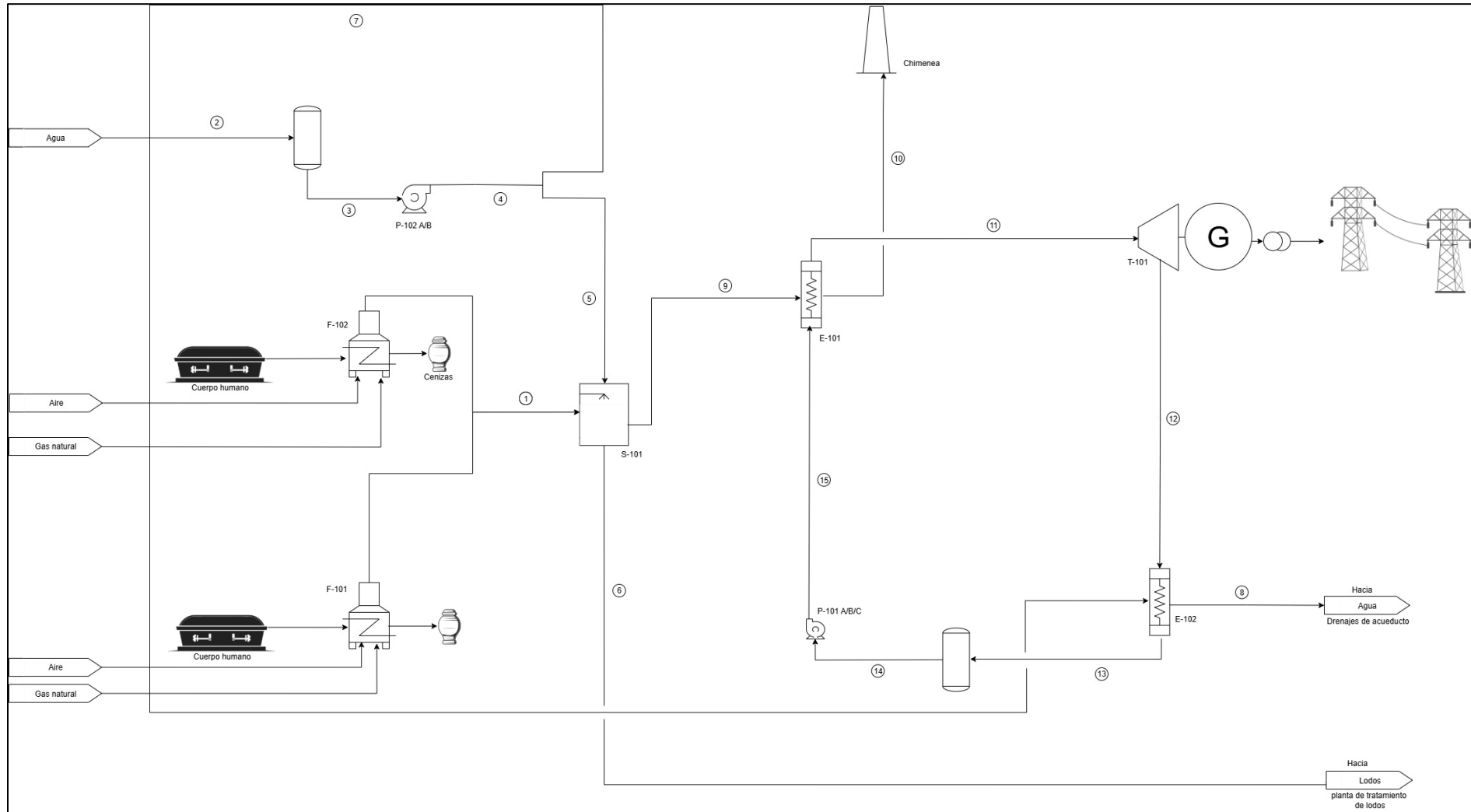
En la Figura 6, se presenta el diagrama de flujo del proceso PFD para el aprovechamiento energético del flujo de gases de combustión emitidos por un horno crematorio. En este diagrama, se implementa la alternativa seleccionada, el ciclo orgánico de Rankine utilizado para la recuperación del calor residual y la generación eléctrica a partir de estos gases, en donde se especifican los flujos de materia en las corrientes del proceso y los equipos fundamentales para su funcionamiento.

El proceso inicia transfiriendo los gases de combustión generados por los hornos crematorios hacia una cámara de aspersion de agua (S-101), donde se reduce su temperatura desde 760 °C hasta 301 °C. El agua utilizada en este sistema es suministrada desde el tanque de

almacenamiento (V-102) hacia la cámara de aspersión (S-101) a través de una bomba (P-102), la cual incrementa su presión de 1.013 bar a 2 bar. Seguidamente, los gases ingresan a un intercambiador de calor (E-101), donde transfieren su energía térmica al etanol. Una vez completado el intercambio, los gases son liberados a la atmósfera a una temperatura de 107°C, cumpliendo con lo estipulado en la ley 909 de 2008. Paralelamente, el etanol, almacenado en el tanque (V-101), es transferido hacia el intercambiador de calor (E-101) mediante una bomba (P-101), la cual eleva su presión de 1 bar a 20 bar. En el intercambiador, el etanol absorbe energía térmica de los gases de combustión y se vaporiza, alcanzando una temperatura de 233 °C. El etanol en estado gaseoso es direccionado hacia la turbina de expansión (T-101) con el fin de aprovechar su energía térmica para la generación de electricidad. El etanol sale de la turbina a una temperatura de 93°C y 1 bar. Finalmente, el etanol es dirigido hacia un condensador (E-102), en donde por medio del intercambio de calor con agua, disminuye su temperatura hasta 40°C. El etanol condensado es recirculado hacia el tanque de almacenamiento de etanol (V-101), en donde inicia nuevamente el ciclo ORC.

**Figura 6.**

*Diagrama de flujo del proceso de aprovechamiento energético de gases de combustión de hornos crematorios PFD.*



*Fuente: Elaboración propia.*

A continuación, se presenta la tabla de corrientes del proceso, la cual resume las condiciones de operación de cada flujo involucrado en este.

**Tabla 4.**

*Corrientes del proceso de aprovechamiento energético de gases de hornos crematorios.*

Corriente	Composición molar	Flujo Molar [mol/s]	Ubicación	Temperatura [°C]	Presión [bar]
1	74.16% $N_2$ 11.8% $H_2O$ 7.39% $O_2$ 6.58% $CO_2$ 0.028% Material particulado	36.34	Entrada S-101	760	1.0136
2	100% $H_2O$	374.3	Entrada V-102	25	1.0132
3	100% $H_2O$	374.3	Entrada P-102	25	1.0132
4	100% $H_2O$	374.3	Salida P-102	25	2
5	100% $H_2O$	69.3	Entrada S-101	25	2
6	99.97% $H_2O$ 0.021 PM (Material particulado)	48.52	Salida S-101	70	1
7	100% $H_2O$	305	Entrada E-102	25	1
8	100% $H_2O$	305	Salida E-102	40	1
9	51.03% $N_2$ 39.35% $H_2O$ 5.08% $O_2$ 4.53% $CO_2$	52.83	Entrada E-101	301	1.0132
10	51.03% $N_2$ 39.35% $H_2O$ 5.08% $O_2$ 4.52.58% $CO_2$	52.83	Entrada Chimenea	107	1.0132
11	96% Etanol 4% $H_2O$	6.04	Entrada T-101	233	20
12	96% Etanol 4% $H_2O$	6.04	Entrada E-102	93	1
13	96% Etanol 4% $H_2O$	6.04	Entrada V-101	40	1
14	96% Etanol 4% $H_2O$	6.04	Entrada P-101	40	1
15	96% Etanol 4% $H_2O$	6.04	Entrada E-101	40	20

*Fuente: Elaboración propia.*

### 3.1.5. *Simulación del proceso en ASPEN PLUS*

Se realizó la simulación del proceso en ASPEN PLUS siguiendo el diseño planteado en el diagrama PFD. El objetivo de la simulación fue realizar el balance de materia y energía, buscando aproximar el comportamiento del sistema a las condiciones reales de operación. Para esto, se tuvo en cuenta el modelo Peng-Robinson (Plata & Rincon, 2022) (Yu, Helland, Yu, Gundersen, & Sin, 2021) y el modelo Soave-Redlich-Kwong EoS (Lamberto, 2018), estos los más utilizados al momento de simular un ORC. El modelo Peng-Robinson maneja una mejor predicción para fluidos orgánicos cerca del punto crítico, por otra parte, el modelo Soave-Redlich-Kwong EoS maneja limitaciones para representar fluidos con temperaturas altas, convirtiéndolo en un modelo poco eficiente para simular un ORC (Ghanbari, Ahmadi, & Lashanizadegan, 2016). A partir de lo anterior, el modelo Peng-Robinson es el elegido para simular el modelo ORC en ASPEN PLUS.

Las condiciones iniciales del proceso fueron establecidas con base en información bibliográfica, criterios de diseño y principios heurísticos aplicados a sistemas de conversión de energía. A continuación, se presentan las consideraciones aplicadas para a la definición de las condiciones iniciales:

- Dado que el ciclo ORC que se pretende diseñar corresponde a un sistema subcrítico, la presión máxima de salida de la bomba se establece en el 90% de la presión crítica del fluido del trabajo (Sánchez Daza, 2021).
- Se establece como criterio un diferencial mínimo de temperatura en el punto pinch de 30°C y de 10 °C para el condensador (Pasinato, 2020).
- El mejor desempeño para un fluido de trabajo en particular se alcanza cuando la temperatura de la fuente ( $T_f$ ) se relaciona con la temperatura crítica del fluido ( $T_c$ ) mediante la siguiente expresión:  $T_{f, \max} \approx T_c + PPMTDe + 30$  (°C), donde  $PPMTDe$

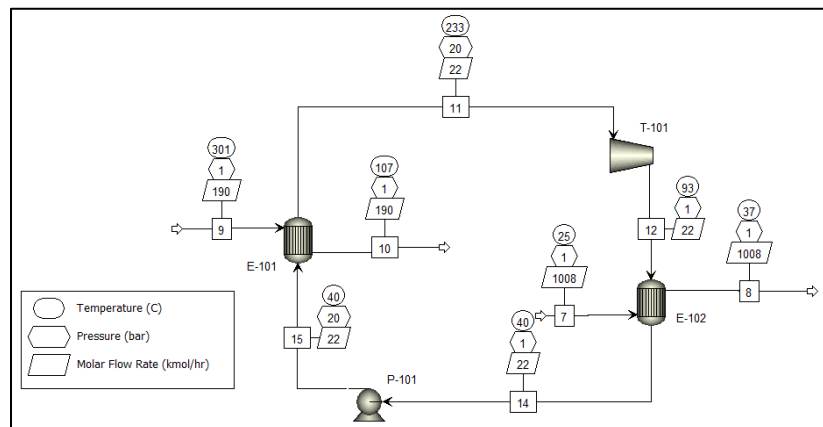
representa la diferencia mínima de temperatura en el punto de estrechamiento en el evaporador (Pasinato, 2020).

- La mejor condición de entrada a la turbina depende de las propiedades críticas de los fluidos, por tanto, la temperatura de entrada a la turbina es  $T_e = 0.97 * T_c$  (Pasinato, 2020).
- Eficiencia isentrópica de la bomba del 85% (Pasinato, 2020).
- Eficiencia isentrópica de la turbina del 80% y eficiencia mecánica del 90% (Castelli, Elsidó, Scaccabarozzi, Nord, & Martelli, 2019).
- La temperatura de salida del fluido orgánico del condensador se fija en 40 °C, puesto que según Fontalvo-Lascán, como se citó en (Sánchez Daza, 2021), es una temperatura ideal para la mayoría de los fluidos orgánicos.
- Se estimó la temperatura de salida del agua utilizada como fluido de enfriamiento en el condensador en 40 °C, con el fin de cumplir con las normas ambientales estipuladas en la resolución 621 de 2015 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Se realizaron las simulaciones para los tres escenarios planteados; sin embargo, a continuación, se presenta el diagrama de procesos correspondiente a el escenario base:

**Figura 7.**

*Simulación del ciclo orgánico de Rankine en Aspen Hysys.*



Los resultados obtenidos en la simulación se presentan a continuación:

**Tabla 5.**

*Valores obtenidos en la simulación del ciclo orgánico de Rankine en Aspen Plus.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>
<b>Flujo másico fluido orgánico (Etanol 96%)</b>	21.74	kmol/h
<b>Calor suministrado por el evaporador</b>	332.7	kWh
<b>Potencia neta producida</b>	53.2	kWh
<b>Potencia neta producida</b>	233,057	kWh/año
<b>Eficiencia térmica ORC</b>	14.75	%

*Fuente: Elaboración propia.*

Los resultados obtenidos muestran que, bajo las condiciones iniciales previamente establecidas, el flujo molar de etanol necesario para extraer 332.7 kWh de energía de la fuente de calor fue de 21.74 kmol/h, generando una potencia de 53.2 kWh y alcanzando una eficiencia térmica de 14.75%. Esta eficiencia se encuentra dentro del rango reportado en literatura para sistemas similares con valores entre 22.1% (Saiz, 2019), 12.72% (Benítez Fundora, 2010) y 3.43% (Amicabile, 2015). La variación de la eficiencia puede atribuirse a diferencias en las condiciones operativas de los procesos, composición del etanol y diseño del sistema. Sin embargo, se deduce que, bajo las condiciones simuladas, el etanol es un fluido orgánico adecuado para aplicaciones en sistemas de recuperación de calor residual.

### **3.1.6. Diseño de equipos que componen el proceso.**

Para realizar el diseño del evaporador y el condensador utilizados en el ORC, se utilizó la interfaz integrada ASPEN EXCHANGER DESIGN & RATING (EDR) de ASPEN PLUS, la cual

permite calcular las dimensiones de los intercambiadores de calor, conforme con la normativa estipulada por TEMA y ASME. Para realizar la simulación se especificaron características de los intercambiadores como tipo de configuración según normas TEMA, ubicación del fluido caliente, distribución de los tubos, entre otros.

Para realizar el diseño de la bomba del ORC, se realizó una comparación entre diferentes bombas hidráulicas (ver Apéndice K), en donde se eligió la bomba centrífuga multietapa para el sistema. Dado que el fluido es etanol, se requiere un material que combine resistencia química con integridad estructural, el acero inoxidable es ampliamente utilizado en la industria química por su excelente comportamiento frente a compuestos orgánicos como el etanol, por lo tanto, se selecciona este material para la bomba y componentes principales (Paz & Lopez, 1993).

Para llevar a cabo el diseño de la turbina, se realizó un análisis comparativo entre los distintos tipos de turbina, tomando en cuenta tanto su tipo de acción (acción o reacción) como su número de etapas (monoetapa o multietapa), según se detalla en el Apéndice L. Tras evaluar las opciones, se seleccionó la turbina de reacción multietapa como la más adecuada para ser implementada en el sistema.

Adicionalmente, para garantizar la continuidad del proceso, es necesario incorporar dos tanques de almacenamiento: uno destinado al agua, empleada en el enfriamiento de gases, y otro para el fluido de trabajo, el etanol (ver Apéndice M).

En la Tabla 6, se presenta un resumen de los equipos que conforman el sistema de aprovechamiento energético, incluyendo sus dimensiones físicas, número de unidades instaladas (incluyendo los equipos de repuesto), potencia, condiciones operacionales y la referencia comercial consultada.

**Tabla 6.**

*Equipos del proceso de aprovechamiento energético de gases de combustión de hornos crematorios.*

Equipo	Dimensiones	Número de equipos	Potencia kW	Condiciones operacionales (T, P)	Referencia
<b>Cámara de aspersión (S-101)</b>	Alto: 3 m Diámetro: 1.5 m	1	N. A	P = 2 bar T = 760 °C	(Made in china)
<b>Tanque de almacenamiento de agua (V-102)</b>	Alto: 3 m Diámetro: 2.64 m	1	N. A.	P = 1 atm T = 25°C	(Dezhou Huili Water Tank Co., s.f.)
<b>Bomba centrífuga multietapa de agua (P-102 A/B)</b>	Largo: 0.62 m Ancho: 0.21 m Alto: 0.25 m	2	1.1	P = 2 bar T = 25 °C	(Alibaba, s.f.)
<b>Bomba centrífuga multietapa de etanol (P-101 A/B/C)</b>	Largo: 0.21m Diámetro: 0.34 m Alto: 1.02 m	3	1.5	P = 20 bar T = 40 °C	(Made in China, s.f.)
<b>Evaporador (E-101)</b>	Diámetro: 2.73 m Largo: 2.4 m	1	N.A.	P = 20 bar T= 301 °C	N.A.
<b>Turbina de reacción multietapa (T-101)</b>	Diámetro: 0.42 m Largo: 1.73 m Alto: 0.97 m	1	53.21	P = 20 bar T = 233 °C	(Anhui Xinning Equipment Co., s.f.)
<b>Condensador (E-102)</b>	Diámetro: 3.24 m Alto: 2.55 m	1	N.A.	P = 1 bar T = 93 °C	N.A.
<b>Tanque de almacenamiento de etanol (V-101)</b>	Alto: 3 m Diámetro: 1.24 m	1	N.A.	P = 1 bar T = 40 °C	(Henan Barui Environmental Protection Equipment Co., s.f.)

### 3.2. Diseño básico

#### 3.2.1. Diseño de tuberías que componen el proceso

Para el diseño de tuberías, se identificaron las líneas de tubería del sistema, especificando su conexión entre equipos. Esto permitió relacionar cada tramo con su función dentro del proceso, el cual se detalla en el Apéndice R. En la siguiente tabla se presentan las tuberías junto a su longitud, el espaciamiento entre equipos, el caudal, el diámetro óptimo, la cantidad de codos, la cédula, el diámetro nominal y el precio de las tuberías.

**Tabla 7.**

*Diámetros de las tuberías del sistema de aprovechamiento energético de gases de combustión de hornos crematorios.*

Línea	Nombre	Espacio entre equipos (m)	Longitud tubería (m)	Codos	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	D óptimo (in)	Cédula (in)	Diámetro nominal (in)	Precio tuberías [COP] (\$)	Referencias
1	32"-FG-100-01-SS	2	3.983	1	5.236	31.496	10	32	475,938.34	(Alibaba, 2013)
2	32"-FG-100-02-SS	2	3.983	1	5.236	31.496	10	32	475,938.34	(Alibaba, 2013)
3	32"-FG-100-03-SS	2	9.995	3	5.236	31.496	10	32	1'194,385.92	(Alibaba, 2013)
4	5"-WC-200-01-PVC	1	0.838	0	0.015	4.724	40	5	296.46	(Alibaba, 2020)
5	5"-WC-200-02-PVC	1	1.894	1	0.015	4.724	40	5	669.93	(Alibaba, 2020)
6	5"-WC-200-03-PVC	1	2.094	3	0.015	4.724	40	5	740.54	(Alibaba, 2020)
7	5"-WC-200-04-PVC	1	0.387	0	0.015	4.724	40	5	137.02	(Alibaba, 2020)
8	5"-WC-200-05-PVC	1	2.025	0	0.015	4.724	40	5	716.18	(Alibaba, 2020)
9	2"-WC-200-06-PVC	1	5.149	1	0.003	2.362	40	2	45,864.60	(Homecenter)
10	3 1/2"-WC-300-07-PVC	1	4.771	2	0.011	3.937	40	3.5	54,845.26	(Homecenter)
11	34"FG-100-04-CS	1	2.099	2	5.154	33.465	5	34	593,334.84	(Alibaba, 2020)
12	24"-FG-100-05-CS	3	7.665	2	3.413	23.622	10	24	247,378.46	(Alibaba, 2020)
13	3 1/2"-ETH-200-01-SS	1	1.915	5	0.027	3.937	40	3.5	74,007.98	(Alibaba, 2023)

APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE GASES DE HORNOS CREMATORIOS 35

<b>14</b>	8"-ETH-200-02-SS	1	2.298	1	0.387	7.874	10	8	21,554.00	(Alibaba, 2017)
<b>15</b>	1"-ETH-200-03-SS	1	8.130	2	0.001	1.181	40	1	756,947.13	(Ferropetrol, 2025)
<b>16</b>	1"-ETH-200-04-SS	1	2.144	1	0.001	1.181	40	1	199,598.21	(Ferropetrol, 2025)
<b>17</b>	1"-ETH-200-05-SS	1	1.425	0	0.001	1.181	40	1	132,682.77	(Ferropetrol, 2025)
<b>18</b>	1"-ETH-200-06-SS	1	1.267	1	0.001	1.181	40	1	117,958.07	(Ferropetrol, 2025)
<b>19</b>	1"-ETH-200-07-SS	1	1.818	1	0.001	1.181	40	1	169,240.44	(Ferropetrol, 2025)
<b>20</b>	1"-ETH-200-08-SS	1	0.836	0	0.001	1.181	40	1	77,804.97	(Ferropetrol, 2025)
<b>21</b>	1"-ETH-200-09-SS	1	10.360	3	0.001	1.181	40	1	964,469.45	(Ferropetrol, 2025)
<b>22</b>	3 1/2"-WC-200-10-PVC	1	1.737	0	0.011	3.937	40	3.5	19,966.04	(Homecenter)
<b>23</b>	1"-ETH-200-10-SS	1	1.425	0	0.001	1.181	40	1	132,682.77	(Ferropetrol, 2025)
<b>24</b>	2"-SL-100-06-CS	1	0.257	0	0.002	1.969	40	2	11,807.94	(Homecenter)
<b>25</b>	32"-FG-100-07-SS	1	14.900	2	5.236	31.496	10	32	1'780,641.13	(Alibaba, 2013)
<b>26</b>	24"-FG-100-08-CS	1	11.747	1	3.413	23.622	10	24	379,097.46	(Alibaba, 2020)
<b>27</b>	ETH-200-11-SS	1	4.976	0	0.048	3.937	40	3.5	28,512.13	(Alibaba, 2023)
									Total	7'957,216.41

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presenta el cálculo estimado de codos requeridos. Para ello, se determinó el número de codos por cada combinación de diámetro nominal y cédula, considerando cada proceso. Los resultados se observan en la siguiente tabla.

**Tabla 8.**

*Codos entre tuberías del sistema de aprovechamiento energético.*

Material	Tamaño	Codos 90°	Precio [COP] (\$)	Referencias
SS	32"	7	1'188,320	(Made in china)
PVC	5"	4	5,941.60	(Alibaba, 2018)
SS	1"	8	102,808	(Ferretería Granada)
SS	3 1/2 "	4	309,087	(Mercado libre)
SS	8"	1	42,440	(Made in china)
PVC	3 1/2"	2	1,950.40	(Alibaba, 2022)
CS	24"	3	242,781.45	(Alibaba, 2014)
Total			1'893,328.45	

*Fuente: Elaboración propia.*

Como resultado del diseño de las tuberías y accesorios, se obtuvo un costo total estimado de \$9'850,544 COP.

