

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Diseño térmico y estructural de un economizador condensativo para la  
recuperación de calor en una caldera

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

Whesly Jeremy Vera Morán

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

## **Dedicatoria**

---

El presente proyecto lo dedico a mis padres, hermanos y familiares, los cuales siempre me apoyaron y me motivaron a seguir adelante, brindándome apoyo moral y consejos para el desarrollo del proyecto.

## Agradecimientos

---

Mi más sincero agradecimiento a mis padres Giovanni Vera y Magaly Morán, los cuales fueron un apoyo moral muy fuerte para seguir adelante en mis estudios. También a mis hermanos y compañeros que estuvieron conmigo durante todo este proceso.

## Declaración Expresa

---

“Los derechos de titularidad y explotación, me(nos) corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; (nombre de los participantes) y doy(damos) mi(nuestro) consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

*Whesly Vera*

---

Whesly Vera

## **Evaluadores**

---

**Ing. José Macias**

Profesor de Materia

---

**Ing. Andrea Boero**

Tutor de proyecto

## **Resumen**

En la actualidad, el sector industrial se considera un pilar en la economía del país. La mayoría de estas industrias cuentan con calderas para la producción de vapor mediante el uso de combustibles fósiles, provocando una constante generación gases de combustión que aportan a los gases de efecto invernadero. Una forma de reducir esta generación de gases y el uso de recursos naturales es calentando el agua utilizada para la producción de vapor en las calderas mediante el uso de un economizador condensativo, el cual aprovecha el calor de los gases de combustión en la chimenea para calentar el agua. En este proyecto se evidenció el diseño de un economizador condensativo de flujo cruzado, el cual fue seleccionado en base a una matriz de decisión. De la misma forma los materiales fueron elegidos en base a criterios de diseño establecidos y tomando como referencia la sección VIII de la norma ASME y las recomendaciones TEMA. De acuerdo con los cálculos realizados, se evidenció un aumento en la eficiencia de la caldera desde un valor del 80% al 88.75%, generando un ahorro de combustible y una reducción en los gases de combustión del 7%. Finalmente, se demostró la viabilidad económica del proyecto mediante el análisis de la tasa interna de retorno teniendo como resultado un valor del 106%.

**Palabras Clave:** Diseño de intercambiador, Economizador, Eficiencia, Ahorro de combustible.

## **Abstract**

*Currently, the industrial sector is regarded as a cornerstone of the country's economy. Most of these industries possess boilers for steam production through the utilization of fossil fuels, leading to a continuous generation of combustion gases that contribute to greenhouse gas emissions. One method of mitigating this gas generation and the depletion of natural resources is by heating the water utilized for steam production within the boilers through the application of a condensing economizer. This device harnesses the heat from the combustion gases in the chimney to heat the water. Within this project, the design of a crossflow condensing economizer was demonstrated, selected based on a decision matrix. Similarly, materials were chosen according to established design criteria, referencing ASME Section VIII and TEMA recommendations. Calculations indicated an enhancement in boiler efficiency from 80% to 88.75%, yielding a 5% fuel savings and a 7% reduction in combustion gases. Ultimately, the project's economic viability was proven through an internal rate of return analysis, resulting in a value of 106%.*

**Keywords:** *Design of an exchanger, Economizer, Efficiency, Fuel savings.*

## Índice general

Resumen.....	I
Abstract.....	II
Índice general.....	III
Abreviaturas.....	VI
Simbología.....	VII
Índice de figuras.....	XI
Índice de tablas.....	XI
Índice de planos.....	XIII
Capítulo 1.....	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Descripción del problema.....	2
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 <i>Objetivo general</i> .....	4
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	4
1.5 Marco teórico.....	5
1.5.1 Calderas de Vapor.....	5
1.5.2 Tipos de Calderas.....	6
1.5.3 Recuperadores de Calor.....	7
1.6 Normativa aplicable.....	10
1.6.1 Manual HEDH.....	11
1.6.2 Norma ASME-Sección VIII.....	11
1.6.3 Recomendaciones TEMA.....	12
Capítulo 2.....	13
2.1 Metodología.....	14

2.2 Características de la caldera.....	16
2.3 Especificaciones de diseño .....	16
2.4 Criterios de selección.....	17
2.5 Alternativas de diseño.....	18
2.6 Selección de alternativas de diseño.....	19
2.6.1 Selección del intercambiador de calor. ....	19
2.6.2 Selección de materiales.....	20
2.7 Dimensionamiento del economizador.....	21
2.7.1 Datos iniciales.....	21
2.7.2 Propiedades de los gases de combustión. ....	24
2.7.3 Propiedades del agua de alimentación. ....	26
2.7.4 Diseño térmico – Análisis termodinámico.....	26
2.7.5 Diseño térmico – Análisis de transferencia de calor.....	28
2.7.6 Efectividad del economizador.....	34
2.7.7 Caídas de presión .....	35
2.7.8 Aislamiento térmico.....	36
2.7.9 Impacto ambiental.....	38
2.7.10 Evaluación financiera.....	39
2.7.11 Dimensiones iniciales .....	40
2.7.12 Simulación .....	40
Capítulo 3.....	44
3.1 Resultados y análisis .....	45
3.2 Diseño final del economizador .....	45
3.3 Simulación .....	48
3.4 Sesgo .....	50

3.5 Comparación del sistema con y sin economizador .....	51
3.6 Rendimiento del economizador .....	52
3.7 Manual de operación.....	52
3.7.1 Puesta en marcha del equipo.....	53
3.7.2 Manual de mantenimiento.....	53
3.8 Impacto ambiental.....	54
3.8.1 Evaluación del impacto ambiental .....	54
3.9 Evaluación financiera.....	56
3.9.1 Costo de materiales.....	56
3.9.2 Costo de mano de obra.....	57
3.9.3 Costos ingenieriles.....	58
3.9.4 Flujo de caja.....	59
Capítulo 4.....	60
4.1 Conclusiones .....	61
4.2 Recomendaciones.....	62
Referencias.....	63
Apéndices.....	66

### **Abreviaturas**

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
GLP	Gas Licuado de Petróleo
GEI	Gases de Efecto Invernadero
HEDH	