### 3.2.2. Análisis HAZOP

En la Tabla 9, se presenta el análisis de riesgos HAZOP, para los principales equipos del proceso de generación eléctrica a partir de los gases de combustión de hornos crematorios. En este análisis se evalúan los principales riesgos asociados a desviaciones que pueden presentarse en parámetros como temperatura, flujo, presión y nivel de líquido. Se identificaron riesgos bajos en equipos como el tanque de almacenamiento de agua (V-102), donde existe el riesgo de posibles desviaciones en el nivel que genere daños a la bomba o afectar la capacidad de enfriamiento de la cámara de aspersión. Sin embargo, estas consecuencias pueden ser mitigadas con alarmas y sistemas de control de nivel automáticos. En riesgos medios se encuentran equipos como el evaporador (E-101) y el tanque de almacenamiento de etanol por sobrepresión, en donde fallos

como el calentamiento excesivo de los equipos u obstrucción en las tuberías en el caso del evaporador, pueden causar pérdidas de contención del fluido, daños en la integridad del equipo y riesgos de ignición. Para mitigar esto, se contempla el uso de válvulas de alivio de presión en el tanque y monitoreo continuo de la presión de los equipos con visualización desde el SCADA, así como interlocks con el fin de garantizar un estado seguro. Finalmente, como riesgos altos se asocian las variaciones que afectan directamente la eficiencia del proceso, como la temperatura de gases de combustión en la cámara de aspersion (S-101) y la temperatura de salida de etanol en el evaporador (E-101) y condensador (E-102), ya que un control inadecuado de este parámetro puede ocasionar daños mecánicos en la turbina y pérdidas significativas en la eficiencia térmica del ORC. Para prevenir estos riesgos, se planteó la implementación de un lazo de control tipo feedforward, sensores en campo, válvulas controladoras de flujo de etanol y gases de combustión, alarmas y una trampa de vapor como salvaguardas.

**Tabla 9.**

*Análisis de riesgos HAZOP del sistema de aprovechamiento energético de gases de combustión de hornos crematorios.*

Equipo	Desviación		Causas	Consecuencias	Riesgo potencial	Salvaguardas
	PG	Parámetro				
<b>Tanque de agua (V-102)</b>	+/-	Nivel	Aumento o disminución excesiva del suministro de agua hacia el tanque. Caída de tensión que saque de línea la bomba de agua.	Riesgo de cavitación o daño en el motor de la bomba. Pérdida en la capacidad de enfriamiento o enfriamiento excesivo de los gases de combustión, pérdidas en la eficiencia térmica del sistema. Pérdida de contención del fluido.	Bajo	Indicador de nivel en campo, transmisor de nivel con visualización en SCADA, que generen alarma por alto (>90%) y bajo nivel (<25%) del tanque, válvula controladora de nivel a la entrada del tanque.
<b>Cámara de aspersión (S-101)</b>	+/-	Temperatura	Variaciones del flujo de entrada de gases de combustión y agua a la cámara de aspersión.	Pérdidas en la eficiencia térmica del sistema. Daños en los alabes de la turbina por paso de condensado de etanol.	Alto	Sensor y transmisor de temperatura en la salida de gases de combustión, con alarmas por alta temperatura, y válvula de control para regular el flujo de agua y ajustar la temperatura.
<b>Tanque de etanol (V-101)</b>	+/-	Nivel	Fuga, consumo en exceso del fluido orgánico, evaporación, fallo en la reposición del fluido manual.	Fallo en la bomba, cavitación, riesgo de inflamación por mezcla de etanol y aire, pérdida de eficiencia del ORC, pérdida de contención de fluido.	Alto	Sensores de nivel, alarma por bajo nivel, inspección del equipo, llenado del tanque de manera manual cada que se requiera verificando el nivel del tanque desde el SCADA.
<b>Tanque de etanol (V-101)</b>	+	Presión	Calentamiento inesperado del fluido que genere evaporación.	Sobrepresión del tanque que pone en riesgo su integridad física, pérdida de contención de fluido, riesgo de ignición.	Medio	Válvula de alivio PSV, con redireccionamiento de fluido a la entrada del condensador.

<b>Evaporador (E-101)</b>	+	Presión	Obstrucción en tubería o carcasa del intercambiador, válvulas de salida cerradas	Daño en la carcasa o tubería, fuga de fluido, riesgo de incendio.	Medio	Sensores y transmisores de presión en carcasa y tubos ubicados en campo, con visualización en SCADA.
<b>Evaporador (E-101)</b>	+/-	Temperatura	Fluctuaciones en el flujo de entrada de gases de combustión al evaporador. Variación en el flujo de entrada de etanol al evaporador.	Estrés térmico del fluido orgánico (etanol) por aumento excesivo de su temperatura, riesgo de fisura o dilatación del equipo, sobrepresión interna, daño en los alabes de la turbina por condensado de etanol.	Alto	Lazo de control tipo <i>feedforward</i> que ajusta el flujo de entrada de gases de combustión al evaporador en función del caudal medido y con referencia a la temperatura de salida del etanol, monitoreo mediante un sensor con alarma por alta y baja temperatura y trampa de vapor en la línea de salida de etanol.
<b>Turbina (T-101)</b>	-	Temperatura	Fallo en la transferencia de calor, aumento de flujo de entrada del etanol.	Condensación dentro de la turbina, daño en los alabes de la turbina, disminución de la eficiencia del ORC.	Medio	Medidores de flujo, sensores de temperatura, válvulas controladoras de flujo.
<b>Condensador (E-102)</b>	+	Presión	Obstrucción en tubería o carcasa, válvulas de salida cerradas.	Daño en la carcasa o tubería, fuga de fluido, riesgo de incendio.	Medio	Medidores de presión en carcasa y tubos, válvulas controladoras de flujo.
<b>Condensador (E-102)</b>	+	Temperatura	Bajo caudal del fluido de enfriamiento, válvula de entrada de agua cerradas.	Fallas en el sistema de enfriamiento del etanol, afectación en la integridad de la bomba (P-101), transferencia de calor deficiente.	Alto	Válvula controladora de flujo del líquido de enfriamiento, medidores de flujo ubicados en la línea de entrada de agua del condensador, sensores de temperatura.

Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis HAZOP anterior, se diseñó un sistema de gestión de alarmas, cuya función principal es alertar al operador del proceso de los potenciales riesgos y fluctuaciones que se presentan en el proceso y que pueden afectar la eficiencia y la seguridad de la operación. Estas alarmas podrán ser visualizadas en el sistema SCADA del operador. En la Tabla 10, se detallan las alarmas para los equipos seleccionados en el análisis de riesgos, junto con sus condiciones de activación.

**Tabla 10.**

*Sistema de gestión de alarmas del sistema de aprovechamiento energético propuesto.*

<b>Equipo</b>	<b>Alarma</b>	<b>Condición de activación</b>	<b>Descripción</b>
<b>Cámara de aspersión (S-101)</b>	Alarma por alta temperatura de gases de combustión (TAH-101).	Se activa cuando la temperatura de salida de los gases de combustión es mayor a 301 °C.	Prevenir el sobrecalentamiento del fluido orgánico en el evaporador.
<b>Tanque de etanol (V-101)</b>	Alarma por bajo nivel del tanque (LAL-201).	Se activa si el nivel del tanque disminuye por debajo del 25% de la capacidad del tanque.	Prevenir cavitación en las bombas P-101 A/B/C.
<b>Tanque de etanol (V-101)</b>	Alarma por alto nivel del tanque (LAH-202).	Se activa si el nivel del tanque aumenta por encima del 90% de la capacidad del tanque.	Prevenir pérdida de contención del fluido.
<b>Tanque de etanol (V-101)</b>	Alarma por bajo bajo nivel del tanque (LALL-203).	Se activa si el nivel del tanque disminuye por debajo del 20% de la capacidad del tanque.	Prevenir cavitación en las bombas P-101 A/B/C.
<b>Evaporador (E-101)</b>	Alarma por baja temperatura de etanol (A301).	Se activa si la temperatura de salida del etanol es menor a 233 °C.	Prevenir que parte del fluido orgánico salga condensado hacia la turbina.
<b>Evaporador (E-101)</b>	Alarma por alta temperatura de etanol (A302).	Se activa si la temperatura de salida del evaporador es mayor a 233 °C.	Prevenir que el fluido orgánico llegue a sufrir estrés térmico.
<b>Condensador (E-102)</b>	Alarma por alta temperatura del etanol (TAH-401).	Se activa si la temperatura de salida del etanol es mayor a 40°C.	Garantizar la temperatura de entrada del etanol al evaporador.
<b>Tanque de agua (V-102)</b>	Alarma por alto nivel del tanque (LAH-501).	Se activa si el nivel del tanque disminuye por debajo del 25% de la capacidad del tanque.	Prevenir cavitación en las bombas P-102 A/B.
<b>Tanque de agua (V-102)</b>	Alarma por bajo nivel del tanque (LAL-502).	Se activa si el nivel del tanque aumenta por encima del 90% de la capacidad del tanque.	Prevenir pérdida de contención del fluido.

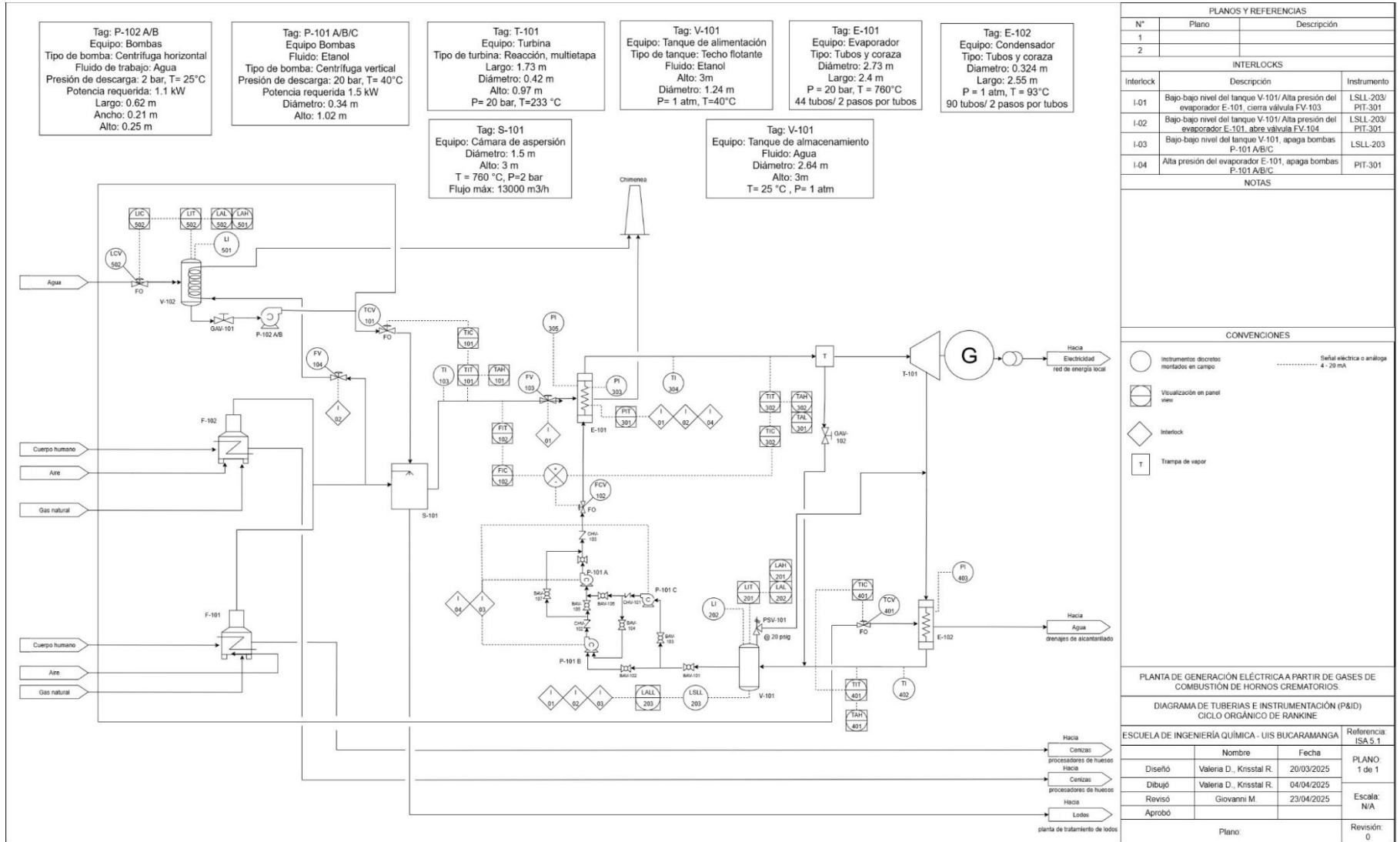
*Fuente: Elaboración propia.*

### ***3.2.3. Diagrama de tuberías e instrumentación - P&ID***

En la Figura 8 se observa el diagrama P&ID del proceso, el cual presenta los lazos de control, interlocks y válvulas de alivio de presión, definidos tras el análisis de riesgos HAZOP. Además, se incluyen las señales de alarmas asociadas a cada equipo para alertar condiciones fuera de rango de operación, así como las posiciones de falla segura de cada válvula de control con el fin de mitigar riesgos y proteger la integridad del sistema. El lazo LIC-502 regula el ingreso de flujo de agua al tanque (V-102), con el fin de mantener un nivel adecuado y evitar pérdidas de contención de fluido. El lazo TIC-101 de la cámara de aspersion (S-101), regula el flujo de entrada al equipo con el fin de controlar la temperatura de los gases de combustión. Los lazos FIC-102 y TIC-302 están conectados a un sumador que opera en modo feedforward, regulando el flujo de etanol hacia el evaporador y la temperatura de salida de este, garantizando la evaporación total del fluido para proteger la integridad de la turbina. Finalmente, lazo TIC-401 regula la temperatura de salida del etanol del condensador (E-102), garantizando que se cumpla la condición inicial de temperatura de entrada de etanol al evaporador (E-101).

Figura 8.

Diagrama de tuberías e instrumentación del proceso de aprovechamiento energético de gases de hornos crematorios.



PLANOS Y REFERENCIAS		
N°	Plano	Descripción
1		
2		

INTERLOCKS		
Interlock	Descripción	Instrumento
I-01	Bajo-bajo nivel del tanque V-101/Alta presión del evaporador E-101, cierra válvula FV-103	LSLL-203/ PIT-301
I-02	Bajo-bajo nivel del tanque V-101/Alta presión del evaporador E-101, abre válvula FV-104	LSLL-203/ PIT-301
I-03	Bajo-bajo nivel del tanque V-101, apaga bombas P-101 A/B/C	LSLL-203
I-04	Alta presión del evaporador E-101, apaga bombas P-101 A/B/C	PIT-301

NOTAS	

CONVENCIONES	
	Instrumentos: discreción montados en campo
	Señal eléctrica o analógica 4 - 20 mA
	Visualización en panel view
	Interlock
	Trampa de vapor

PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE GASES DE COMBUSTIÓN DE HORNO CREMATORIOS.			
DIAGRAMA DE TUBERÍAS E INSTRUMENTACIÓN (P&ID) CICLO ORGÁNICO DE RANKINE.			
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA - UIS BUCARAMANGA		Referencia ISA 5.1	
Nombre	Fecha	PLANO 1 de 1	
Diseño	Valeria D., Knsstal R.		20/03/2025
Dibujó	Valeria D., Knsstal R.		04/04/2025
Revisó	Giovanni M.		23/04/2025
Aprobó		Escala: N/A	
Plano:		Revisión: 0	

**Tabla 11.**

*Lazos de control del sistema de aprovechamiento energético de gases de combustión de hornos crematorios.*

<b>Lazo de control</b>	<b>Tipo de válvula</b>	<b>Variable controlada</b>	<b>Variable manipulada</b>	<b>Posición de falla</b>	<b>Acción del controlador</b>
<b>LIC-502/FCV-502</b>	Electroválvula modulante tipo globo.	Nivel del tanque V-102.	Flujo de agua de entrada al tanque V-102.	Falla abierta (FO), para asegurar el suministro continuo de agua hacia el tanque de agua y por ende hacia la cámara de aspersión y condensador.	Directa (si el nivel del tanque aumenta, la válvula de control debe cerrarse. Por tanto, la señal de control debe aumentar para cerrar la válvula).
<b>TIC-101/TCV-101</b>	Electroválvula modulante tipo globo.	Temperatura de salida de los gases de combustión de S-101.	Flujo de entrada de agua a S-101.	Falla abierta (FO), para mantener el enfriamiento constante de los gases de combustión.	Inversa (si la temperatura de los gases aumenta, la señal del controlador debe disminuir para abrir la válvula).
<b>FIC-102/ TIC-301/ FCV-102</b>	Electroválvula modulante tipo globo.	Flujo de gases de combustión hacia E-101 y temperatura de salida de etanol de E-101 respectivamente.	Flujo de entrada de etanol a E-101.	Falla abierta (FO), para garantizar el intercambio de calor con los gases de combustión.	Inversa (si el flujo de gases aumenta o la temperatura de salida de etanol del E-101 aumenta, es necesario aumentar su flujo de entrada de etanol, por tanto, disminuye la señal para que la válvula se abra).
<b>TIC-401/TCV-401</b>	Electroválvula modulante tipo globo.	Temperatura de salida de etanol de E-101.	Flujo de agua de entrada al E-102.	Falla abierta (FO), garantizando el flujo de agua hacia el condensador E-102 y las condiciones de operación del proceso.	Directa (porque si la temperatura de etanol aumenta, la señal de control debe disminuir, para dar apertura a la válvula).

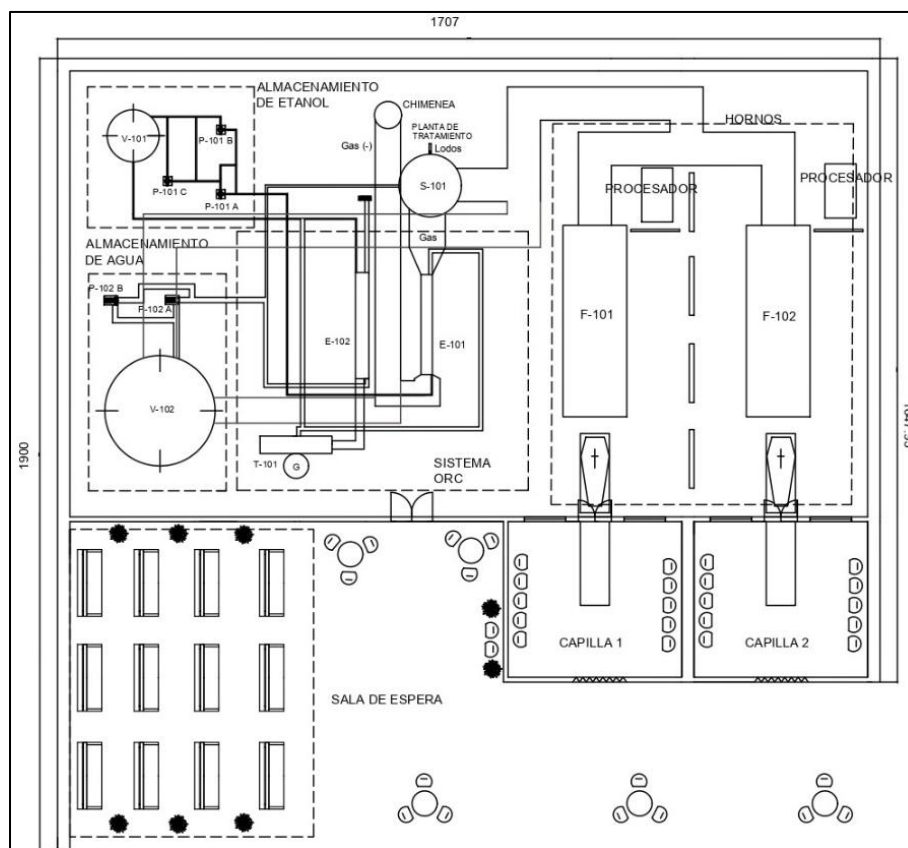
**3.2.4. Plano de la planta y distribución espacial de los equipos**

El plot plan proporciona una representación gráfica general del proceso y de las áreas operativas en el terreno. Para la realización del plano de distribución de la planta con los equipos, se tomó como referencia el plano del horno crematorio disponible en la página oficial de CALTEC, correspondiente al horno elegido. Además, se consultó el libro “*Process Engineering and Plant Design*” de Siddhartha Mukherjee, el cual proporciona lineamientos fundamentales para el diseño adecuado de plantas industriales, incluyendo aspectos como el espaciamiento entre equipos, acceso para mantenimientos, circulación de personal y seguridad operativa (ver Apéndice M).

A partir de lo anterior, se obtuvo el siguiente plano, con unidades en cm:

**Figura 9.**

*Plano de distribución de equipos en planta del sistema de aprovechamiento energético*



Adaptado de: CALTEC Hornos Industriales. Hornos Automáticos “CALTEC” para cremación Jet Burner Gas. [http://www.caltec.com.ar/folletos/et\\_crematorios\\_jet2020ok.pdf](http://www.caltec.com.ar/folletos/et_crematorios_jet2020ok.pdf)

### 3.3. Costos de inversión y capital

#### 3.3.1. Costo de capital

En la Tabla 12, se presentan los costos de capital del sistema, los cuales se estimaron aplicando el método de la curva de costos, la cual considera correcciones por tipo de material del equipo, factor de corrección del equipo y el ajuste por inflación anual. Es importante destacar que el análisis se limitó a los equipos que componen el sistema ORC y a la cámara de aspersión, debido a que el proyecto está diseñado para ser implantado en centros crematorios ya existentes, que cuenten con el espacio físico necesario para realizar la instalación del sistema. Adicionalmente, para la estimación de los costos fijos totales de inversión, se aplicó el método de Lang con un factor de 3.2, el cual contempla los costos asociados a instalación, tuberías, servicios auxiliares, entre otros, necesarios para la puesta en marcha del sistema.

**Tabla 12.**

*Costos de capital CAPEX del sistema de aprovechamiento energético propuesto.*

<b>Equipos</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Precio [USD] (\$)</b>	<b>CAPEX Instalación [USD] (\$)</b>	<b>CAPEX Anualizado (10 años) [USD] (\$)</b>
<b>Turbina T-101</b>	Diámetro: 0.42 m Largo: 1.73 m Alto: 0.97 m	19,999.00	63,996.80	6,399.68
<b>Bomba P-101 A</b>	Largo: 0.21m Diámetro: 0.34 m Alto: 1.02 m	974.00	3,116.80	311.68
<b>Bomba P-101 B</b>	Largo: 0.21m Diámetro: 0.34 m Alto: 1.02 m	487.00	1,558.40	155.84
<b>Bomba P-102</b>	Largo: 0.62 m Ancho: 0.21 m Alto: 0.25 m	890.00	2,848.00	284.80
<b>Tanque V-101</b>	Alto: 3 m Diámetro: 1.24 m	80.00	256.00	25.60
<b>Tanque V-102</b>	Alto: 3 m Diámetro: 2.64 m	1,562.50	5,000.00	500.00
<b>Evaporador E-101</b>	Diámetro: 2.73 m Largo: 2.4 m	28,855.84	92,338.70	9,233.87
<b>Condensador E-102</b>	Diámetro: 3.24 m Alto: 2.55 m	18,338.00	58,681.60	5,868.16

<b>Aspersor S-101</b>	Alto: 3 m Diámetro: 1.5 m	1,299.00	4,156.80	415.68
<b>Tubería y accesorios</b>	Longitud: 121.11 m	2,321.05	7,427.37	742.74
<b>Total</b>		74,806.39	239,380.46	23,195.31

**3.3.2. Costos de operación (OPEX)**

En la Tabla 13, se presentan los costos de operación del sistema para el primer año de operación de la planta, los cuales fueron estimados a partir de precios vigentes en el mercado. En este caso los servicios industriales utilizados fueron únicamente agua y electricidad, sin embargo, aunque en el cálculo del OPEX se incluyó el costo de la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento del proceso, este valor se considera únicamente con fines comparativos, ya que dicha energía es autogenerada por el sistema de generación eléctrica a partir de los gases de combustión de los crematorios, lo cual representa un ahorro potencial para el centro crematorio.

**Tabla 13.**

*Costos de operación OPEX en el primer año de operación del sistema de aprovechamiento energético propuesto.*

<b>Costos de operación (OPEX)</b>	
<b>Servicio</b>	<b>Costo [USD] (\$)</b>
<b>Materia prima</b>	1,856.26
<b>Servicios industriales</b>	3,332.63
<b>Mano de obra</b>	13,142.44
<b>Mantenimiento</b>	1,496.13
<b>Total</b>	19,827.46

**3.3.3. Flujos de caja**

En la Figura 10, se presentan los flujos de caja del proceso de generación eléctrica a partir de gases de combustión provenientes de hornos crematorios. La inversión inicial de proyecto únicamente incluye el costo de maquinaria y equipos, ya que los costos asociados a obras civiles, montaje, puesta en marcha, mobiliario y capacitación personal deberán ser evaluados en una fase posterior proyecto, correspondiente al diseño detallado. Asimismo, no se consideró el costo del

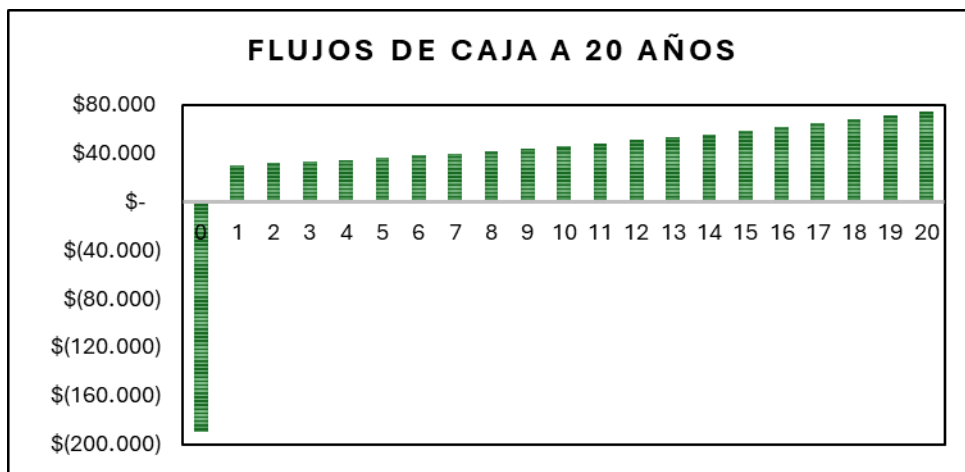
terreno, dado que el sistema está diseñado para ser implementado en centros de cremación existentes, que cuenten con el espacio físico necesario para realizar la instalación. Los costos asociados a insumos y mano de obra pueden ser consultados en el Apéndice O.

Los flujos de caja fueron calculados a partir de los siguientes criterios:

- Horizonte del proyecto a 20 años.
- Inversión inicial \$190,200 dólares estadounidenses.
- Inflación al 5.3% E.A (Expansión (Datosmacro)).
- Impuesto de renta 35% E.A.
- Depreciación lineal.
- Tasa interna de retorno mínima 13% E.A.
- Precio de la electricidad: 0.26 USD/kwh (Empresa de Energía de Santander S.A. (ESSA), 2025).

**Figura 10.**

*Flujos de caja a 20 años del sistema de aprovechamiento energético propuesto.*



**3.3.4. Escenarios del proceso e indicadores financieros.**

Teniendo en cuenta que el flujo ingreso de gas puede fluctuar con el tiempo y no se puede controlar la cantidad que ingresa al ciclo, se plantearon tres (3) escenarios para evaluar la

sensibilidad del sistema: un aumento del 30%, una disminución del 30% y un caso base con flujo constante. Esto con el fin de analizar las posibles fluctuaciones del sistema y verificar su viabilidad ante variaciones en el flujo de entrada de los gases de combustión. En la Tabla 12, se presenta una comparación entre los tres escenarios descritos anteriormente, considerando el flujo de entrada de gas, la cantidad de etanol a utilizar por escenario y la eficiencia del ORC.

**Tabla 14.**

*Comparación entre escenarios propuestos en el diseño de aprovechamiento energético de gases de combustión de hornos crematorios.*

Aspecto	30% más flujo	Escenario base	30% menos flujo
<b>Flujo de gas (kmol/h)</b>	393.98	190.19	120.66
<b>Consumo Etanol (kmol/h)</b>	45.72	21.744	13.68
<b>Eficiencia ORC</b>	15%	14.76%	14.02%

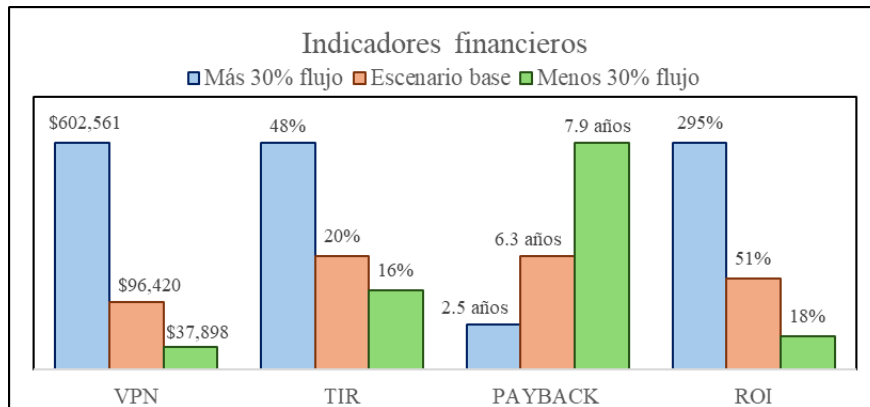
*Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura 11, se presenta una comparación de indicadores financieros, valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR), periodo de recuperación de la inversión (PAYBACK) y retorno sobre la inversión (ROI) para cada uno de los escenarios planteados anteriormente. Los resultados evidencian que el incremento del flujo de entrada de gases de combustión aumenta significativamente la viabilidad financiera del sistema de generación eléctrica. En el escenario con mayor flujo, se alcanza un VPN de \$602,561 USD, con un tiempo de recuperación de 2.5 años y una tasa de retorno del 48%, superando ampliamente tanto el escenario base, como el otro escenario planteado.

Por otra parte, aunque el escenario con un 30% menos de flujo presenta valores más bajos, con un VPN del \$37,898 USD, un tiempo de recuperación de aproximadamente 8 años, es viable financieramente con una TIR de 16%, valor superior a la tasa mínima aceptable de retorno establecida en 13%.

**Figura 11.**

*Indicadores financieros para los escenarios planteados en el diseño de aprovechamiento energético de gases de combustión de hornos crematorios.*

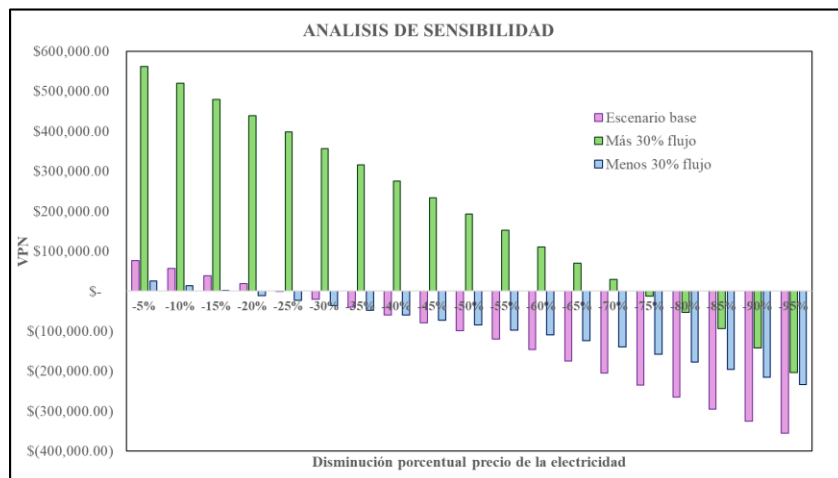


Adicionalmente, se realizó un análisis de sensibilidad aplicado a los tres escenarios presentados anteriormente considerando reducciones progresivas del precio de venta de electricidad (USD/kWh). Para realizar este análisis se plantearon disminuciones porcentuales desde 5% hasta el 95% sobre los ingresos proyectados y se evaluó su efecto sobre el valor presente neto (VPN).

En la Figura 12 se presentan los resultados, los cuales permiten identificar el umbral de rentabilidad del proyecto bajo condiciones desfavorables en el mercado.

**Figura 12.**

*Fluctuaciones en el precio de la electricidad en el sistema propuesto.*



Según la Figura 12, el escenario con 30% más de flujo es el escenario con mayor flexibilidad a las fluctuaciones del precio de la electricidad en el mercado, manteniendo positivo el VPN hasta con un 70% en la disminución del precio. Por otro lado, el escenario base, presenta menos tolerancia a las fluctuaciones del mercado, puesto que se vuelve financieramente inviable al reducir el precio de la electricidad un 25%. Adicionalmente, el escenario más sensible a las fluctuaciones del precio de la electricidad en el mercado es el escenario del 30% menos de flujo, ya que una disminución del 15% en el precio de la electricidad reduce cerca al límite de rentabilidad, y con una reducción del 20% el proyecto deja de ser financieramente viable bajo las condiciones estipuladas, lo que indica que este escenario es el que presenta el menor margen de operación rentable.

Con base en lo anterior, se da respuesta a la pregunta de investigación formulada, estableciendo que el sistema es financieramente viable para los tres escenarios planteados (caso base de flujo 130.84 kmol/h, escenario de menor flujo de 91.59 kmol/h y escenario de mayor flujo 222.43 kmol/h), demostrando una alta adaptabilidad del sistema propuesto. Sin embargo, se deduce que un aumento en el flujo de gases de combustión que ingresa en el sistema, amplía la flexibilidad del proyecto frente a las fluctuaciones que se puedan presentar en el mercado energético. Con lo anterior, el sistema diseñado presenta factibilidad financiera con cierta resiliencia a la disminución del precio de la electricidad.

#### **4. Conclusiones**

- A partir del análisis técnico y financiero realizado, se concluye que el aprovechamiento energético de los gases generados en hornos de cremación mediante un sistema ORC es viable. El diseño demuestra un desempeño técnico adecuado y ganancias proyectadas entre

\$37,898 y \$602,560.51 USD, dependiendo de la variación en los flujos de gases de combustión, que varían entre 25.5 y 62 mol/s, validando la factibilidad del proyecto.

- El aprovechamiento energético de los gases de combustión generados en los hornos crematorios mediante el ORC es técnicamente viable. Para un flujo anual entre 27'214,100 y 82'031,900 kg de gases de combustión, el sistema alcanza eficiencias térmicas entre 14% y 15%, logrando una generación eléctrica estimada entre 146,577 y 489,894 kWh/año y ganancias entre \$28,405 y \$128,360 USD.
- El análisis financiero demuestra que la viabilidad del sistema de propuesto es viable bajo un flujo de gases de entrada de 130.84 kmol/h. Considerando una inversión inicial de maquinaria y equipos de \$190,200 USD y un costo de capital de \$233,380.46 USD, el sistema alcanza una eficiencia de 14.76%, un VPN positivo, una TIR de 27% y un periodo de recuperación de 4.9 años. Estos indicadores superan la tasa mínima de retorno establecida (13%), validando que la implementación del sistema ORC representa una solución eficiente, sostenible y financieramente viable para el aprovechamiento de calor residual de los gases de combustión de los hornos crematorios.
- El análisis de sensibilidad sobre los escenarios planteados demuestra que el escenario con un 30% más de flujo es el que maneja un mejor desempeño, debido a que conserva su rentabilidad ante reducciones en el precio base de la electricidad (0.26 USD/kWh), hasta un 70%. Además, mantiene una relación lineal entre el aumento del flujo de gases de combustión y el requerimiento de fluido de trabajo (etanol), lo cual facilita la escalabilidad del sistema.

## 5. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos se sugiere que, en futuros estudios, se incluya un análisis integral del área de ingeniería eléctrica, con el propósito de evaluar la viabilidad técnico financiero de realizar la conexión del sistema de generación eléctrica a la red eléctrica nacional, además es necesario verificar el cumplimiento normativo vigente en cuanto a seguridad, calidad de energía y compatibilidad con el esquema eléctrico de Colombia.

Adicionalmente, se recomienda avanzar hacia la etapa de diseño detallado, lo cual permitirá precisar las especificaciones técnicas de cada equipo que compone el sistema, realizar una estimación rigurosa de costos de inversión, operación y mantenimiento, e identificar con mayor claridad los requerimientos de infraestructura y servicios auxiliares.

Asimismo, se sugiere profundizar en el diseño del sistema de control desarrollado, revisando la lógica de control, seleccionando los equipos reales como sensores, válvulas y transmisores, y asegurando su correcta integración con un sistema automatizado, como un SCADA, con el fin de garantizar una operación segura y eficiente del proceso.

### Referencias bibliográficas

- Agha, A., Chaudhry, H. N., & Wang, F. (Septiembre de 2018). Diffuser Augmented Wind Turbine (DAWT) Technologies: A Review. *INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH*, 8(3), 1369-1385.
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (1998). *Decreto 475 de 1998 - Normas técnicas de calidad del agua potable*. Obtenido de <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1327&dt=S>
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (24 de Julio de 2020). *Estas son las normas ambientales que debe cumplir un horno crematorio en Bogotá*. Obtenido de Alcaldía Mayor de Bogotá: <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/requisitos-ambientales-que-deben-cumplir-hornos-crematorios-en-bogota>
- Alcaldía Mayor de Bogotá; Secretaría de Planeación. (Noviembre de 2021). Indicadores de consumo de agua y energía eléctrica 2020. Obtenido de [https://www.sdp.gov.co/sites/default/files/indicadores\\_de\\_consumo\\_de\\_agua\\_y\\_energia\\_electrica\\_-\\_bogota\\_d.c.\\_2020\\_vf.pdf](https://www.sdp.gov.co/sites/default/files/indicadores_de_consumo_de_agua_y_energia_electrica_-_bogota_d.c._2020_vf.pdf)
- Alibaba. (s.f.). Obtenido de [https://www.alibaba.com/product-detail/Wholesale-Popular-50zx15-60-Industrial-Centrifugal\\_1601282810056.html?spm=a2700.7735675.0.0.4312fu0Dfu0DJ1&s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/Wholesale-Popular-50zx15-60-Industrial-Centrifugal_1601282810056.html?spm=a2700.7735675.0.0.4312fu0Dfu0DJ1&s=p)
- Alibaba. (2013). Obtenido de [https://www.alibaba.com/product-detail/32-OD-813mm-Sch-10-thk\\_1601456301876.html?spm=a2700.galleryofferlist.p\\_offer.d\\_image.62d013a0xhcVvZ&s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/32-OD-813mm-Sch-10-thk_1601456301876.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_image.62d013a0xhcVvZ&s=p)
- Alibaba. (2014). Obtenido de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/24-Inch-90-Degree-Carbon-Steel-1601265890927.html>
- Alibaba. (2017). ASTMA213 a312 TP304 310S 6 pulgadas 8 pulgadas 20 pulgadas SS 316 Sch 10s Sch40s Tubo inoxidable Tubo soldado de acero. Obtenido de [https://www.alibaba.com/product-detail/ASTMA213-A312-TP304-310s-6inch-8inch\\_1601357166462.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal\\_offer.d\\_image.31c013a01rZrou](https://www.alibaba.com/product-detail/ASTMA213-A312-TP304-310s-6inch-8inch_1601357166462.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.31c013a01rZrou)
- Alibaba. (2018). Tubería de plástico con codo hembra de 90 grados, inyección de tubería Npt de 5 pulgadas, ASTM, PVC, ASTM D2466, 1, 2, 2. Obtenido de [https://www.alibaba.com/product-detail/SAM-UK-ASTM-PVC-ASTM-D2466\\_1601442195365.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal\\_offer.d\\_image.44f413a0vV7ann](https://www.alibaba.com/product-detail/SAM-UK-ASTM-PVC-ASTM-D2466_1601442195365.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.44f413a0vV7ann)
- Alibaba. (2020). Obtenido de <https://www.alibaba.com/product-detail/Rigid-Heavy-Duty-Pvc-Pipe->

20mm\_1601208639242.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal\_offer.d\_image.a24e13a0K2lwte

Alibaba. (2020). High Quality Raw Material Astm 500 24 Inch 10 Inch Schedule 40 Welding Carbon Steel Pipe and Fitting. Obtenido de [https://www.alibaba.com/product-detail/High-Quality-Raw-Material-Astm-500\\_1601298608137.html?spm=a2700.galleryofferlist.p\\_offer.d\\_image.640113a0dSmg0G&s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/High-Quality-Raw-Material-Astm-500_1601298608137.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_image.640113a0dSmg0G&s=p)

Alibaba. (2020). Rigid Heavy Duty Pvc Pipe 20mm Irrigation Water Supply Pipes 5 Inch Sch 40 4 Inch Price. Obtenido de <https://spanish.alibaba.com/product-detail/SS-Pipe-Welded-508mm-34-Inch-1601380873439.html?spm=a2700.7724857.0.0.345f3f1cYza12i>

Alibaba. (2022). Accesorios de drenaje de PVC de alta calidad IFAN, accesorios de Pvc UPVC de 5 pulgadas, conexión de pegamento de PVC ASTM2665, codo y accesorios Upvc. Obtenido de [https://www.alibaba.com/product-detail/IFAN-High-Quality-PVC-Drainage-Fittings\\_1601249020446.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal\\_offer.d\\_image.44f413a0vV7ann](https://www.alibaba.com/product-detail/IFAN-High-Quality-PVC-Drainage-Fittings_1601249020446.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.44f413a0vV7ann)

Alibaba. (2023). Tubo sin soldadura de acero inoxidable 4 "Ss Pipe Sch.40 Ss316 Pipe. Obtenido de [https://www.alibaba.com/product-detail/Stainless-Steel-Seamless-Pipe-4-Ss\\_1601458662882.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal\\_offer.d\\_image.3eef13a0PDWtoU](https://www.alibaba.com/product-detail/Stainless-Steel-Seamless-Pipe-4-Ss_1601458662882.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.3eef13a0PDWtoU)

Alibaba. (2025). *Hot Sale n-pentane at Purity 95%–99%*. Recuperado el 14 de Febrero de 2025, de [https://www.alibaba.com/product-detail/Hot-Sale-N-pentane-at-Purity\\_1600808702573.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Hot-Sale-N-pentane-at-Purity_1600808702573.html)

Amicabile, S. L. (2015). *A comprehensive design methodology of organic Rankine cycles for the waste heat recovery of automotive heavy-duty diesel engines* (Vol. 87). Applied Thermal Engineering. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.034>

Anhui Xinning Equipment Co. (s.f.). *Made in China*. Obtenido de [https://es.made-in-china.com/co\\_grindingballsupplier/product\\_Small-Power-Plant-Steam-Turbine-100-Kw-500-Kw-1250-Kw-1500-Kw-1600-Kw-1800-Kw-3000-Kw\\_rgoyoyhsg.html](https://es.made-in-china.com/co_grindingballsupplier/product_Small-Power-Plant-Steam-Turbine-100-Kw-500-Kw-1250-Kw-1500-Kw-1600-Kw-1800-Kw-3000-Kw_rgoyoyhsg.html)

ASME. (s.f.). B31.3 Process Piping. Obtenido de <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b31-3-process-piping>

Bao, J., & Zhao, L. (2013). *A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle* (Vol. 24). doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.040>

Becerra Rodríguez, M., Aguilar Díaz, V. J., Bernardino González, J., Santana Ramírez, F., & Serrano García, J. L. (2022). Ciclo de Rankine. *9(17)*, 32-35. México. Obtenido de <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/tepexi/article/view/7511/8455>

- Benítez Fundora, D. M. (2010). *Comportamiento termodinámico de un ORC operando con varias sustancias para el aprovechamiento de fuentes térmicas de bajo potencial* (Vol. 2). Revista Ingeniería Energética. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5074388>
- Branan, C. (s.f.). *Rules of thumb for chemical engineers* (Tercera ed.).
- CALTEC Hornos Industriales. (s.f.). *Hornos automáticos CALTEC para cremación Jet Burner Gas*. Recuperado el 2025, de [http://www.caltec.com.ar/folletos/et\\_crematorios\\_jet2020ok.pdf](http://www.caltec.com.ar/folletos/et_crematorios_jet2020ok.pdf)
- Carl Roth. (2021). *Ficha de datos de seguridad: Agua*. Obtenido de <https://www.carlroth.com/medias/SDB-1543-ES-ES.pdf?context=bWFzdGVyfHNlY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wyMjkwMjh8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfHNlY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0cy9oOWQvaDhiLzkwMjQ1NjI3MjQ0OTUcGRmfGMxY2JhZDljZWYzZmNkOWQ1MmM5YjFjODVkaWVvInDk2ZTBhOTVhYmI5NDMyNGQzZDQ1Njc4>
- Carl Roth. (2024). *Ficha de datos de seguridad: Etanol*. Obtenido de <https://www.carlroth.com/medias/SDB-T171-ES-ES.pdf?context=bWFzdGVyfHNlY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wzMDU5NjF8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfGFERm1MMmhrWVM4NU1UYzFOelV6T0RFNE1UUXIMMU5FUWw5VU1UY3hYMFZUWDBWVExuQmtaZ3w0MjJjZmRiOWZmZTc1MWI4Y2NmNDVhZTcwNjA1MWQ1YmI1MmM0Njk3YjFk>
- Carl Roth. (2024). *Ficha de datos de seguridad: n-Heptano*. Obtenido de <https://www.carlroth.com/medias/SDB-CP78-ES-ES.pdf?context=bWFzdGVyfHNlY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wzZmMjM3MTJ8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfGFHVTRMMmc1WWk4NU1UYzJPVfKxTURJeE56STJMMU5FUWw5RFVEYzRYMFZUWDBWVExuQmtaZ3w1YzFmMzIxYzZjMzZmMmQyYWMwMjg4NjUyMDBhZTFIN2Y4NTc1NmMzMDZj>
- Carl Roth. (2025). *Ficha de datos de seguridad: Benceno*. Obtenido de <https://www.carlroth.com/medias/SDB-7173-ES-ES.pdf?context=bWFzdGVyfHNlY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wzMjE0MDF8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfGFESmlMMmc1Tmk4NU1qQXhPRFkwTURRNE5qY3dMMU5FUWw4M01UY3pYMFZUWDBWVExuQmtaZ3w4YzYzZDk2ZmE4OWU0NGNiOTk3NTk5M2I0OWM5MjQ1YjNjNGQzYTJjMjg3>
- Carl Roth. (2025). *Ficha de datos de seguridad: n-Pentano*. Obtenido de <https://www.carlroth.com/medias/SDB-CN99-ES-ES.pdf?context=bWFzdGVyfHNlY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wzMTczOTZ8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfGFEGxMMmewTUM4NU1qQXhPRFkyTVRFek1EVTBMM>

U5FUWw5RFRqazVYMFZUWDBWVExuQmtaZ3w5OTY5ZDhmYjRkYWZmM2Ew  
MjIxNDEyNTRiZDQxNWQ5OTlkNzQyMGEyYmZl

Carl Roth. (2025). *Ficha de datos de seguridad: Tolueno*. Obtenido de <https://www.carlroth.com/medias/SDB-9558-ES-ES.pdf?context=bWFzdGVyfHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wzMTgzOTB8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfGFY3hMMmhoTmk4NU1qQXlOak01TVRRU9UUXIMMU5FUWw4NU5UVTRYMFZUWDBWVExuQmtaZ3w1NTg2NWU2NmFmZWZWNiZWVjMGQyYzI3NTdmNTY5OTFhNDBhNzEzNDY3ZjU4>

Castellanos Villamil, J. C. (2023). *Evaluación técnico-económica de tecnologías de aprovechamiento energético de gases de combustión*.

Castelli, A. F., Elsidio, C., Scaccabarozzi, R., Nord, L. O., & Martelli, E. (2019). *Optimization of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery From Aluminum Production Plants* (Vol. 7). *Frontiers in Energy Research*. doi:<https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00044>

Chapoñan Mondragón, L. M., & Alvarado Silva, C. A. (2020). *Diseño de un horno crematorio para el manejo de cadáveres por COVID-19 en la provincia de Chiclayo*. Pimental, Perú. Obtenido de <https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/9461/Chapo%c3%b1%c3%a1n%20Mondrag%c3%b3n%2c%20Luis%20Miguel.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

China, M. i. (2022).

Clemente Mirafuentes, C. M. (2014). ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DE GRIETAS EN ÁLABES DE TURBINAS DE VAPOR.

Cofrico. (2024). *Tipos de intercambiadores de calor y sus características*. Obtenido de <https://www.cofrico.com/consejos-tecnicos/tipos-de-intercambiadores-de-calor/>

Comisión de Regulación de Energía y Gas. (Resolución 174 de 2021). Resolución 174 de 2021. Obtenido de <https://chatgpt.com/c/684f7508-6464-8013-99bb-f03c97f58f18>

CoolProp. (s.f.). Obtenido de <http://www.coolprop.org/contents.html>

CORESA. (2022). Obtenido de <https://www.grupocoresa.com/refrigerante-freon-123-r-123-tambor-de-45-4kg-7603>

Corficolombiana. (2024). Obtenido de <https://investigaciones.corficolombiana.com/web/investigaciones-economicas/detalle-commodities>

Corficolombiana, Paniguana, R. C., & Duarte Pérez, A. (24 de Mayo de 2021). Generación eléctrica en Colombia y su transición hacia fuentes renovables no convencionales. Colombia. Obtenido de

<https://investigaciones.corficolombiana.com/documents/38211/0/Generaci%C3%B3n%20el%C3%A9ctrica%20en%20Colombia%20y%20su%20transici%C3%B3n%20hacia%20Fuentes%20Renovables%20No%20Convencionales.pdf/5ffcba57-f7b8-f4b6-35c0-ae9302bd1a0a>

Corte Constitucional de Colombia. (2017). *Sentencia C-565 de 2017*. Obtenido de C-565/17 Corte Constitucional de Colombia

Cruz Sánchez, J. P., & Mendoza Hebert, C. O. (2017). *Revisión de turbinas de viento aumentadas por un difusor para vientos de baja velocidad* (Vol. 1). Obtenido de <https://revistas.uaq.mx/index.php/sketchin/article/view/421>

Dezhou Huili Water Tank Co. (s.f.). *Alibaba*. Obtenido de [https://www.alibaba.com/product-detail/Corrugated-Galvanized-Steel-Water-Tank-Suppression\\_1600901190566.html?spm=a2700.galleryofferlist.p\\_offer.d\\_image.780213a06DEZRd&s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/Corrugated-Galvanized-Steel-Water-Tank-Suppression_1600901190566.html?spm=a2700.galleryofferlist.p_offer.d_image.780213a06DEZRd&s=p)

Díaz Castro, B. E., Rojas Vargas, M. A., Sotelo Jiménez, D. E., & Theran Suárez, N. A. (2020). *Heurística de los intercambiadores de calor*. Universidad del Atlántico.

El Congreso de Colombia. (Ley 142 de 1994). Ley 142 de 1994. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2752>

El Congreso de Colombia. (Ley 143 de 1994). Ley 143 de 1994. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4631>

El Congreso de Colombia. (Ley 2294 de 2023). Ley 2294 de 2023.

El Congreso de la Republica. (Ley 2099 de 2021). Obtenido de Ley 2099 de 2021: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326>

El Congreso Nacional de Colombia. (Ley 1715 de 2014). *Ley 1715 de 2014*. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>

El Presidente de la República de Colombia. (Decreto 2236 de 2023). Decreto 2236 de 2023. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=227230>

Electrificadora de Santander S.A E.S.P. (2025). *Tarifas abril 2025*. Obtenido de <https://www.essa.com.co/site/Portals/0/documentos/mi-factura/tarifas/2025/Tarifa%20Mayo%202025.pdf>

Empresa de Energía de Santander S.A. (ESSA). (Abril de 2025). Tarifas de energía eléctrica. Obtenido de <https://www.essa.com.co/site/Portals/0/documentos/mi-factura/tarifas/2025/Tarifa%20Abril%202025.pdf>

- Enríquez Paredes, X. A., & Mas Bautista, R. E. (2024). *Diseño de un horno crematorio privado por combustión para mascotas con una capacidad máxima de 30 kg*. Lima, Perú. Obtenido de <https://tesis.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/5fe9b695-ea52-473c-a83e-c1c8b28a4d2e/content>
- Equimiseg Ltda. (s.f.). *Hoja de datos de seguridad : R-123*. Recuperado el 2025, de <https://equimiseg.com/imagenes/productos/pdf/a-1/HOJA%20DE%20SEGURIDAD/AL-EQUIMISEG.pdf>
- Escobar, D. I. (2014). Obtenido de Estudio Psicrométrico y Análisis Técnico de Aplicación de Aire Acondicionado en Mina Cobriza: <https://www.mineflows.com/wp-content/uploads/2022/03/Estudio-Psicrometrico-y-Analisis-Tecnico-de-Aplicacion-de-Aire-Acondicionado-en-Mina-Cobriza-1.pdf>
- Expansión (Datosmacro). (s.f.). *IPC de Colombia*. Recuperado el Abril de 2025, de <https://datosmacro.expansion.com/ipc-paises/colombia>
- Fernández, C. N. (2017). Diseño preliminar de un ciclo orgánico de Rankine solar para el suministro eléctrico a una PYME. Obtenido de [https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/43575/TFM\\_Carlos%20N%FA%F1ez%20Fern%20andez.pdf;jsessionid=0E18131E55C1748B5F4021C367C0FCCC?sequence=3](https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/43575/TFM_Carlos%20N%FA%F1ez%20Fern%20andez.pdf;jsessionid=0E18131E55C1748B5F4021C367C0FCCC?sequence=3)
- Ferretería Granada. (s.f.). CODO 90° 1" ACERO INOXIDABLE 304 3A SANITARIO PE HOPE. Obtenido de <https://granadaycia.com/tipo-soldar-acero-inoxidable-r1233/codo-90-1-acero-inoxidable-304-3a-sanitario-pe-hope>
- Ferropetrol. (2025). Tubo de Acero Inoxidable 304 SCH 40, Diámetro 1", Precio por Metro. Obtenido de <https://ferropetrol.com/products/tubo-acero-inoxidable-304-sch-40-1-precio-por-metro>
- Fiter, L. S.-J. (2012). *Aplicación del Ciclo Orgánico de Rankine para el aprovechamiento de calor residual en una refinería*. Madrid.
- Flores, E. R. (s.f.). *Tipos de intercambiadores de calor* (Vol. 3). 2021. Obtenido de <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/ixtlahuaco/article/view/6847/7840>
- Flores, J. M., Campos, J. H., Sánchez, A. M., Bustos, J. A., & José, M. N. (14 de Noviembre de 2019). OPTIMIZACIÓN PARAMÉTRICA MULTI-OBJETIVO DE CICLOS DE POTENCIA RANKINE, UTILIZANDO TÉCNICAS DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS DE TAGUCHI. *14*, 1250-1272. Obtenido de <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/2043/1691>
- Funeral natural. (2022). *Funcionamiento de un horno crematorio*. España. Obtenido de <https://www.funeralnatural.net/articulos/funcionamiento-de-un-horno-crematorio>

- Ghanbari, M., Ahmadi, M., & Lashanizadegan, A. (2016). A comparison between Peng-Robinson and Soave-Redlich-Kwong Cubic Equations of State from modification perspective. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cryogenics.2017.04.001>
- Gómez Daza, F. A., Lopez Rico, P. A., Villalobos Perez, E., Castro, R., & Marley, L. (2017). *Diseño y modelamiento de un intercambiador de calor bajo la normatina TEMA y ASME*. Obtenido de <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/4785>
- Gómez Díaz, A. (2015). *Diseño e instalación de un horno crematorio en una nave industrial*. Obtenido de <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/6685/376335.pdf>
- Gómez, M. R. (2019). *Aprovechamiento energético mediante ciclo orgánico de rankine*.
- González-Mendizabal, D. (2002). *GUIA DE INTERCAMBIADORES DE CALOR: TIPOS GENERALES Y APLICACIONES*. Obtenido de <https://fransp.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/07/intercambiadores-de-calor-tipos-generales-y-aplicaciones.pdf>
- Gordillo, J. F. (2007). Diseño de una terminal de almacenamiento de etanol de 10 millones de litros cumpliendo con las normas NFPA. Obtenido de <https://repositorio.uvg.edu.gt/xmlui/bitstream/handle/123456789/1519/Trabajo%20de%20Graduaci%C3%B3n%20Jos%C3%A9%20Fernando%20Noriega.pdf?sequence=1>
- Heberle, F., & Brüggemann, D. (2016). *Thermo-Economic Analysis of Zeotropic Mixtures and Pure Working Fluids in Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery*. doi:<https://doi.org/10.3390/en9040226>
- Henan Barui Environmental Protection Equipment Co. (s.f.). Obtenido de [https://es.made-in-china.com/co\\_energyrecycling/product\\_5000-M3-Industrial-Floating-Roof-Alcohol-Ethanol-Gasoline-Storage-Tank-Installation-Design\\_ysgshgeoog.html?pv\\_id=1ipq8em37031&faw\\_id=1ipq8emebd9c&bv\\_id=1ipq8i4lead5&pbv\\_id=1ipq8el4r13](https://es.made-in-china.com/co_energyrecycling/product_5000-M3-Industrial-Floating-Roof-Alcohol-Ethanol-Gasoline-Storage-Tank-Installation-Design_ysgshgeoog.html?pv_id=1ipq8em37031&faw_id=1ipq8emebd9c&bv_id=1ipq8i4lead5&pbv_id=1ipq8el4r13)
- Heredero, L. (29 de Abril de 2011). *Reciclar energía de la muerte*. Obtenido de BBC mundo: [https://www.bbc.com/mundo/noticias/2011/04/110429\\_verde\\_reciclar\\_energia\\_crematorio\\_lh](https://www.bbc.com/mundo/noticias/2011/04/110429_verde_reciclar_energia_crematorio_lh)
- homecenter. (s.f.). Obtenido de <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/65897/tubo-2x6m-presion-21-200-psi/65897/>
- homecenter. (s.f.). Tubo 4x6m Presión 21-200 psi. Obtenido de <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/00985/tubo-4x6m-presion-21-200-psi/00985/>
- Honeywell. (2017). *Safety data sheet: Genetron 245fa*. Obtenido de [https://www.hudson-tech.com/pdfs/SDS/R245fa/Honeywell\\_R245FA\\_SDS.pdf](https://www.hudson-tech.com/pdfs/SDS/R245fa/Honeywell_R245FA_SDS.pdf)

- Jiménez García, J. C., Ruiz, A., Pacheco Reyes, A., & Rivera, W. (2023). *Una revisión completa de los ciclos orgánicos de Rankine*. doi: <https://doi.org/10.3390/pr11071982>
- Lamberto, B. (2018). Una evaluación termoeconómica de mezclas de hidrocarburos ligeros en plantas de energía geotérmica ORC. Obtenido de <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/154543>
- Made in China. (s.f.). Obtenido de <https://china-gexin.en.made-in-china.com/product/oFzTGkKMncab/China-High-Pressure-Stainless-Steel-4kw-5-5HP-Power-Vertical-Multistage-Impellers-Centrifugal-Pump-Price.html>
- Made in china. (s.f.). 316 316L 316h 316ti Seamless Stainless Steel Pipe Fitting Elbow. Obtenido de [https://ezsteel.en.made-in-china.com/product/mZoaMDvdZGbE/China-316-316L-316h-316ti-Seamless-Stainless-Steel-Pipe-Fitting-Elbow.html?pv\\_id=1iul6pp3c130&faw\\_id=1iul6r0p38f2&bv\\_id=1iul6tun1f8b&pbv\\_id=1iul6pnd507e](https://ezsteel.en.made-in-china.com/product/mZoaMDvdZGbE/China-316-316L-316h-316ti-Seamless-Stainless-Steel-Pipe-Fitting-Elbow.html?pv_id=1iul6pp3c130&faw_id=1iul6r0p38f2&bv_id=1iul6tun1f8b&pbv_id=1iul6pnd507e)
- Made in china. (s.f.). *China PP Material Exhaust Gas Stainless Steel Spray Tower for Acid Gas*. Recuperado el 15 de Mayo de 2025, de <https://jiutaidusting.en.made-in-china.com/product/NEfUMpYcsORa/China-PP-Material-Exhaust-Gas-Stainless-Steel-Spray-Tower-for-Acid-Gas.html>
- Made in china. (s.f.). Ezs Fittings Codo 45D Elbow Acero Inoxidable Tp316 Rl Ced 10. Obtenido de [https://ezsteel.en.made-in-china.com/product/AnxptOUjFGcE/China-Ezs-Fittings-Codo-45D-Elbow-Acero-Inoxidable-Tp316-Rl-Ced-10.html?pv\\_id=1iul62rdu3cb&faw\\_id=1iul62rug410&bv\\_id=1iul65munedc&pbv\\_id=1iul62pp5779](https://ezsteel.en.made-in-china.com/product/AnxptOUjFGcE/China-Ezs-Fittings-Codo-45D-Elbow-Acero-Inoxidable-Tp316-Rl-Ced-10.html?pv_id=1iul62rdu3cb&faw_id=1iul62rug410&bv_id=1iul65munedc&pbv_id=1iul62pp5779)
- Mahmoudi, A., & M. Fazli, M. M. (2018). *Una revisión reciente de la recuperación de calor residual mediante el ciclo orgánico de Rankine* (Vol. 143). doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.136>
- Malik, A. U., A. S., Al-Fozan, & Al-Muaili, F. (2015). *Corrosion of heat exchanger in thermal desalination plants and current trends in material selection* (Vol. 55). doi:<https://doi.org/10.1080/19443994.2014.940642>
- Mann, H. S., & Singh, P. K. (Mayo de 2016). Conceptual development of an energy recovery from the chimney flue gases using ducted turbine system. Punjab, India. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2016.05.044>
- Mann, H., & Singh, P. (2018). *Effect of number of blades in ducted turbine system on kinetic energy extraction from chimney flue gases – benchmarking with wind energy system* (Vol. 32). Journal of Mechanical Science and Technology.

- Marchi, B., Nardin, G., Barazzutti, A., & Giust, F. (2023). Environmental and Energetic Performance of Crematorium Plants. En *Chemical Engineering Transactions* (págs. 667-672). 99. doi:<https://doi.org/10.3303/CET2399112>
- Marketizer. (2022). Obtenido de [https://www.marketizer.com/products/ammonium-1s-7-7-dimethyl-2-oxobicyclo2-2-1hept-1-ylmethanesulphonate-52630301541/prices.htm?mkt\\_campaign=3&mkt\\_medium=52630301541&mkt\\_source=22&mkt\\_term=4\\_Contentido\\_Ver\\_mas\\_secciones](https://www.marketizer.com/products/ammonium-1s-7-7-dimethyl-2-oxobicyclo2-2-1hept-1-ylmethanesulphonate-52630301541/prices.htm?mkt_campaign=3&mkt_medium=52630301541&mkt_source=22&mkt_term=4_Contentido_Ver_mas_secciones)
- Marquina, A. M. (2023). Análisis de la viabilidad de integración de ORC para la recuperación de calor residual de un motor de combustión interna alimentado con biogás en cascavel, pr. Obtenido de <https://dspace.unila.edu.br/server/api/core/bitstreams/f541ebbf-2b90-459e-a1d5-f38b3ab2c3c4/content>
- Méndez, F. A. (2018). Evaluación técnica, económica y ambiental de alternativas de autogeneración de electricidad o cogeneración, a partir de biomasa residual para la empresa planta productora de aceite de palma africana, "INVERSIONES LA MEJORANA", en el Departamento del Meta. Bogotá, Colombia.
- Mercado libre. (s.f.). 4 Tubo De Codo De Escape De 90 Grados Acero Inoxidable 3.5". Obtenido de [https://www.mercadolibre.com.co/4-tubo-de-codo-de-escape-de-90-grados-acero-inoxidable-35/p/MCO2007367262#polycard\\_client=search-nordic&searchVariation=MCO2007367262&position=7&search\\_layout=stack&type=product&tracking\\_id=b97f8d11-edaa-4cc6-a886-b82752ed7](https://www.mercadolibre.com.co/4-tubo-de-codo-de-escape-de-90-grados-acero-inoxidable-35/p/MCO2007367262#polycard_client=search-nordic&searchVariation=MCO2007367262&position=7&search_layout=stack&type=product&tracking_id=b97f8d11-edaa-4cc6-a886-b82752ed7)
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 631 de 2015, por la cual se establece los parámetros y valores límites máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y al sistema de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-631-de-2015.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s.f.). *Tasa por uso de agua*. Recuperado el 2025, de <https://www.minambiente.gov.co/negocios-verdes/tasa-por-uso-del-agua/#1731957615043-2cd24dab-0524>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (5 de Junio de 2018). Resolución Número 909 de 5 de Junio de 2018.
- Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2006). *Fundamentals Of Engineering Thermodynamics*. 5.
- Naranjo Contento, A. L., Velasco Jaramillo, E. J., & Zambrano Arejuela, O. I. (2022). *Estudio y diseño funcional de un horno crematorio energizado termicamente con resistencias eléctricas*. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/22763/1/CD%2012236.pdf>

- NASER RUCSA. (s.f.). *Hornos crematorios para humanos*. Recuperado el 2025, de [https://naserrucsa.com/wp-content/uploads/2023/04/diptico\\_rucsa\\_humanos\\_23.pdf](https://naserrucsa.com/wp-content/uploads/2023/04/diptico_rucsa_humanos_23.pdf)
- Núñez, A. A. (Enero de 2018). DISEÑO DE UN CONCENTRADOR DE VIENTO PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DE LAS MICROTURBINAS EÓLICAS EN EL AMBIENTE URBANO. Querétaro, México.
- Ortiz Libreros, J. M. (2019). *Evaluación del impacto en la calidad del aire de las actividades de un horno de cremación de un camposanto en la zona urbana del municipio de Santiago de Cali*. Santiago de Cali. Obtenido de [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/86613434/T08598-libre.pdf?1653758639=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DEvaluacion\\_del\\_impacto\\_en\\_la\\_calidad\\_del.pdf&Expires=1727453944&Signature=HhJAPU3rWmqLXsjP8naMEWLFznlGIXhGnW2qc332VrN-Zz4Rjr0Hsfa](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/86613434/T08598-libre.pdf?1653758639=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DEvaluacion_del_impacto_en_la_calidad_del.pdf&Expires=1727453944&Signature=HhJAPU3rWmqLXsjP8naMEWLFznlGIXhGnW2qc332VrN-Zz4Rjr0Hsfa)
- Osuna, L. M. (2024). Análisis técnico-económico de la producción de compuestos aromáticos a partir de metanol.
- Otero, D. (2022). El sector eléctrico explica menos del 5% de las emisiones en Colombia. Más Colombia. Obtenido de <https://mascolombia.com/el-sector-electrico-explica-menos-del-5-de-las-emisiones-en-colombia/amp/>
- Paredes, S. F. (8 de abril de 2015). ANÁLISIS TERMODINAMICO DE LOS CICLOS DE RANKINE. España. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/25938/TFG%20Sergi%20Fuste.pdf>
- Pasinato, H. D. (2020). *Working fluid dependence on source temperature for Organic Rankine Cycles* (Vol. 142). doi:10.1115/1.4045383
- Paz, F. S., & Lopez, E. S. (1993). *Manual para selección y diseño de bombas*. Obtenido de [https://red.uao.edu.co/entities/publication/e0f73fd3-44dd-4ac1-a7d7-8adb7eb74c5e?utm\\_source=chatgpt.com](https://red.uao.edu.co/entities/publication/e0f73fd3-44dd-4ac1-a7d7-8adb7eb74c5e?utm_source=chatgpt.com)
- Perry, R. H., & Green, D. W. (2008). *Chemical Engineers' Handbook*. Obtenido de [https://students.aiu.edu/submissions/profiles/resources/onlineBook/z5y2E6\\_Perry-s\\_Chemical\\_Engineers-\\_Handbook.pdf](https://students.aiu.edu/submissions/profiles/resources/onlineBook/z5y2E6_Perry-s_Chemical_Engineers-_Handbook.pdf)
- Pinzon Camacho, E. J. (2018). Evaluación del potencial técnico y económico de plantas de generación eléctrica basadas en calderas a biomasa y ciclo Rankine orgánico (ORC) para el aprovechamiento de la cascarilla de arroz en Ecuador. Ecuador. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19464/1/CD-8859.pdf>
- Plata, A. D., & Rincon, Y. A. (2022). Estudio económico de la implementación del ciclo binario combinado para la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de

- recursos geotérmicos en la zona de "Tufiño-Chiles-Cerro negro". Obtenido de [https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/17646/2022\\_Tesis\\_Angie\\_Daniela\\_Prada.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/17646/2022_Tesis_Angie_Daniela_Prada.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Presidente de la República de Colombia. (Decreto 1073 de 2015). Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=77887>
- Rendon Valles, J. A., & Cardona Sepulveda, L. F. (2017). *Análisis de eficiencia energética de los hornos crematorios del cementerio San Pedro*. Medellín, Colombia. Obtenido de <https://repositorio.itm.edu.co/bitstream/handle/20.500.12622/76/RendonValleJohanAlexis2017.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- República de Colombia. (2021). Estrategia climática de largo plazo de Colombia E2050 para cumplir con el acuerdo de París. Obtenido de [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/COL\\_LTS\\_Nov2021.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/COL_LTS_Nov2021.pdf)
- Rivas, G. A., & Amórtegui, C. H. (2014). *Diseño y simulación de una turbina de vapor cuatro etapas para el laboratorio de térmicas y fluidos de la universidad de libertadores*. Obtenido de <https://repository.libertadores.edu.co/server/api/core/bitstreams/a1eac67e-4970-4564-8d80-58f9ed4928be/content>
- Ruiz-Cabañas, F. J., Prieto, C., Jové, A., Madina, V., Fernández, A. I., & Cabeza, L. F. (2018). *Steam-PCM heat exchanger design and materials optimization by using Cr-Mo alloys* (Vol. 178). Solar Energy Materials and Solar Cells. doi:doi:10.1016/j.solmat.2
- Saiz, D. T. (2019). Simulación y optimización de ciclos de potencia orgánicos rankine (ORCs) con diferentes fluidos aplicados a energía solar de concentración. Obtenido de [https://oa.upm.es/55982/1/TFG\\_DIEGO\\_TORESANO\\_SAIZ.pdf](https://oa.upm.es/55982/1/TFG_DIEGO_TORESANO_SAIZ.pdf)
- Sánchez Daza, J. E. (2021). *Optimización térmica y económica de un ciclo Rankine orgánico que aprovecha el calor residual de los motores de combustión interna*. Obtenido de [https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/14058/2021\\_Tesis\\_Jesus\\_Sanchez\\_Daza.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/14058/2021_Tesis_Jesus_Sanchez_Daza.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Sánchez, L. (2012). *Aplicación del ciclo orgánico de Rankine para el aprovechamiento de calor residual en una refinería*. Obtenido de [https://oa.upm.es/15019/1/PFC\\_Laia\\_Sanchez\\_Junco\\_Fiter.pdf](https://oa.upm.es/15019/1/PFC_Laia_Sanchez_Junco_Fiter.pdf)
- Sandoval, E. U. (Febrero de 2018). Cálculo numérico del cambio de fase a diferentes condiciones de operación en la última etapa de una turbina de vapor. Obtenido de [http://www.riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/412/MASRND13\\_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/412/MASRND13_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Seader, J. D., Henley, E. J., & Roper, D. K. (2011). *Separation Process Principles* (7 ed.).

- Shah, R., & Sekulic, D. (2003). *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. Obtenido de <https://windyhm.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/11/fundamentals-of-heat-exchanger-design-0471321710.pdf>
- Sistema de Información ambiental de Colombia SIAC. (2020). Cantidad de hornos crematorios por autoridad ambiental. Obtenido de <https://siac-datosabiertos-mads.hub.arcgis.com/apps/MADS::autoridades-ambientales-hornos-crematorios/explore>
- Spraying Systems Co. (2016). Obtenido de Patrones de aspersión, Aspersión Fina: <https://www.spray.com/es-mx/recursos/principios-b%C3%A1sicos-de-aspersi%C3%B3n/patrones-de-aspersi%C3%B3n/aspersi%C3%B3n-fina>
- Spraying Systems Co. (2016). *Enfriamiento por evaporación: la mejor manera de enfriar gases calientes y reducir emisiones*. Obtenido de <https://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/156307-Enfriamiento-por-evaporacion-mejor-manera-de-enfriar-gases-calientes-y-reducir-emisiones.html>
- Spraying Systems Co. (2025). *¿Cómo elegir la boquilla de aspersión perfecta?* Obtenido de <https://www.spray.com/es-mx/blog/c%C3%B3mo-elegir-la-boquilla-de-aspersi%C3%B3n-perfecta>
- Suárez, M. C. (2019). *Planta de potencia ORC con fuente de energía renovable*. Obtenido de <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/22042>
- Talent.com. (s.f.). *Salario para Operador en Colombia*. Recuperado el 23 de Mayo de 2025, de <https://co.talent.com/salary?job=operador>
- Tanoue, A. R. (2018). ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM DIFUSOR CÔNICO APLICADO A UM MICROGERADOR EÓLICO. Obtenido de [https://www.bdm.ufpa.br/bitstream/prefix/594/1/TCC\\_EstudoExperimentalDifusor.pdf](https://www.bdm.ufpa.br/bitstream/prefix/594/1/TCC_EstudoExperimentalDifusor.pdf)
- TECMON Tecnologías. (s.f.). *Hornos crematorios*. Recuperado el 2025, de <https://www.tecmontecnologias.com/>
- TEMA. (1999). *Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association* (Octava ed.).
- The Engineering ToolBox. (s.f.). Obtenido de [https://www.engineeringtoolbox.com/nominal-wall-thickness-pipe-d\\_1337.html](https://www.engineeringtoolbox.com/nominal-wall-thickness-pipe-d_1337.html)
- Torres, D. R. (Marzo de 2015). *Mantenimiento de turbina de vapor en central termoeléctrica del ingenio Tululá*. Guatemala. Obtenido de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/2105/1/Diego%20Rafael%20Chac%C3%B3n%20Torres.pdf>

- Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B., & Shaeiwitz, J. A. (1995). Analysis, synthesis, and design of chemical processes. 3. Obtenido de [https://madar-ju.com/storage/images/files/file\\_1738600275IE8qB.pdf](https://madar-ju.com/storage/images/files/file_1738600275IE8qB.pdf)
- Unidad de Planeación Minero Energética. (Resolución 281 de 2015). Resolución 281 de 2015. Obtenido de [https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_upme\\_0281\\_2015.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_upme_0281_2015.htm)
- Vargas, J. E., & Perilla, J. A. (2019). *Dimensionamiento de una turbina de vapor para ser adaptada a las condiciones del banco de ciclo rankine orgánico del laboratorio de ciencias térmicas de la facultad tecnológica de la universidad distrital*. Bogotá. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/106e01ff-b59d-4014-9280-7d1bec13680e/content>
- Veloso Freire, J. A., & Romero Gómez, M. (2019). *Aprovechamiento energético mediante ciclo orgánico de Rankine*. Obtenido de [https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/24593/VelosoFreire\\_JoseAntonio\\_TFM\\_2019.pdf.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/24593/VelosoFreire_JoseAntonio_TFM_2019.pdf.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- Wang, B., Klemeš, J. J., Li, N., Zeng, M., Varbanov, P. S., & Liang, Y. (2020). *Heat exchanger network retrofit with heat exchanger and material type selection: A review and a novel method*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. doi:doi:10.1016/j.rser.2020.110479
- Wolchover, N. (4 de Diciembre de 2011). Burning deceased humans will produce electricity. Obtenido de <https://www.nbcnews.com/id/wbna45526347>
- XM, Comunicaciones. (30 de Abril de 2024). En 2024, la demanda de energía en Colombia aumentó 2.3% en comparación con el año anterior. Colombia. Obtenido de <https://www.xm.com.co/noticias/7504-en-2024-la-demanda-de-energia-en-colombia-aumento-23-en-comparacion-con-el-ano#:~:text=El%20A%C3%B1o%20Anterior-,En%202024%2C%20la%20demanda%20de%20energ%C3%ADa%20en%20Colombia%20aument%C3%B3%202.3,comparaci%C3%B3n%20co>
- Yu, H., Helland, H., Yu, X., Gundersen, T., & Sin, G. (2021). Optimal design and operation of an Organic Rankine Cycle (ORC) system driven by solar energy with sensible thermal energy storage. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114494>

**Apéndices**

**Apéndice A. Funcionamiento de hornos crematorios.**

Los hornos crematorios están contruidos principalmente de materiales refractantes, diseñados para resistir altas temperaturas sin dañar sus propiedades físicas como la conductividad térmica y su resistencia (Naranjo Contento, Velasco Jaramillo, & Zambrano Arejuela, 2022).

En la Tabla A1, se presenta una comparación entre diferentes materiales utilizados para el revestimiento de hornos crematorios.

**Tabla A1.**

*Comparación entre materiales refractantes para hornos crematorios.*

<b>Revestimiento</b>	<b>Ladrillos refractantes</b>	<b>Monolítico</b>	<b>Fibra cerámica</b>
<b>Material típico</b>	Sílice, Alúmina	Hormigones, plásticos	Óxido de silicio, Alúmina, Óxido de hierro
<b>Resistencia al calor</b>	Alta	Media	Alta
<b>Absorción de ruido</b>	Media	Baja	Media
<b>Resistencia a vibraciones</b>	Baja	Baja	Media
<b>Resistencia a la corrosión química</b>	Alta	N/A	Alta
<b>Conductividad térmica</b>	Baja	Media	Baja
<b>Dificultad de instalación</b>	Alta	Baja	Baja

*Tomado de: Enríquez Paredes, X. A., & Mas Bautista, R. E. (2024). Diseño de un horno crematorio privado por combustión para mascotas con una capacidad máxima de 30 kg. Lima, Perú. Obtenido de <https://tesis.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/5fe9b695-ea52-473c-a83e-c1c8b28a4d2e/content>*

Estos hornos son alimentados con diferentes combustibles fósiles e incluso existen hornos que funcionan con electricidad (Naranjo Contento, Velasco Jaramillo, & Zambrano Arejuela, 2022). Algunos combustibles fósiles empleados son, el gas natural licuado (GLP), el gas natural comprimido (GNC) y el DIESEL (Enríquez Paredes & Mas Bautista, 2024).

En la tabla A2, se presentan las propiedades de diferentes tipos de combustibles que pueden ser empleados para el proceso de cremación:

**Tabla A2.**

*Comparación entre diferentes combustibles para hornos crematorios.*

Combustible	GLP (Propano + Butano)		GNC	Diesel
<b>Fórmula química</b>	$C_3H_8 + C_4H_{10}$		$C_1H_4$	$C_{12}H_{26}$
<b>Norma</b>	ASTM D1838		ASTM WK40094	ASTM PS121
<b>Densidad (a 15°C kg/L)</b>	0.82 – 0.86		0.61	0.85
<b>Punto de autoignición (°C)</b>	493 - 549	482 - 538	537	254 – 285
<b>Presión de vapor (kPa)</b>	950.43	220	133.3	0.4
<b>Calor de combustión (MJ/kg)</b>	46 – 50		53.6	42.6 – 43.2
<b>Nivel de contaminación</b>	Medio	Medio	Bajo	Medio

*Tomado de: Enríquez Paredes, X. A., & Mas Bautista, R. E. (2024). Diseño de un horno crematorio privado por combustión para mascotas con una capacidad máxima de 30 kg. Lima, Perú. <https://tesis.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/5fe9b695-ea52-473c-a83e-c1c8b28a4d2e/conten>*

Para iniciar el proceso de cremación, las dos cámaras que componen el horno son precalentadas a 850 °C y reciben un flujo de ingreso del 6% de oxígeno en exceso, con el fin de garantizar que la combustión dentro del horno sea completa y así, prevenir la formación de monóxido de carbono (Chapoñan Mondragón & Alvarado Silva, 2020). Seguidamente el ataúd se introduce dentro de la primera cámara de combustión, la cual cuenta con quemadores que, por medio de la mezcla de aire y combustible, promueven la combustión y realizan el proceso de incineración (Ortiz Libreros, 2019).

Los gases de combustión generados durante este proceso son enviados hacia la cámara secundaria o cámara de post combustión, con el objetivo de reducir las emisiones de material

particulado, compuestos orgánicos volátiles y contaminantes orgánicos persistentes. Los gases permanecen en la cámara de post combustión durante un tiempo de residencia de al menos 2 segundos, alcanzando temperaturas de hasta 1000 °C (Ortiz Libreros, 2019).

Seguidamente los gases de combustión son liberados al medio ambiente por medio de una chimenea, o en algunos casos, los gases son transferidos hacia un sistema de tratamiento antes de ser liberados a la atmosfera con el fin de cumplir con las normas ambientales (Chapoñan Mondragón & Alvarado Silva, 2020).

Los hornos crematorios deben cumplir con los estándares de emisión admisibles de contaminantes al expulsar los gases al aire, tal como lo establece la Resolución 909 del 5 de junio de 2008. En la Tabla A3, se presentan los límites de emisión de los gases bajo condiciones de referencia (25°C y 760 mm Hg), con oxígeno de referencia al 11%. En esta tabla se especifican los límites para tres contaminantes clave: material particulado (MP), monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos totales (HCt). Estos valores establecidos varían según el tipo de medición realizada, ya sea de forma diaria u horaria (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2018).

**Tabla A3.**

*Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para hornos crematorios.*

Instalación	Promedio	Estándares de Emisión Admisibles (mg/m3)		
		MP	CO	HCt
Hornos crematorios	Promedio diario	No aplica	75	15
	Promedio horario	50	150	30

*Tomado de: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución número 909 del 5 de junio de 2008. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/resolucion-909-de-2008.pdf>.*

Estos estándares son importantes para garantizar que los hornos crematorios operen dentro de los límites aceptables de emisiones de contaminantes, contribuyendo a la protección del medio ambiente y la salud pública.

**Apéndice B. Calor residual y su clasificación de calidad.**

El calor residual es el calor contenido en los productos y subproductos de un proceso industrial y que no se utiliza de manera útil en el proceso (Sánchez Daza, 2021). Este calor supone una pérdida de energía térmica en la industria, sin embargo, este calor puede ser aprovechado aumentando la eficiencia energética y global del proceso (Sánchez, 2012).

Según DECC (Department of Energy and Climate Change of Imperial College), el potencial o la calidad del calor residual para ser aprovechado, se clasifica según la temperatura de la fuente de calor (Sánchez Daza, 2021). Su clasificación se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla B1.**

*Categorías del calor residual.*

<b>Calidad del calor residual</b>	<b>Fuente de calor</b>	<b>Sumidero</b>
<b>Alta</b>	>500 °C	>250 °C
<b>Media</b>	250 – 500 °C	150 – 250°C
<b>Baja</b>	<250 °C	<150 °C

*Tomado de: Sánchez Daza, J. E. (2021). Optimización térmica y económica de un ciclo Rankine orgánico que aprovecha el calor residual de los motores de combustión interna. [https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/14058/2021\\_Tesis\\_Jesus\\_Sanchez\\_Daza.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/14058/2021_Tesis_Jesus_Sanchez_Daza.pdf?sequence=1&isAllowed=y)*

El calor residual tiene una variedad de usos como, la cogeneración denominada como sistema calor-potencia, para la producción de energía eléctrica y para el precalentamiento de fluidos o materiales que alimentan un sistema (Sánchez Daza, 2021).

**Apéndice C. Comparación entre hornos crematorios ofertados en el mercado.**

Para seleccionar el horno crematorio utilizado como modelo en este proyecto, se realizó una comparación entre diferentes diseños de hornos crematorios que aparecen en el mercado. En la Tabla C1, se evidencian las características de estos:

**Tabla C1.**

*Características de diferentes hornos crematorios.*

<b>Características</b>	<b>Horno crematorio CALTEC</b>	<b>Horno crematorio NASER RUCSA</b>	<b>Horno crematorio FELIX</b>	<b>Horno crematorio TECMON</b>
<b>Dimensiones (ancho x alto x largo) (m)</b>	1.85 x 2.1 x 4.6	2.65 x 1.86 x 4.35	0.8 x 0.9 x 2.5	-
<b>Temperatura cámara principal (°C)</b>	800-900	-	-	800
<b>Temperatura cámara secundaria o de postcombustión (°C)</b>	1100-1200	1000	-	950
<b>Combustible</b>	Gas natural, gas oil o GLP.	GLP, gas natural y energía eléctrica trifásica	GLP	Se diseña para cualquier tipo de combustible
<b>Número de quemadores</b>	2	-	2	-
<b>Consumo de combustible (m3/h)</b>	55	-	-	-
<b>Tiempo de cremación (minutos)</b>	60-90	60-90	-	-
<b>Mercado nacional</b>	Se debe realizar exportación	-	-	Sí
<b>Tratamiento de gases</b>	No	-	-	Etapa de enfriamiento de gases y material particulado
<b>Cumplimiento de normas</b>	ISO 9001 de 2015	-	-	Ley 909 de junio de 2008
<b>Referencias</b>	(CALTEC Hornos Industriales)	(NASER RUCSA)	(Enríquez Paredes & Mas Bautista, 2024)	(TECMON Tecnologías)

*Fuente: Elaboración propia.*

En la tabla anterior se observa que los hornos crematorios pueden trabajar con diferentes tipos de combustibles, sin embargo, los diseños que más flexibilidad tienen con el tipo de combustible a emplear son los de las empresas CALTEC, TECMON tecnologías y NASER RUCSA, en comparación del diseño de la empresa FELIX que solo puede utilizar gas natural licuado (GLP) como combustible. Con respecto al tiempo de cremación por cuerpo solo hay información de los hornos de la empresa CALTEC y NASER RUCSA, los cuales cuentan con el mismo tiempo de operación por cuerpo (60-90 minutos). Por otra parte, los diseños de las empresas CALTEC Y TECMON pueden ser adquiridos para su instalación en Colombia, ya sea por exportación como es el caso del CALTEC o comprándolo directamente en Colombia para el caso de los hornos de TECMON tecnologías, para el caso de las empresas NASER RUCSA y FELIX no hay información al respecto.

En cuanto al tratamiento de los gases de combustión, el único modelo de horno crematorio que cuenta con este sistema es el de la empresa TECMON tecnologías cumpliendo con lo estipulado en la ley 909 de junio de 2008 (TECMON Tecnologías). Para el caso del diseño de la empresa CALTEC, la implementación de la cámara secundaria y dilución con el agregado de aire en exceso, garantizan una salida de gases limpios y vapor de agua por la chimenea, sin emisión de humos y olores (CALTEC Hornos Industriales).

#### **Apéndice D. Definición del flujo de gases de combustión.**

En la Tabla D1, se presenta la composición de los gases de combustión de un horno crematorio, tomando como base de cálculo 100 moles de gas natural y asumiendo combustión completa para un exceso de aire del 60% (Gómez Díaz, 2015). De igual manera, es necesario considerar la composición elemental que contiene el cuerpo humano como parte del análisis.

**Tabla D1.**

*Composición de los gases de combustión del horno crematorio.*

<b>Compuesto</b>	<b>%Volumen</b>	<b>Fracción molar</b>
<b>N2</b>	74.16	0.7416599
<b>H2O</b>	11.83	0.1183148
<b>O2</b>	7.39	0.0739289
<b>CO2</b>	6.58	0.0658107
<b>Ca</b>	0.01	0.0001084
<b>P</b>	0.01	0.0001096
<b>K</b>	0.001	0.0000149
<b>S</b>	0.001	0.0000181
<b>Na</b>	0.001	0.0000186
<b>Cl2</b>	0.001	0.0000121
<b>Mg</b>	0.0003	0.0000038
<b>Fe</b>	0.00003	0.0000003

*Tomado de: Gómez Díaz, A. (2015). Diseño e instalación de un horno crematorio en una nave industrial. Obtenido de <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/6685/376335.pdf>*

### **Apéndice E. Comparación entre el Ciclo de Rankine y el Ciclo Orgánico de Rankine.**

A continuación, se presenta una tabla comparativa entre el ciclo de vapor o ciclo de Rankine convencional y el ciclo orgánico de Rankine:

**Tabla E1.**

*Comparación entre el ciclo de vapor y el ciclo orgánico de Rankine.*

	<b>Ciclo vapor</b>	<b>Ciclo Rankine Orgánico</b>
<b>Fluido</b>	Agua	Compuesto orgánico
<b>Presión crítica</b>	Alto	Bajo
<b>Temperatura crítica</b>	Alto	Bajo
<b>Punto de ebullición</b>	Alto	Bajo
<b>Presión de condensación</b>	Bajo	Aceptable

<b>Calor específico</b>	Alto	Bajo
<b>Viscosidad</b>	Baja	Relativamente alta
<b>Inflamabilidad</b>	No	Depende del fluido de trabajo
<b>Toxicidad</b>	No	Sí
<b>Impacto medio ambiental</b>	No	Depende del fluido de trabajo
<b>Disponibilidad</b>	Si	Problema de suministro
<b>Coste</b>	Bajo	Alto

*Tomado de: Sánchez Daza, J. E. (2021). Optimización térmica y económica de un ciclo Rankine orgánico que aprovecha el calor residual de los motores de combustión interna. [https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/14058/2021\\_Tesis\\_Jesus\\_Sanchez\\_Daza.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/14058/2021_Tesis_Jesus_Sanchez_Daza.pdf?sequence=1&isAllowed=y)*

Una de las principales ventajas del ciclo de Rankine, es que esta tecnología es muy reconocida para la producción de electricidad y tiene una gran flexibilidad para modular o administrar condiciones de operación (Méndez, 2018). Entre sus desventajas se encuentran el alto requerimiento de disponibilidad de agua con tratamiento para la remoción de minerales, ya que los minerales pueden generar corrosión en los alabes de la turbina; este ciclo mantiene una alta complejidad en montaje y operación, así mismo, es ideal para grandes capacidades de generación (Méndez, 2018). El uso del ciclo de Rankine es eficiente con fuentes de energía que proporcionen temperatura elevada, por lo tanto, no permite el aprovechamiento del calor de fuentes de energía residual (Fernández, 2017).

Por otra parte, una de las ventajas del ORC comparado con el ciclo de Rankine convencional es que se evita la erosión en los álabes de la turbina. En el ciclo de Rankine, a medida que la turbina extrae el calor del vapor de agua para generar electricidad, se produce una expansión dentro de la curva de vapor saturado, en donde se pueden generar gotas de agua que afecten la integridad de los alabes de la turbina (Velo Freire & Romero Gómez, 2019).

Los efectos de la corrosión sobre las turbinas de vapor producen pérdidas económicas de alrededor de 250 millones de dólares anualmente, siendo este casi diez veces más alto que el costo

en reparaciones, obteniendo un 15% de pérdida en generación de energía (MW), causada por problemas de corrosión por la acumulación de depósitos en los álabes. Por lo tanto, el agrietamiento siempre estará presente en uno o varios álabes de la TV (Clemente Mirafuentes, 2014).

Con la implementación del ORC, se elimina este inconveniente debido a que los fluidos orgánicos utilizados para alimentar el ORC, tienen un punto de ebullición mejor al agua, por debajo de los 100°C, aumentando la eficiencia del proceso y cuidando la integridad de la turbina (Sánchez, 2012). Adicionalmente, la diferencia entre las temperaturas del ciclo de evaporación y condensación es menor comparado con las del ciclo de Rankine, por lo que la ratio de caída de presión es mucho menor y pueden utilizarse turbinas de una sola etapa que son más económicas y sencillas (Sánchez Daza, 2021).

#### **Apéndice F. Fluidos orgánicos propuestos para el diseño.**

El fluido de trabajo tiene un impacto significativo en el ORC, ya que influye en el tamaño del sistema, su eficiencia y viabilidad financiera. Los fluidos orgánicos se clasifican en secos, húmedos e isentrópicos; para el diseño del ORC, se recomienda utilizar fluidos orgánicos secos o isentrópicos puesto que estos permanecen en su fase vapor durante la expansión en la turbina (Bao & Zhao, 2013).

En la Tabla F1, se presentan una comparación entre diferentes fluidos orgánicos que pueden ser utilizados para la recuperación de calor residual de los gases de combustión de hornos crematorios. Según la investigación de (Bao & Zhao, 2013), estos fluidos han sido utilizados para aplicaciones de recuperación de calor residual a temperaturas cercanas a 250 °C, la cual es la temperatura de salida de los gases de combustión del horno crematorio.

**Tabla F1.**

*Características de diferentes fluidos orgánicos.*

Fluido orgánico	Tipo de fluido	Temperatura crítica (°C)	Presión crítica (bar)	Temperatura de ebullición (°C) a 1 bar	Inflamabilidad	Toxicidad	Precio USD/Ton	Impacto ambiental	Referencias
<b>Tolueno</b>	Hidrocarburo aromático	319	41.3	110.6	Alta	Alta	977.04	Peligroso para medio acuático.	(Carl Roth, 2025) (Osuna, 2024)
<b>n-heptano</b>	Hidrocarburo	267	27.3	98.4	Alta	Moderada	1750	Peligroso para medio acuático.	(Carl Roth, 2024) (Marketizer, 2022)
<b>n-pentano (R-601)</b>	Hidrocarburo	196	33.6	36.1	Alta	Moderada	1200	Peligroso para medio acuático.	(Carl Roth, 2025) (Alibaba, 2025)
<b>1,1-Dicloro-2,2,2-trifluoroetano (R-123)</b>	Hidroclorofluorocarbonos (HCFC)	183	36.6	27.8	Moderado	Alta	38340	Afecta la capa de ozono.	(Equimiseg Ltda) (CORESA, 2022)
<b>Benceno</b>	Hidrocarburo	298	48.8	80.1	Alta	Moderado	686.01	Peligroso para medio acuático.	(Carl Roth, 2025) (Osuna, 2024)
<b>1,1,1,3,3-Pentafluoropropano (R-245fa)</b>	Hidrofluorocarbonos (HFC)	153	36.1	15.3	Moderado	Moderado	3000	Peligroso para medio acuático.	(Honeywell, 2017) (China, 2022)
<b>Etanol</b>	Alcohol	241	40.6	78.3	Alta	Leve	722.64	Leve, con una correcta gestión de desechos.	(Carl Roth, 2024) (Corficolombia, 2024)
<b>Agua</b>	Inorgánico	374	220.6	100	No	No	0.003	No aplica.	(Carl Roth, 2021) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible)

*Adaptado de: Bao, J., & Zhao, L. (2013). A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle (Vol. 24). doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.040>; Saiz, D. T. (2019). Simulación y optimización de ciclos de potencia orgánicos Rankine (ORCs) con diferentes fluidos aplicados a energía solar de concentración. Obtenido de [https://oa.upm.es/55982/1/TFG\\_DIEGO\\_TORESANO\\_SAIZ.p](https://oa.upm.es/55982/1/TFG_DIEGO_TORESANO_SAIZ.p)*

Teniendo en cuenta que el fluido que ingresa al intercambiador contiene una temperatura alta, es ideal utilizar alcanos, aromáticos y alcoholes, ya que la mayoría posee temperaturas críticas elevadas (Marquina, 2023). Una temperatura crítica alta del fluido permite que el sistema pueda operar a altas temperaturas de manera más estable y controlable, esto permite que el sistema sea más compacto (Saiz, 2019). Con base en esto, se seleccionaron como fluidos orgánicos potenciales: etanol, benceno, y n-heptano.

### **Apéndice G. Sistemas de aspersión.**

Antes del ingreso de los gases de combustión al sistema de recuperación de calor residual, es fundamental implementar un sistema de aspersores de agua fría que reduzca la temperatura del gas de combustión. Esto permite que el agua absorba la mayor cantidad de calor posible, para que pueda ingresar al intercambiador de calor, y en el caso del ORC, evita el sobrecalentamiento del fluido orgánico.

Para aplicar este método, los gases de combustión se desvían al salir de la chimenea hacia un túnel de enfriamiento. En la Tabla G1, se observa una comparación entre dos sistemas de aspersión que permite retirar calor del gas de combustión.

**Tabla G1.**

*Comparación entre sistemas de aspersión.*

<b>Sistema</b>	<b>Principio de funcionamiento</b>	<b>de Eficiencia de enfriamiento</b>	<b>de Consumo de energía</b>	<b>Costos de operación</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Referencia</b>
<b>Cámara de aspersión</b>	Rocío de líquido sobre el gas caliente, enfriándolo por evaporación.	Media	Bajo	Medio (requiere agua y mantenimiento)	Enfriamiento de gases en procesos industriales, humidificación de aire.	(Perry & Green, 2008)
<b>Venturi</b>	Mezcla de gas caliente con líquido a alta velocidad, facilitando la transferencia de calor.	Media – Alta (principalmente para gases con partículas)	Medio – Alto	Alto (consumo de agua y energía por los ventiladores que utiliza)	Reducción de temperatura y eliminación de contaminantes gases industriales.	(Seader, Henley, & Roper, 2011)

*Adaptado de: Seader, Henley, & Roper. (2011). Chemical Engineers' Handbook y Perry & Green. (2008). Separation Process Principles. Obtenido de [https://students.aiu.edu/submissions/profiles/resources/onlineBook/z5y2E6\\_Perry-s\\_Chemical\\_Engineers-Handbook.pdf](https://students.aiu.edu/submissions/profiles/resources/onlineBook/z5y2E6_Perry-s_Chemical_Engineers-Handbook.pdf) y <https://thestemtutor.org/wp-content/uploads/2024/10/J.-D.-Seader-Ernest-J.-Henley-D.-Keith-Roper-Separation-Process-Principles--Chemical-and-Biochemical-Operations-Third-Edition-John-Wiley-Sons-2010.pdf>*







Con base en esta evaluación, se seleccionó un sistema de cámara de aspersión para optimizar la disipación de calor del gas de combustión. La cámara de aspersión de agua fría funciona mediante la pulverización de agua en finas gotas dentro de la corriente gaseosa. Estas gotas absorben el calor del gas y se evaporan, logrando así una reducción efectiva de su temperatura (Spraying Systems Co, 2016). La eficiencia de este proceso depende de factores como la temperatura del agua, la calidad de la pulverización y la velocidad del gas (Escobar, 2014).

**Apéndice H. Elección de la boquilla de aspersión**

Para la elección de la boquilla correcta, se realizó un estudio con diferentes tipos de boquillas y los patrones de aspersión más comunes. En la Tabla H1, se presentan diferentes patrones para la elección de la boquilla adecuada, así como las aplicaciones para cada una de ellas.

**Tabla H1.**

*Comparación entre boquillas de aspersión.*

Aspersión Plana o Abanico	Las boquillas de aspersión plana producen un chorro plano en forma de abanico o de lámina, ideal para limpieza, enjuague o recubrimiento. Dan ángulos de aspersión de 1° a 170° y flujos de 0.003 a 1,237 gpm (0.011 a 4,683 lpm)	
Chorro Sólido	Las boquillas de chorro sólido producen un chorro continuo e ininterrumpido de líquido. Las aplicaciones más comunes son el corte, la limpieza, la inyección y el enfriamiento selectivo. Funcionan con un ángulo de aspersión de 0°.	
Cono Lleno	Las boquillas de cono lleno producen un chorro en forma de cono de impacto circular. Son perfectas para lavado, enjuague y control de polvos. Proporcionan ángulos de aspersión de 15° a 170° y flujos de 0.05 a 8,728 gpm (0.19 a 33,039 lpm)	
Cono Hueco	Las boquillas de cono hueco producen un chorro en forma de anillo ideales para enfriamiento, lavado y control de polvos. Ofrecen ángulos de aspersión de 43° a 180° y flujos de 0.05 a 3,320 gpm (0.19 a 12,567 lpm)	
Aspersión Fina	Las boquillas de aspersión fina se consideran distintivas no por un patrón de aspersión único, sino por las pequeñas gotas que producen, ideales para humidificar, nebulizar y controlar el polvo. Proporcionan ángulos de aspersión de 30° a 165° y flujos de 49.2 a 8,160 gph (186 a 30,889 lph)	
Atomización con Aire	Las boquillas de atomización con aire producen gotas muy finas, utilizando aire comprimido para la atomización en lugar de presión hidráulica. Se utilizan para recubrimientos, humidificación y nebulización y están disponibles con un amplio rango de flujos y patrones de aspersión.	

*Tomado de: Spraying Systems Co. (2025) ¿Cómo elegir la boquilla de aspersión perfecta? <https://www.spray.com/es-mx/blog/c%C3%B3mo-elegir-la-boquilla-de-aspersi%C3%B3n-perfecta>*

A partir de este análisis, se seleccionó la boquilla de **aspersión fina**, ya que su capacidad para generar gotas pequeñas maximiza la superficie de contacto entre el agua y el gas de combustión, favoreciendo su enfriamiento. (Spraying Systems Co, 2025). Además, este tipo de boquilla permite una distribución adecuada del líquido, lo que optimiza la absorción de calor; su uso es ideal para enfriamiento de gases, enfriamiento por evaporación, humidificación, entre otros (Spraying Systems Co, 2016).

**Apéndice I. Composición elemental del cuerpo humano.**

El cuerpo humano está compuesto por una variedad de elementos químicos que desempeñan funciones esenciales en la biología y el metabolismo, estos se pueden observar a continuación:

**Tabla II.**

*Composición elemental del cuerpo humano.*

<b>Elemento</b>	<b>% masa total</b>	<b>Rol biológico esencial</b>	<b>Efectos tóxicos</b>
<b>Oxígeno</b>	61.35	Sí	Oxidación y radicales libres
<b>Carbono</b>	22.83	Sí	Acidosis
<b>Hidrógeno</b>	9.98	Sí	—
<b>Nitrógeno</b>	2.57	Sí	—
<b>Calcio</b>	1.42	Sí	Hipercalcemia
<b>Fósforo</b>	1.11	Sí	Hiperfosfatemia
<b>Potasio</b>	0.19	Sí	Hipercalcemia
<b>Azufre</b>	0.19	Sí	—
<b>Sodio</b>	0.14	Sí	Hipernatremia
<b>Cloro</b>	0.14	Sí	Hipercloremia
<b>Magnesio</b>	0.03	Sí	Hipermagnesemia
<b>Hierro</b>	0.006	Sí	Hemocromatosis
<b>Flúor</b>	0.0037	Quizás	Fluorosis ósea/dental e intoxicación
<b>Zinc</b>	0.0033	Sí	Intoxicación
<b>Silicio</b>	0.0014	Probablemente	—
<b>Galio</b>	0.001	No	Envenenamiento
<b>Rubidio</b>	0.0009	No	Sustitución del potasio
<b>Estroncio</b>	0.0005	No	Sustitución del calcio
<b>Bromo</b>	0.0004	Quizás	Intoxicación

<b>Plomo</b>	0.0001	No	Envenenamiento / intoxicación
<b>Cobre</b>	Traza	Sí	Intoxicación
<b>Aluminio</b>	Traza	No	Envenenamiento / intoxicación
<b>Cadmio</b>	Traza	No	Envenenamiento / intoxicación
<b>Cerio</b>	Traza	No	—
<b>Bario</b>	Traza	No	Envenenamiento
<b>Estaño</b>	Traza	No	—
<b>Yodo</b>	Traza	Sí	Hipertiroidismo inducido por yodo
<b>Titanio</b>	Traza	No	—
<b>Boro</b>	Traza	Probablemente	—
<b>Selenio</b>	Traza	Sí	Intoxicación
<b>Níquel</b>	Traza	No	Intoxicación
<b>Cromo</b>	Traza	Sí	—
<b>Manganeso</b>	Traza	Sí	Intoxicación por manganeso
<b>Arsénico</b>	Traza	Sí	Envenenamiento / intoxicación
<b>Litio</b>	Traza	Sí	Intoxicación

*Adaptado de: Composition of the Human Body. Euclides Lourenço Chuma, Yuzo Iano, Navid Razmjoo, Noradin Ghadimi, & Venkatesan Rajinikanth. 009\_2024.pdf*

Para la implementación de estos elementos, se consideraron los valores mayores a 0.005%, debido a que valores inferiores se consideran insignificantes o poco representativos para el análisis. Así mismo, se asume un sistema sin reacciones químicas, como la oxidación, considerando únicamente la composición original de los gases.

Debido a que la suma de las fracciones no corresponde al 100%, es necesario normalizar la composición de estos elementos para integrarla adecuadamente al flujo total de ingreso de los gases de combustión. Para ello, se tuvo en cuenta el flujo másico del cuerpo, según el diseño del horno crematorio realizado por (CALTEC Hornos Industriales), con una capacidad de procesamiento de 80 kg/h. Teniendo en cuenta que el tiempo estimado por cremación es de 2 h, al dividir la capacidad del horno entre el tiempo por cremación, se obtiene un flujo másico de 40 kg/h para los gases generados por el cuerpo.

Para calcularla fracción molar final de los compuestos, se realizó el siguiente procedimiento:

$$m_i = w_i * m_{total} \quad (\text{Ec. 1})$$

En donde,

$m_i = \text{Flujo másico por componente (kg/h)}$

$w_i = \text{Fracción másica por componente}$

$m_{total} = \text{Flujo másico del cuerpo (kg/h)}$

$$n_i = \frac{m_i}{M_i} \quad (\text{Ec. 2})$$

En donde,

$n_i = \text{Flujo molar por componente (kmol/h)}$

$M_i = \text{Peso molecular por componente (kg/kmol)}$

$$n_{total} = \sum n_i \quad (\text{Ec. 3})$$

En donde,

$n_{total} = \text{Flujo molar total (kmol/h)}$

$$y_i = \frac{n_i}{n_{total}} \quad (\text{Ec. 4})$$

En donde,

$y_i = \text{Fracción molar del componente}$

## **Apéndice J. Diseño de intercambiadores de calor**

Para realizar el diseño de los intercambiadores de calor E-101 y E-102, por medio del Software Aspen EDR, es necesario definir las características presentadas a continuación:

### Selección de la clase de aplicación

Para la selección de la clase de aplicación se tuvo en cuenta las recomendaciones TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association), las cuales contienen una serie de consideraciones para tener en cuenta para el diseño y fabricación de intercambiadores de calor. Se encuentran tres clases, la clase R se utiliza principalmente para la industria de petróleo y procesos relacionados; la clase C se utiliza para procesos comerciales y generales; por otra parte, la clase B se utiliza principalmente para procesos en la industria química (Branan).

En la Tabla J1, se realiza una comparación entre los tres estándares mecánicos TEMA.

**Tabla J1.**

*Comparación entre clases de aplicaciones de intercambiadores de calor en Aspen EDR.*

<b>Tema</b>	<b>Clase R</b>	<b>Clase C</b>	<b>Clase B</b>
<b>Definición</b>	Para requisitos generalmente severos de petróleo y procesos relacionados.	Para requisitos moderados comerciales y procesos generales.	Para servicio de proceso general
<b>Margen de corrosión en acero al carbono</b>	¼ pulgada	⅛ pulgada	⅛ pulgada
<b>Diámetros de tubos</b>	¾, 1, 1¼, 1⅜ y 2 pulgadas	¾, 1, 1¼, 1⅜, 2, ¼, ⅜, ½ y ⅝ pulgadas	¾, 1, 1¼, 1⅜, 2 y ⅜
<b>Paso de tubo y canal de limpieza mínimo</b>	1.25 × diámetro del tubo, canal de ¼ pulgada	1.25 × diámetro del tubo, canal de ¼ pulgada, tubos de ⅝ pueden ubicarse en 1.2 × diámetro	1.25 × diámetro del tubo, canal de ¼ pulgada, canal puede ser ⅜ pulgada para carcasas pequeñas
<b>Diámetro mínimo de carcasa</b>	8 pulgadas tabuladas	6 pulgadas tabuladas	6 pulgadas tabuladas
<b>Espesor longitudinal de deflectores</b>	¼ pulgada mínimo	¼ pulgada aleación, ¼ pulgada acero al carbono	¼ pulgada aleación, ¼ pulgada acero al carbono
<b>Diámetro mínimo de barra de unión</b>	⅜ pulgada	¼ pulgada en carcasas de 6–15 pulgadas	¼ pulgada en carcasas de 6–15 pulgadas
<b>Área de paso de cabeza flotante</b>	1.3 × área de flujo de tubo	Igual que área de flujo de tubo	Igual que área de flujo de tubo

<b>Construcción del anillo de linterna</b>	Máximo 375 °F, 300 psi hasta 24" diámetro, 150 psi para 25–42", 75 psi para 43–60"	Máximo 600 psi	Máximo 375 °F, 300 psi hasta 24" diámetro, 150 psi para 25–42", 75 psi para 43–60"
<b>Materiales de empaques</b>	Metal sólido o con chaqueta metálica (a) cabeza flotante interna, (b) 300 psi o más, (c) todos los hidrocarburos	Metal sólido o con chaqueta metálica (a) cabeza flotante interna, (b) 300 psi o más, (c) todos los hidrocarburos se permite asbesto para $\leq 300$ psi	Metal sólido o con chaqueta metálica (a) cabeza flotante interna, (b) 300 psi o más, (c) todos los hidrocarburos se permite asbesto para $\leq 300$ psi
<b>Superficie de contacto de empaque periférico</b>	Tolerancia de planitud especificada	Sin tolerancia especificada	Sin tolerancia especificada
<b>Espesor mínimo de la placa tubular</b>	Diámetro exterior del tubo	Varias especificaciones por diámetro	Varias especificaciones por diámetro
<b>Ranurado de agujeros de tubos</b>	Dos ranuras	Diseño $>300$ psi o $>350^{\circ}\text{F}$ : 2 ranuras	Dos ranuras
<b>Longitud de expansión</b>	Menor entre 2 pulgadas o espesor de placa tubular	Menor entre $2 \times$ diámetro del tubo o 2"	Menor entre 2 pulgadas o espesor de placa tubular
<b>Ranuras de paso en la placa tubular</b>	Se requieren ranuras de $\frac{3}{4}$ pulgada de profundidad	$\geq 300$ psi requiere $\frac{1}{2}$ " o medios equivalentes	$\geq 300$ psi requiere $\frac{1}{2}$ " o medios equivalentes
<b>Conexiones de rosca para tubería</b>	Acople de 6000 psi con tapón de barra	Acople de 3000 psi	Acople de 3000 psi con tapón de barra
<b>Conexiones para termómetro</b>	Requerido en boquillas de 4" o más	Especificado por el comprador	Requerido en boquillas de 4" o más

Adaptado de: Richard C. Byrne. (2019). *Standards of the Tubular exchanger manufacturers association* y Branan, Carl (2002). *Rules of thumb for chemical engineers*.

[https://dl.gasplus.ir/standard-ha/Standard-](https://dl.gasplus.ir/standard-ha/Standard-CORROSION/TEMA_Standards_of_the_Tubular_Exchanger.pdf)

[CORROSION/TEMA\\_Standards\\_of\\_the\\_Tubular\\_Exchanger.pdf](https://www.sciencedirect.com/book/9780123877857/rules-of-thumb-for-chemical-engineers) y

<https://www.sciencedirect.com/book/9780123877857/rules-of-thumb-for-chemical-engineers>

A partir de la anterior tabla, se puede observar que la Clase R requiere mayores márgenes de seguridad, lo que implica que sus componentes deben cumplir con estándares más estrictos. Además, el margen de corrosión es de  $\frac{1}{4}$  de pulgada, mayor que en las otras clases, y los diseños robustos son más adecuados para aplicaciones de mayor riesgo. También exige materiales de alta

resistencia y un diseño que soporte presiones y temperaturas elevadas, teniendo en cuenta el proceso, la temperatura y presión no alcanzan los niveles extremos que justificaría su uso.

Por su parte, la Clase C sigue manteniendo estándares técnicos importantes, sin embargos, estos son menos exigentes que los de la Clase R. Con un margen de corrosión de 1/8 de pulgada y una mayor flexibilidad en el diseño de tubos, ofrece una opción más robusta, pero más flexible en cuanto a construcción y materiales, lo que la convierte en una opción balanceada entre rendimiento y costo.

La Clase B es la más flexible y menos exigente en cuanto a especificaciones técnicas. Utiliza los mismos márgenes de corrosión que la Clase C (1/8 de pulgada), pero permite carcasas pequeñas y no exige bridas en todos los componentes, lo que facilita su fabricación y reduce costos. A pesar de su simplicidad, mantiene un estándar básico de seguridad y durabilidad.

Por lo tanto, la clase C es la más apropiada para diseñar los intercambiadores de calor, debido a que proporciona un equilibrio entre resistencia, costo y adaptabilidad, permitiendo un aprovechamiento energético eficiente de los gases de combustión.

**Selección de material**

Para la selección del material del evaporador y condensador, se utilizó como referencia la tabla J2 donde se especifica la temperatura máxima de operación permitida para cada material y sus aplicaciones más comunes.

**Tabla J2.**

*Particularidades de diferentes materiales para intercambiadores de calor.*

Material	Temperatura máxima (°C)	Aplicaciones comunes	Corrosión	Costos
<b>Acero al carbono</b>	400	Agua de enfriamiento, alimentación de vapor, aire, torres de agua de calderas, hidrocarburos,	Alta susceptibilidad a la corrosión general. Se requiere protección adicional para su uso	Bajo

		glicoles, mercurio, sales fundidas, acetona	en ambientes con agua de mar.	
<b>Acero Cr–Mo (Cromo-Molibdeno)</b>	500	Igual que el acero al carbono, además de hidrógeno	Buena resistencia a la corrosión en medios alcalinos a temperaturas elevadas.	Bajo
<b>Acero inoxidable</b>	700	Soluciones salinas acuosas, ácido nítrico acuoso, soluciones básicas acuosas, intermedios alimentarios, alcoholes, éteres, freones, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, sales fundidas, metales fundidos	Comúnmente empleado en intercambiadores de calor; ofrece buena resistencia a la corrosión en ambientes moderadamente corrosivos.	Medio
<b>Aleaciones a base de níquel (ej. Hastelloy, Inconel, Monel, Incoloy, Carpenter 20)</b>	400	Ácido nítrico y ácidos orgánicos acuosos, gases de combustión, cloro, bromo, hidrocarburos halogenados, amoníaco, dióxido de azufre, trióxido de azufre, disolventes orgánicos, agua salobre, agua de mar	Materiales como Inconel y Monel son resistentes a la corrosión en ambientes altamente corrosivos.	Alto
<b>Aleaciones a base de titanio</b>	400	Soluciones acuosas, dióxido de carbono, disolventes orgánicos	Ofrece excelente resistencia en ambientes altamente corrosivos	Alto

*Adaptado y ampliado de: Wang, B., Klemeš, J. J., Li, N., Zeng, M., Varbanov, P. S., & Liang, Y. (2020). Heat exchanger network retrofit with heat exchanger and material type selection: A review and a novel method. Renewable and Sustainable Energy Reviews. doi:10.1016/j.rser.2020.110479. Malik, A. U., A. S., Al-Fozan, & Al-Muaili, F. (2015). Corrosion of heat exchanger in thermal desalination plants and current trends in material selection (Vol. 55). doi:https://doi.org/10.1080/19443994.2014.940642. Ruiz-Cabañas, F. J., Prieto, C., Jové, A., Madina, V., Fernández, A. I., & Cabeza, L. F. (2018). Steam-PCM heat exchanger design and materials optimization by using Cr-Mo alloys (Vol. 178). Solar Energy Materials and Solar Cells. doi:10.1016/j.solmat.2*

Según la tabla anterior, el acero al carbono, aunque es un material económico, presenta una baja resistencia a la corrosión, lo que lo hace inapropiado para esta aplicación. Por otro lado, aunque el acero Cr-Mo ofrece una buena resistencia a la corrosión, no es comúnmente utilizado para trabajar con fluidos como los alcoholes, lo que podría hacerlo susceptible a la corrosión en este contexto. Las aleaciones a base de níquel y titanio, conocidas por su alta resistencia a la corrosión, se emplean en aplicaciones que involucran gases de combustión y disolventes orgánicos como el etanol. Sin embargo, debido a su alto costo, su uso se limita a aplicaciones críticas y

altamente corrosivas (Wang et al., 2020). Por lo tanto, se seleccionó el acero inoxidable como material para la fabricación de intercambiadores de calor, ya que, además de resistir temperaturas elevadas de hasta 700°C, presenta una excelente resistencia a la corrosión y es ampliamente utilizado en aplicaciones que implican alcoholes y gases de combustión.

#### **Dirección de los fluidos y ubicación de fluido caliente:**

Existen diferentes configuraciones para las direcciones de los fluidos que fluyen a través del equipo, como son, en paralelo, contracorriente y flujo cruzado. La selección de la configuración adecuada para el diseño del intercambiador de calor es importante con el fin de máxima la transferencia de calor entre ambos fluidos. Para el diseño tanto del evaporador como del condensador, se seleccionó la configuración de flujos en contracorriente puesto que es más eficiente, pues que en este tipo de intercambiadoras la temperatura del fluido frío, en algunos casos puede llegar a ser igual o mayor que la del fluido caliente después de la transferencia (Gómez Daza, Lopez Rico, Villalobos Perez, Castro, & Marleyn, 2017).

Para la ubicación del fluido caliente dentro del intercambiador de calor, es importante tener en cuenta el factor de ensuciamiento, la viscosidad de los fluidos, la presión del fluido y el flujo másico de cada uno. Generalmente, el fluido más corrosivo y con un alto factor de ensuciamiento debe circular por el interior de los tubos, para limitar el daño estructural al equipo y facilitar la limpieza del equipo. Los fluidos más viscosos se colocan en la carcasa, donde las condiciones de flujo favorecen una mayor turbulencia y, por ende, un mejor coeficiente de transferencia de calor. Además, si un fluido presenta un bajo flujo másico, es preferible ubicarlo en la carcasa, ya que la turbulencia generada en esta sección mejora la eficiencia de intercambio térmico (Gómez Daza, Lopez Rico, Villalobos Perez, Castro, & Marleyn, 2017).

Sin embargo, los fluidos que toleran menores pérdidas de presión se ubican dentro de los tubos, ya que, dentro de estos, se genera menor resistencia al flujo (Gómez Daza, Lopez Rico, Villalobos Perez, Castro, & Marleyn, 2017). Además, cuando los fluidos que ingresa al intercambiador de calor tienen una diferencia significativa de presión, el fluido con la presión mayor generalmente circula a través de los tubos, puesto que estos pueden soportar presiones más altas que la carcasa (Cofrico, 2024). Por tanto, debido a que la presión del etanol es de 20 bar, y tanto como el gas de combustión y el agua ingresan al evaporador y al condensador respectivamente, a una presión de un bar, se decidió ubicar el fluido caliente (gas de combustión) para el caso del evaporador en la carcasa, y para el caso del condensador el fluido caliente (etanol) se ubicó en los tubos.

### **Baffles o deflectores**

Los baffles se ubican en el interior de la carcasa de los intercambiadores de calor con el fin de direccionar y distribuir correctamente el fluido, mejorando la transferencia de calor. Existen diferentes tipos de baffles, entre ellos se encuentran los baffles segmentados, baffles helicoidales, de disco y dona entre otros. La elección del tipo de baffle, espaciado y corte depende en gran medida de la tasa de flujo, la tasa de transferencia de calor deseada, la caída de presión permitida, el soporte de los tubos y las vibraciones inducidas por el flujo (Shah & Sekulic, 2003).

Los baffles segmentados pueden ser simples, dobles y de tres segmentos; los baffles segmentales simples y dobles son los más utilizados debido a un alto coeficiente de transferencia de calor en el lado de la carcasa para una caída de presión dada en un espacio mínimo. Los baffles segmentales de tres segmentos y sin tubos en la ventana se utilizan para aplicaciones de baja caída de presión. Los baffles tipo disco y dona se utilizan principalmente en intercambiadores de calor nucleares. Por otro lado, los baffles helicoidales menor caída de presión en la carcasa manteniendo

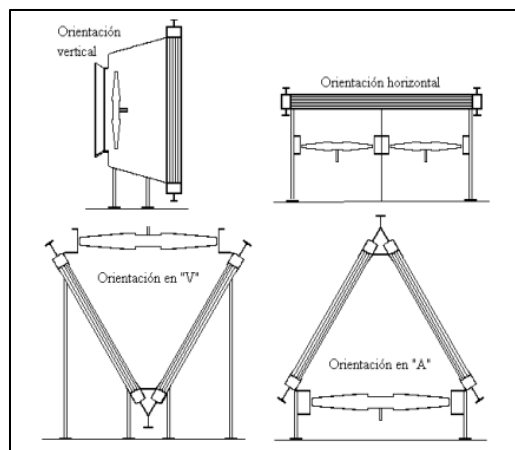
el alto coeficiente de transferencia de calor de un intercambiador segmental, reducción de flujos de fuga y eliminación de puntos muertos y zonas de recirculación, reduciendo así el ensuciamiento (Shah & Sekulic, 2003), sin embargo, son más costosos que los baffles segmentados. A partir de lo anterior, se decidió utilizar el baffle segmentado simple para el diseño del evaporador y condensador del ORC, puesto que la transferencia de calor con este tipo de baffle es eficiente y es una de las configuraciones más aplicadas en la industria. Aunque comparada con otras configuraciones, el baffle segmentado simple puede presentar mayor caída de presión, esto puede ser compensado mediante la implementación de sistemas de control de presión del intercambiador, garantizando su operación segura y estable.

**Selección de la orientación del haz de tubos**

Los haces de tubos pueden ser orientados de distintas maneras, las más comunes son la horizontal, la vertical, en forma de “A” y en forma de “V”. En la Figura J1, se puede observar las diferentes orientaciones de los intercambiadores.

**Figura J1.**

*Orientación de tubos en un intercambiador de calor.*



*Tomado de: González-Mendizabal, D. (2002). Intercambiadores de Calor: Tipos Generales y Aplicaciones. Departamento de Termodinámica y Fenómenos de Transferencia, Universidad [¿Cuál Universidad?].*

La orientación más empleada es la horizontal, debido a su fácil mantenimiento. Un haz de tubos montado de manera vertical permite una gran reducción en el espacio; sin embargo, el rendimiento del equipo se ve afectado por la dirección predominante del viento, por lo que es necesario instalar pantallas protectoras para mantener las condiciones de diseño adecuadas. Generalmente, los haces verticales se utilizan en unidades pequeñas o compactas, como compresores con interenfriadores. Las configuraciones en formas de “A” o “V” representa un compromiso en la necesidad de optimizar espacio disponible. Este diseño se utiliza principalmente en plantas de generación eléctrica para condensar vapor que sale de las turbinas. En estas unidades, los haces de tubos se montan sobre una estructura triangular, con los ventiladores ubicados debajo, la inclinación suele ser entre  $45^\circ$  y  $60^\circ$  (González-Mendizabal, 2002). A partir de lo anterior, se eligió una orientación vertical, ya que facilita el ascenso natural del vapor generado, así como mejora la separación entre las fases y permite un drenaje eficiente del líquido restante, haciendo más efectiva la transferencia de calor. Por otra parte, el condensador, el eligió una orientación horizontal, ya que permite una distribución uniforme del vapor. Además, facilita el flujo del agua de enfriamiento no tratada, asegurando un buen rendimiento térmico.

### **Selección del tipo de intercambiador de calor**

Para seleccionar el tipo de intercambiador de calor a utilizar, según la norma TEMA, se tuvo en cuenta la identificación con tres letras. La primera letra hace referencia al tipo de cabezal estacionario. Entre los más comunes se encuentran el tipo A, que corresponden a un canal y cubierta desmontable, y el tipo B, que representa un casquete, siendo este último uno de los más comunes. La segunda letra indica la configuración del casco. Los tipos más frecuentes son el tipo E, que corresponde a un casco de un solo paso, y el tipo F, que posee dos pasos y presenta mayor complejidad en su mantenimiento. También existen los tipos G, H y J, utilizados principalmente

para reducir las pérdidas de presión en el casco. Por su parte, el tipo K corresponde a un rehervidor de caldera, empleado en torres de fraccionamiento. La tercera letra identifica el tipo de cabezal del extremo posterior. Entre los más utilizados está el tipo S, que corresponde a un cabezal flotante con dispositivo de apoyo. En este diseño, el diámetro del cabezal es mayor al del casco, y para su desmontaje se tiene que retirar por completo el cabezal (Flores E. R.).

En la Tabla J3, se pueden encontrar la identificación de cada letra con su respectivo cabezal, casco y cabezal trasero.

**Tabla J3.**

*Tipos de intercambiadores de calor designado por letras.*

	FRONT END STATIONARY HEAD TYPES	SHELL TYPES	REAR END HEAD TYPES
<b>A</b>	 CHANNEL AND REMOVABLE COVER	<b>E</b>  ONE PASS SHELL	<b>L</b>  FIXED TUBESHEET LIKE "A" STATIONARY HEAD
<b>B</b>	 BONNET (INTEGRAL COVER)	<b>F</b>  TWO PASS SHELL WITH LONGITUDINAL BAFFLE	<b>M</b>  FIXED TUBESHEET LIKE "B" STATIONARY HEAD
<b>C</b>	 REMOVABLE TUBE BUNDLE ONLY CHANNEL INTEGRAL WITH TUBE-SHEET AND REMOVABLE COVER	<b>G</b>  SPLIT FLOW	<b>N</b>  FIXED TUBESHEET LIKE "N" STATIONARY HEAD
<b>N</b>	 CHANNEL INTEGRAL WITH TUBE-SHEET AND REMOVABLE COVER	<b>H</b>  DOUBLE SPLIT FLOW	<b>P</b>  OUTSIDE PACKED FLOATING HEAD
<b>D</b>	 SPECIAL HIGH PRESSURE CLOSURE	<b>J</b>  DIVIDED FLOW	<b>S</b>  FLOATING HEAD WITH BACKING DEVICE
		<b>K</b>  KETTLE TYPE REBOILER	<b>T</b>  PULL THROUGH FLOATING HEAD
		<b>X</b>  CROSS FLOW	<b>U</b>  U-TUBE BUNDLE
			<b>W</b>  EXTERNALLY SEALED FLOATING TUBESHEET

Tomado de: TEMA (1999). Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, 8th edition, Figure N-1.2. 1999\_TEMA (8th 1999) Standards Of The Tubular Exchanger.pdf

Para elegir la mejor opción para el tipo de intercambiador, se realizó la Tabla J4, en donde se comparan seis tipos de intercambiadores más comunes con respecto a sus características principales, ventajas y desventajas.

**Tabla J4.**

*Comparación de intercambiadores de calor.*

<b>Tipo</b>	<b>Características principales</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>AES – Cabezal flotante interno</b>	Casco de un paso, tubos de doble paso con canal y cubierta desmontable, cabeza flotante con dispositivo de apoyo, con desviadores transversales.	Expansión térmica de los tubos respecto al casco. Fácil desmontaje. Puede tener entre 2 a 8 pasos.	Complejidad mecánica.
<b>BEM – De lámina y tubo fijo</b>	Es de un solo paso en tubo y casco. No tiene diferencia entre ambos extremos. Principalmente para servicios a altas presiones.	Simplicidad, junta de expansión en casco.	Limita la velocidad en los tubos, reduciendo el coeficiente de transferencia. No permite limpieza del casco.
<b>AEP – Flotante exterior</b>	Permite movimiento del cabezal flotante.	Facilita limpieza dentro del casco.	Alto mantenimiento para mantener el empaquetado y evitar fugas. Diseño costoso.
<b>CFU – De cabezal y tubos integrados</b>	Tiene conjunto de tubos en U. Desviador central unido a placa.	Permite fácil desmontaje del conjunto de tubos para limpieza. Diseño más económico.	Dificultad para sustituir tubos dañados.
<b>AKT – Rehervidor de caldera</b>	Casco especial (vertedero a la derecha de los tubos) para mantener líquido hirviendo.	Adecuado para reboilers, manejo de vapor y líquido.	Configuración limita las aplicaciones. Permite únicamente un número par de pasos por los tubos.
<b>AJW – Condensador de flujo dividido</b>	Desviador central divide el flujo en dos y el resto lo llevan a través de los tubos para enfriarse.	Eficiente para condensación de vapores (disminuye la pérdida de carga) y enfriamiento.	Diseño más complejo.

*Adaptada de: Ceja, R. E. Manual de diseño de equipos e instalaciones, sección de intercambiadores de calor. INTERCAMBIADORES DE CALOR-DISEÑO.pdf*

A partir de la anterior tabla, en la primera etapa del proceso se selecciona un intercambiador tipo AES, considerando las características térmicas y operativas del sistema. Este tipo cuenta con un cabezal estacionario tipo A (canal y cubierta desmontable), un casco tipo E (flujo de un solo paso), y un cabezal trasero tipo S (flotante con dispositivo de apoyo). Esta configuración permite una transferencia de calor eficiente, además de facilitar el mantenimiento y la limpieza del equipo. Por otra parte, para el condensador también se selecciona un intercambiador tipo AES, ya que permite desmontar el haz de tubos para su limpieza, lo cual es importante, ya que al trabajar con agua de enfriamiento no tratada, puede generar incrustaciones y afectar el rendimiento térmico a lo largo del tiempo.

### **Selección de distribución de tubería**

Existen diferentes patrones para la distribución de los tubos dentro del intercambiador de calor, el triangular de  $30^\circ$  o  $60^\circ$ , el cuadrado en línea de  $90^\circ$  y cuadrado rotado de  $45^\circ$  (Branan). El patrón triangular equilátero no permite trayectorias rectas, lo cual dificulta la limpieza y mantenimiento del equipo (Branan), sin embargo, este patrón favorece la superficie de distribución transferencia de calor, pero debido a su dificultad de mantenimiento es utilizado para fluidos con un factor de ensuciamiento bajo (Gómez Daza, Lopez Rico, Villalobos Perez, Castro, & Marleyn, 2017). Por otro lado, el patrón cuadrado en línea permite trayectorias rectas, facilitando así el mantenimiento del equipo. Este patrón genera menos caída de presión que el triangular, pero requiere una carcasa de mayor tamaño y presenta un coeficiente de transferencia de calor más bajo para una velocidad dada en muchos niveles de velocidad (Branan). En el caso del patrón cuadrado rotado, se obtiene una disposición similar al patrón triangular en cuanto a la falta de trayectorias rectas, sin embargo, se usa con fluidos turbulentos y su limpieza presenta mayores dificultades que la distribución cuadrada (Gómez Daza, Lopez Rico, Villalobos Perez, Castro, & Marleyn, 2017).

Por tanto, para el evaporador y el condensador, se seleccionó el patrón triangular de 60° puesto que el gas de combustión que ingresa al evaporador contiene un porcentaje muy bajo de material particulado (<0.0003%), por lo que se asume que el gas ingresa limpio. Por otra parte, el agua que ingresa al condensador es agua potable, la cual también contiene una baja concentración de compuestos químicos, menor o igual a 13 mg/L de agua (Alcaldía Mayor de Bogotá, 1998), por lo que no es necesario realizar mantenimiento frecuentemente.

### **Diámetro de la tubería OD y pitch.**

La selección del diámetro adecuado de la tubería del intercambiador de calor es importante puesto que este influye directamente en la eficiencia de transferencia de calor, la caída de presión y la resistencia mecánica de la tubería. El tamaño de la tubería se especifica mediante el diámetro interior y el grosor del tubo. Los tubos de menor diámetro poseen un mayor coeficiente de transferencia, por lo que los intercambiadoras son más compactos, sin embargo, a mayor diámetro la caída de presión dentro de la tubería es menor y se facilita el mantenimiento y limpieza de estos (Díaz Castro, Rojas Vargas, Sotelo Jiménez, & & Theran Suárez, 2020).

Los diámetros más utilizados para el diseño de los intercambiadores de calor son 3/8 y 3/4 in, puesto que son más asequibles económicamente y presentan un buen rendimiento. Generalmente, cuando es necesario realizar limpieza mecánica, el menor tamaño práctica de diámetro de tubería es 3/4 in (19 mm) (Díaz Castro, Rojas Vargas, Sotelo Jiménez, & & Theran Suárez, 2020). Por tanto, se seleccionó un diámetro de 3/4 in para el evaporador y el condensador del ORC.

Para el pitch o distancia mínima entre centro y centro de tubería, para la clase de aplicación seleccionada (clase C) los tubos deben tener una distancia mínima de 1.25 veces el diámetro

exterior de la tubería (TEMA, 1999). Por tanto, el pitch para este diseño es 0.9375 in (2.38125 cm).

A partir de la información anterior se obtuvo el siguiente diseño en Aspen EDR:

**Figura J2.**

*Diseño del evaporador E-102 en Aspen EDR.*

Calculation mode		Design (Sizing)	Recent	Previous
<b>Configuration</b>				
TEMA Type	A -	E -	S -	AES
Tube layout option	New (optimum) layout			
Location of hot fluid	Shell side			
Tube OD / Pitch	cm	1,905 / 2,3812	1,905 / 2,3812	/
Tube pattern	60-Rotated Tri.			
Tubes are in baffle window	Yes			
Baffle type	Single segmental			
Baffle cut orientation	Horizontal			
Default exchanger material	Carbon Steel			
<b>Size</b>				
Specify some sizes for Design	No			
Shell ID / OD	cm	/	25,7454 / 27,305	/
Tube length	cm		240	
Baffle spacing center-center (Bc)	cm		34	
Number of baffles			4	
Number of tubes / Tube passes		/	44 / 2	/
Shells in series			5	
Shells in parallel			7	

**Figura J3.**

*Diseño del condensador E-102 en Aspen EDR.*

Calculation mode		Design (Sizing)	Recent	Previous
<b>Configuration</b>				
TEMA Type	A -	E -	S -	AES
Tube layout option	New (optimum) layout			
Location of hot fluid	Tube side			
Tube OD / Pitch	in	0,75 / 0,9375	0,75 / 0,9375	/
Tube pattern	30-Triangular			
Tubes are in baffle window	Yes			
Baffle type	Single segmental			
Baffle cut orientation	Horizontal			
Default exchanger material	Carbon Steel			
<b>Size</b>				
Specify some sizes for Design	No			
Shell ID / OD	cm	/	30,7086 / 32,385	/
Tube length	cm		255	
Baffle spacing center-center (Bc)	cm		29,5	
Number of baffles			6	
Number of tubes / Tube passes		/	90 / 2	/
Shells in series			1	
Shells in parallel			1	

**Apéndice K. Elección de bomba**

La bomba desempeña un papel importante en el ORC, debido a que es el encargado de garantizar el incremento de la presión necesaria y la circulación del fluido orgánico al evaporador.

Los datos iniciales de la bomba son los siguientes:

**Tabla K1.**

*Datos iniciales de la bomba del ciclo orgánico de Rankine.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>Potencia hidráulica</b>	0.5127	kW
<b>Presión de descarga</b>	20	Bar
<b>Presión de entrada</b>	1.01325	Bar
<b>Flujo másico</b>	14.4	Kmol/h
<b>Flujo volumétrico</b>	0.861	m <sup>3</sup> /h
<b>Masa molar etanol</b>	46.07	kg/kmol
<b>Temperatura de entrada</b>	40	°C

Para la elección de la bomba, se tuvo principalmente en cuenta las bombas hidráulicas, ya que el etanol ingresa al equipo en estado líquido. Las bombas hidráulicas funcionan al transformar trabajo mecánico realizado sobre ellas en energía, la cual es comunicada a un líquido en forma cinética y de presión, con el fin de hacer que este líquido fluya por una tubería. En la Tabla K2, se observa la clasificación de diferentes bombas.

**Tabla K2.**

*Comparación de diferentes tipos de bombas.*

<b>Tipo de bombas</b>	<b>Principio de funcionamiento</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Aplicaciones típicas</b>
<b>Centrífuga de una etapa</b>	Impulso rotativo que acelera el fluido radialmente.	Diseño sencillo. Bajo costo. Flujo continuo.	No apta para altas presiones. Sensible a cavitación (presión disminuye por debajo de su presión de vapor, generando burbujas de vapor en el líquido).	Sistemas de agua. Procesos industriales.
<b>Centrífuga multietapas</b>	Múltiples impulsores en serie para aumentar la presión.	Adecuada para altas presiones, eficiencia mejorada.	Mayor complejidad mecánicas. Costo más elevado.	Calderas. Sistemas ORC. Alimentación de calderas.

<b>De engranajes</b>	Engranajes que desplazan el fluido entre sus dientes.	Manejo de fluidos viscosos. Diseño compacto.	Flujo pulsante. Desgaste con fluidos abrasivos.	Lubricación. Manejo de aceites y combustibles.
<b>De lóbulos</b>	Lóbulos giratorios que transportan el fluido.	Manejo de fluidos sensibles. Fácil limpieza.	Meno presión de operación. Costo elevado.	Industria alimentaria. Farmacéutica.
<b>De pistón</b>	Émbolo que desplaza el fluido en un cilindro.	Alta presión de salida. Caudal preciso.	Flujo pulsante. Mantenimiento más complejo.	Prensas hidráulicas. Dosificación de químicos.
<b>De diafragma</b>	Diafragma flexible que mueve el fluido.	Apta para fluidos corrosivos. Sin fugas.	Limitadas a bajas presiones. Eficiencia moderada.	Procesos químicos. Laboratorios. Dosificación.
<b>De tornillo</b>	Tornillos helicoidales que impulsan el fluido axialmente.	Flujo suave y continuo. Manejo de fluidos viscosos.	Costo alto. Mayor tamaño.	Lodos. Aceites pesados. Aguas residuales.
<b>Peristáltica</b>	Rodillos que comprimen una manguera flexible.	Sin contacto del fluido con partes mecánicas. Ideal para fluidos corrosivos.	Bajo caudal. Desgaste de la manguera.	Laboratorios. Industria alimentaria. Farmacéutica.

*Recuperado de: Sánchez Paz, F. S., & Sánchez López, E. (1993). Manual para selección y diseño de bombas. Universidad Autónoma de Occidente. <https://red.uao.edu.co/entities/publication/e0f73fd3-44dd-4ac1-a7d7-8adb7eb74c5e/full>*

A partir de la anterior tabla, se consideran como opciones viables las bombas de pistón y la centrifuga de multietapa para implementarse en el proceso. No obstante, al evaluar los requerimientos del sistema, cómo la presión de salida de 20 bar y el tipo de fluido, la bomba centrifuga multietapa se presenta como la opción más adecuada. Esto se debe a su capacidad para operar de manera eficiente a altas presiones, su diseño más compacto y su funcionamiento continuo. En contraste, aunque la bomba de pistón permite alcanzar presiones elevadas, su flujo pulsante y el mantenimiento que requiere puede presentar inconvenientes para la operación del sistema.

### Apéndice L. Elección de turbina

Al momento de seleccionar una turbina, es fundamental considerar las propiedades y características de cada tecnología. Entre los sistemas de generación de potencia se encuentran opciones como las turbinas de gas y los motores de combustión interna, los cuales utilizan

sustancias de trabajo que no experimentan cambio de fase Por otro lado, en los sistemas basados en vapor, se emplean turbinas de vapor que aprovechan precisamente el cambio de fase de la sustancia de trabajo para generar potencia. Este cambio de gases es clave, ya que permite almacenar una mayor cantidad de energía en la sustancia, en comparación con la cantidad que podría almacenarse únicamente mediante calentamiento (Vargas & Perilla, 2019).

Los datos iniciales de la turbina son:

**Tabla L1.**

*Datos iniciales de la turbina del ciclo orgánico de Rankine.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>Potencia</b>	31	kW
<b>Presión de salida</b>	1.01325	Bar
<b>Presión de entrada</b>	20	Bar
<b>Flujo másico</b>	14.4	Kmol/h
<b>Flujo volumétrico</b>	0.861	m <sup>3</sup> /h
<b>Masa molar etanol</b>	46.07	kg/kmol
<b>Temperatura de entrada</b>	233	°C

Para la elección de la turbina, se tuvo principalmente en cuenta las turbinas de vapor, ya que no es requerido combustión dentro de la turbina. La turbina de vapor contiene un rotor y un estator, el rotor se encuentra formado por ruedas de álabes unidas al eje, ésta es la parte móvil de la turbina. Por otra parte, el estator se encuentra formado por álabes que se encuentran unidos a la carcasa de la turbina. El eje de la turbina de vapor se encuentra acoplado a un generador, en donde se transforma la energía mecánica a una eléctrica. Las turbinas de vapor se clasifican según la energía contenida, el número de etapas, según la dirección del flujo de vapor, si existe o no extracción de vapor y por la presión de salida del vapor (Suárez, 2019).

En la Tabla L2, se observa una comparación entre los modos de operación de las turbinas.

**Tabla L2.**

*Comparación entre modos de operación de turbinas.*

<b>Tipo de turbina</b>	<b>Funcionamiento</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Fuente</b>
<b>Turbina de acción</b>	El fluido incide con alta velocidad sobre las palas, pero la presión se mantiene constante.	Diseño simple. Fácil mantenimiento.	Menor eficiencia en múltiples etapas.	Aplicaciones de baja a media potencia	(Rivas & Amórtegui, 2014)
<b>Turbina de reacción</b>	El fluido pasa a través de la turbina y ejerce presión sobre las palas.	Alta eficiencia en múltiples etapas.	Diseño más complejo. Mayor mantenimiento.	Plantas de generación de alta potencia	(Rivas & Amórtegui, 2014)
<b>Turbina monoetapa</b>	El fluido pasa a través de una sola etapa de expansión, donde la energía del fluido se convierte completamente en trabajo.	Construcción simple, robustas y seguras. Menor costo de instalación y mantenimiento.	Menor eficiencia en comparación con las turbinas multietapa.	Para pequeñas y medianas potencias.	(Torres, 2015) (Sandoval, 2018)
<b>Turbina multietapa</b>	El fluido se expande a través de varias etapas, cada uno con un conjunto de álabes, permitiendo un mejor aprovechamiento de la energía del vapor.	Mayor rendimiento que la turbina monoetapa. Se utilizan para turbinas de alta potencia (manejan flujos de alta presión). Menor pérdida de energía por fricción y calor.	Mayor complejidad e inversión. Mayor tamaño y peso. Mantenimiento detallado.	La demanda de potencias es muy elevada. En procesos industriales que requieren alta eficiencia energética.	(Torres, 2015) (Sandoval, 2018)

*Adaptado de: Chivata, Gustavo & Londoño, Carlos. (2014). Diseño y simulación de una turbina de vapor cuatro etapas para el laboratorio de térmicas y fluidos de la universidad los libertadores; Chacón, Diego. (2015). Mantenimiento de turbina de vapor en central termoelectrica del ingenio tululá y Martínez, Eder. (2018). Cálculo numérico del cambio de fase a diferentes condiciones de operación en la última etapa de una turbina de vapor. Obtenido de: <https://repository.libertadores.edu.co/server/api/core/bitstreams/a1eac67e-4970-4564-8d80-58f9ed4928be/content>; <http://www.repositorio.usac.edu.gt/2105/1/Diego%20Rafael%20Chac%C3%B3n%20Torres.pdf> y [http://www.riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/412/MASRND13\\_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/412/MASRND13_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y)*

A partir de la Tabla L2, en la que se comparan las turbinas de acción y reacción, así como las turbinas monoetapa y multietapa, se determina que la turbina ideal para la implementación del proyecto es una turbina de reacción multietapa. Al ser multietapa, el incremento en el número de etapas reduce la velocidad del rodete, manteniendo la velocidad de los álabes cerca del valor óptimo en relación con la velocidad del chorro de vapor (Torres, 2015).

La elección del tipo de reacción de una turbina se basa en la necesidad de alta eficiencia en la conversión de energía, ya que las turbinas de reacción permiten aprovechar tanto la presión como la velocidad del vapor, lo que es clave para maximizar la conversión de energía; por esta razón se ha seleccionado esta turbina. Además, la elección de una turbina multietapa responde la necesidad de reducir las pérdidas de energía por fricción y calor, lo que permite maximizar la eficiencia de conversión de calor en trabajo útil.

#### **Apéndice M. Elección de tanques de almacenamiento**

Para la selección de los tanques de almacenamiento del sistema, se seleccionaron tanques cilíndricos verticales debido a su eficiencia estructural y adecuación en el espacio disponible. Además, se consideraron características según el tipo de fluido a almacenar.

Para el almacenamiento de etanol se seleccionó un tanque cilíndrico vertical con techo flotante, recomendado para líquidos volátiles como el etanol, ya que permite reducir las pérdidas por evaporación y controlar de forma más eficiente la presión interna del tanque. Además, se considera importante que el tanque sea de un color que proteja contra la radiación solar para evitar el sobrecalentamiento del fluido y la corrosión del material, se sugiere un color claro como el blanco (Gordillo, 2007).

Partiendo del volumen requerido de etanol (3.28 m<sup>3</sup>), se aplicó un factor de seguridad del 25% para prevenir fenómenos de cavitación en la bomba. Posteriormente, para dimensionar el

tanque, se consideró que este se llenará como máximo hasta el 90% de su capacidad total, como medida de seguridad y para permitir la expansión térmica del fluido (Turton, Bailie, Whiting, & Shaiwitz, 1995).

Realizando el cálculo:

$$V_{total} = \frac{V_{etanol} * 1.25}{0.90} \quad (\text{Ec. 5})$$

Obteniendo un volumen total de diseño de 3.645 m<sup>3</sup>.

A partir de la heurística que establece que la altura óptima para un tanque de almacenamiento es de 3 m (Turton, Bailie, Whiting, & Shaiwitz, 1995), se calculó el diámetro correspondiente utilizando la ecuación del volumen de un cilindro.

$$V = \frac{\pi * D^2 * H}{4} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde,

V= volumen del tanque (m<sup>3</sup>)

H= altura del tanque (m)

D= diámetro del tanque (m)

Obteniendo un valor de 1,24 m para el diámetro.

Por otra parte, para el tanque de agua, partiendo del volumen operativo requerido de agua (14.88 m<sup>3</sup>), se consideró que el llenado máximo del tanque será del 90% de su capacidad total, como medida de seguridad del tanque (Turton, Bailie, Whiting, & Shaiwitz, 1995). Obteniendo un volumen total del tanque de 16.54 m<sup>3</sup>.

A partir de la heurística que establece una altura óptima de 3 m para taques de almacenamiento (Turton, Bailie, Whiting, & Shaiwitz, 1995), se calculó el diámetro del tanque con la ecuación del volumen de un cilindro (Ec. 6)

Obteniendo un valor de 2.65 m para el diámetro del tanque de agua.

**Apéndice N. Referencia para el diseño del plano de la planta**

El libro “Process Engineering and Plant Design” de Siddhartha Mukherjee, proporcionó directrices clave sobre el diseño de plantas industriales, incluyendo recomendaciones sobre el espaciamiento mínimo entre equipos, accesos para mantenimiento y seguridad operativa. En particular, se tomó como referencia la Tabla N1, la cual presenta una matriz con las distancias mínimas recomendadas entre diferentes tipos de equipos, sirviendo como guía para una distribución adecuada y segura dentro de la planta.

**Tabla N1.**

*Distanciamiento entre equipos.*

Sl. No.	From/To	Fired Heaters	Reactors	Distillation Columns	Vessels/ Drums	Compressors	Hydrocarbon Day Tanks	Hydrocarbon Pumps	Heat Exchangers	Air Fin Coolers
1	Fired Heaters	x	15	15	15	15	15	15	15	15
2	Reactors	15	x	4.5	4.5	9	15	7	M	4.5
3	Distillation Columns	15	4.5	x	3	7	15	5	M	3
4	Vessels/Drums	15	4.5	3	x	M	15	M	M	3
5	Compressors	15	9	7	M	x	15	7.5	7	7
6	Hydrocarbon Day Tanks	15	15	15	15	15	x	15	15	15
7	Hydrocarbon Pumps	15	7	5	M	7.5	15	x	M	M
8	Heat Exchangers	15	M	M	M	7	15	M	x	M
9	Air Fin Coolers	15	4.5	3	3	7	15	M	M	x

*Note:* M: Minimum required for operator or for maintenance access.  
*Source:* Adapted from OISD [1] and Bausbacher and Hunt [4].

Recuperado de: Mukherjee Siddhartha (2022). *Process Engineering and Plant Design The Complete Industrial Picture*. <https://www.routledge.com/Process-Engineering-and-Plant-Design-The-Complete-Industrial-Picture/Mukherjee/p/book/9780367248413>

**Apéndice O. Evaluación financiera.**

**Tabla O1.**

*Costos de insumos para el ciclo orgánico de Rankine.*

Compuesto	Cantidad	Costo [USD/kg]	Costo [USD]	Cita
<b>Etanol</b>	2569	\$0.72	\$1,856.26	(Corficolombia, 2024)

**Tabla O2.**

*Costos de servicios industriales en el sistema de aprovechamiento de gases de hornos crematorios.*

Servicio Industrial	Costo [USD]	Costo [USD/h]	Costo [USD/año]	Cita
<b>Agua [m³]</b>	\$0.003	\$0.06	\$540.34	(Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible)
<b>Energía eléctrica [kWh]</b>	\$0.07	\$0.3	\$2,353.4	(Electrificadora de Santander S.A E.S.P, 2025)

**Tabla O3.**

*Energía producida por sistema de generación eléctrica – ORC en el sistema propuesto.*

Energía producida [kWh]	Energía producida [kWh/día]	Energía producida [kWh/año]	Ganancias [USD/año]
<b>53</b>	638.5	233,057.8	\$61,065.08

**Tabla O4.**

*Costo de mano de obra en el sistema propuesto.*

Personal	Cantidad	Salario base [USD]	Remuneración y beneficios	Salario mensual por trabajador [USD]	Salario mensual neto [USD]	Salario neto anual [USD]
<b>Técnico operador</b>	2	\$365.07	50%	\$547.6	\$1,095.2	\$13,142.4

*Salario base tomado de: Talent.com. (s.f.). Salario para Operador en Colombia. Recuperado el 23 de Mayo de 2025, de <https://co.talent.com/salary?job=operador>*

**Apéndice P. Cálculo de la cantidad de agua necesaria para enfriar el gas**

Para estimar la masa de agua necesaria para enfriar la corriente del gas de combustión hasta alcanzar su temperatura adiabática de saturación, se realizó un balance de energía basado en los principios de termodinámica y utilizando la librería CoolProp que permite el acceso a propiedades termodinámicas (CoolProp).

Para realizar el cálculo, se partió de un balance de energía expresándose de la siguiente manera:

$$Z = \frac{m_G * C_{pT} * (T_{G1} - T_1)}{H_{fg1} + (C_{p1} * T_1) - (C_{p1} * T_w)} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde,

$Z$  = Masa total de agua que se evapora (kg)

$m_G$  = Masa total de los gases de combustión (kg)

$C_{pT}$  = Calor específico de la mezcla de los gases de combustión (J/kg\*K)

$T_{G1}$  = Temperatura de entrada de los gases de combustión (K)

$T_1$  = Temperatura final de los gases de combustión (K)

$H_{fg1}$  = Calor latente de vaporización del agua a T1(J/kg)

$C_{p1}$  = Calor específico del agua líquida evaluado a una temperatura promedio (K)

$T_w$  = Temperatura inicial del agua (K)

A continuación, se presenta el código de Matlab utilizado:

T\_1=300+273.15 %K

$$T\_W=25+273.15 \%K$$

$$T_{prom\_W2}=(373.15+T\_W)/2$$

$$T_{prom\_W}=(T\_1+373.15)/2$$

$$P\_1= 101363 \%Pa$$

$$Cp\_1=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('C', 'T', T_{prom\_W}, 'P', P\_1, 'water') \%J/kg*K$$

$$Cp\_2=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('C', 'T', T_{prom\_W2}, 'P', P\_1, 'water') \%J/kg*K$$

$$Hg\_1=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H', 'T', 373.15, 'Q', 1, 'water') \%J/kg*K$$

$$Hf\_1=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('H', 'T', 373.15, 'Q', 0, 'water') \%J/kg*K$$

$$Hfg\_1=Hg\_1-Hf\_1$$

$$T\_G1=760+273.15 \%K$$

$$T_{prom}=(T\_G1+T\_1)/2$$

$$P\_2=P\_1$$

$$m\_G=1.7401391 \%kg/s$$

$$O\_2=0.14610931 \%kg$$

$$N\_2=1.28347339$$

$$H2\_O=0.13167632$$

$$CO\_2=0.17$$

$$Cp\_o2=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('C', 'T', T_{prom}, 'P', P\_2, 'oxygen') \%J/kg*K$$

$Cp_{n2}=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('C', 'T', T_{prom}, 'P', P_2, 'nitrogen') \%J/kg*K$

$Cp_{h2o}=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('C', 'T', T_{prom}, 'P', P_2, 'water') \%J/kg*K$

$Cp_{co2}=py.CoolProp.CoolProp.PropsSI('C', 'T', T_{prom}, 'P', P_2, 'CarbonDioxide') \%J/kg*K$

$Cp_T=(O_2*Cp_{o2})+(N_2*Cp_{n2})+(H_2O*Cp_{h2o})+(CO_2*Cp_{co2}) \%J/kg*K$

$\%QC_G=m_G*Cp_T*(T_{G1}-T_1)$

$\%Z=(m_G*Cp_T*(T_{G1}-T_1))/(Hfg_1+(Cp_1*T_1)-(Cp_1*T_W)) \%kg$

$Z=(Cp_T*(T_{G1}-T_1))/((Hfg_1+(Cp_1*T_1)-(Cp_1*373.15))+(Cp_2*(373.15-T_W))) \%kg$

Obteniendo un valor de 69.30 mol/seg de agua y una humedad absoluta de 0.395 kg agua/ kg de aire seco.

### Apéndice Q. Cálculo de la eficiencia térmica del ORC

Para calcular la eficiencia térmica del ORC con cada fluido se utilizó la ecuación (Ec. 8) (Bao & Zhao, 2013).

$$n_{ORC} = \frac{W_{Neto}}{Q_{in}} \quad (Ec. 8)$$

En donde  $W_{Neto} = W_{Turb} - W_{Bomba}$

$W_{Turb}$  es el trabajo producido por la turbina.

$W_{Bomba}$  es la potencia consumida por la bomba.

$Q_{in}$  es el calor de entrada o el calor absorbido por el evaporador.

### Apéndice R. Cálculo del diámetro óptimo del sistema de tuberías

Para el diseño de tuberías, se identificaron las diferentes líneas del sistema, especificando su conexión entre equipos, permitiendo relacionar cada tramo con su función dentro del proceso.

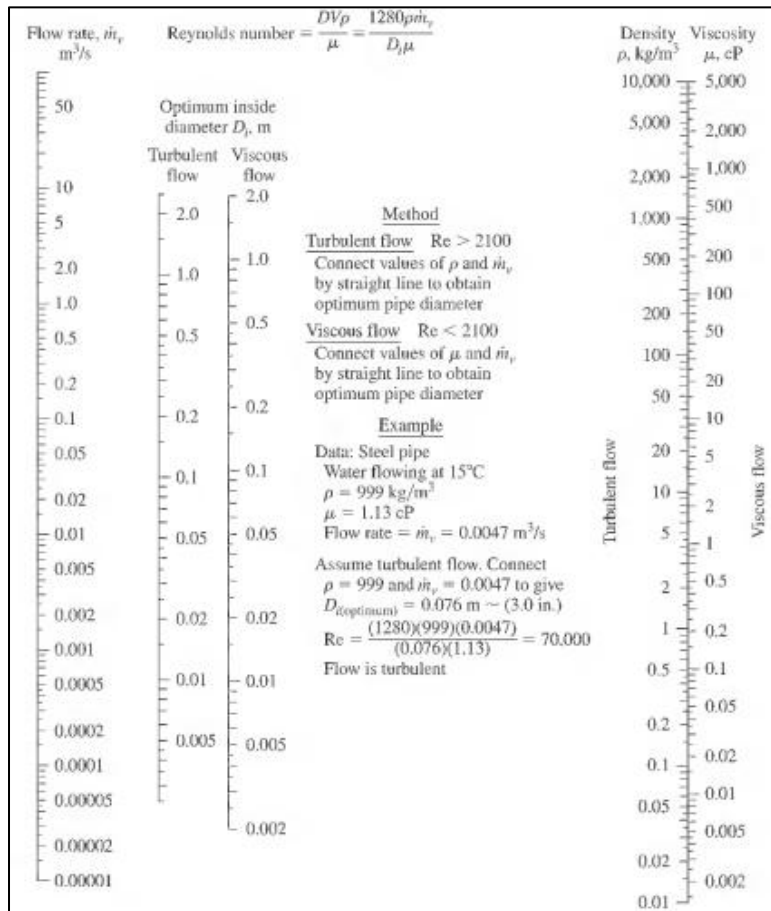
A continuación, se definieron el caudal volumétrico y la densidad del fluido de cada tubería, con

base en los resultados obtenidos mediante simulación en Aspen Hysys y el balance de masa correspondiente al proceso.

Con base en los datos anteriores, se calculó el diámetro óptimo de cada tubería utilizando el nomograma para la estimación de diámetros económicos óptimos de tuberías con flujo turbulento o viscoso, observado en la Figura R1:

**Figura R1.**

*Monograma para la estimación de diámetros económicos óptimos de tuberías con flujo turbulento o viscoso.*



Recuperado de: Max S. Peters, Klaus D. Timmerhaus & Ronald E. West (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. <https://caf-corporation.com/caf-capex/wp-content/uploads/2021/07/Plant-Design-and-Economics-for-Chemical-Engineers-PDFDrive.com-.pdf>

Posteriormente, se seleccionó la cédula de cada tubería, teniendo en cuenta que el espesor requerido para este proceso es el mínimo necesario, debido a que el sistema opera a bajas presiones lo que permite optimizar el diseño.

Para la elección del espesor, se utilizó la siguiente tabla:

**Tabla R1.**

*Dimensiones de tuberías de acero*

Nominal pipe size, in.	OD, in.	Schedule no.	ID, in.	Flow area per pipe, in. <sup>2</sup>	Surface per linear ft, ft <sup>2</sup>		Weight per lin ft, lb steel
					Outside	Inside	
¼	0.405	40 <sup>‡</sup>	0.269	0.058	0.106	0.070	0.25
		80 <sup>§</sup>	0.215	0.036	0.106	0.056	0.32
½	0.540	40	0.364	0.104	0.141	0.095	0.43
		80	0.302	0.072	0.141	0.079	0.54
¾	0.675	40	0.493	0.192	0.177	0.129	0.57
		80	0.423	0.141	0.177	0.111	0.74
1	0.840	40	0.622	0.304	0.220	0.163	0.85
		80	0.546	0.235	0.220	0.143	1.09
1½	1.05	40	0.824	0.534	0.275	0.216	1.13
		80	0.742	0.432	0.275	0.194	1.48
2	1.32	40	1.049	0.864	0.344	0.274	1.68
		80	0.957	0.718	0.344	0.250	2.17
2½	1.66	40	1.380	1.50	0.435	0.362	2.28
		80	1.278	1.28	0.435	0.335	3.00
3	1.90	40	1.610	2.04	0.498	0.422	2.72
		80	1.500	1.76	0.498	0.393	3.64
4	2.38	40	2.067	3.35	0.622	0.542	3.66
		80	1.939	2.95	0.622	0.508	5.03
5	2.88	40	2.469	4.79	0.753	0.627	5.80
		80	2.323	4.23	0.753	0.609	7.67
6	3.50	40	3.068	7.38	0.917	0.804	7.58
		80	2.900	6.61	0.917	0.760	10.3
8	4.50	40	4.026	12.7	1.178	1.055	10.8
		80	3.826	11.5	1.178	1.002	15.0
10	6.625	40	6.065	28.9	1.734	1.590	19.0
		80	5.761	26.1	1.734	1.510	28.6
12	8.625	40	7.981	50.0	2.258	2.090	28.6
		80	7.625	45.7	2.258	2.000	43.4
16	10.75	40	10.02	78.8	2.814	2.62	40.5
		60	9.75	74.6	2.814	2.55	54.8
20	12.75	30	12.09	115	3.338	3.17	43.8
24	16.0	30	15.25	183	4.189	4.00	62.6
	20.0	20	19.25	291	5.236	5.05	78.6
	24.0	20	23.25	425	6.283	6.09	94.7

<sup>†</sup>The data provided in this table are in the USCS units used by the pipe manufacturers in the United States.  
<sup>‡</sup>Schedule 40 designates former "standard" pipe.  
<sup>§</sup>Schedule 80 designates former "extra-strong" pipe.

Recuperado de: Max S. Peters, Klaus D. Timmerhaus & Ronald E. West (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. <https://caf-corporation.com/caf-capex/wp-content/uploads/2021/07/Plant-Design-and-Economics-for-Chemical-Engineers-PDFDrive.com-.pdf>

Sin embargo, dado que la tabla utilizada inicialmente maneja diámetros nominales de hasta 24 pulgadas, fue necesario complementar la información mediante la plataforma The Engineering ToolBox (The Engineering ToolBox), la cual permite consultar diámetros nominales de tuberías de hasta 42 pulgadas.

Finalmente, se procedió a consultar el valor comercial de cada tubería, teniendo en cuenta el material, el diámetro óptimo y la cédula seleccionada. Por otra parte, la longitud de cada línea fue obtenida con respecto al Plot Plant. De igual manera, el valor comercial de los codos se definió de la misma forma en que se costearon las tuberías.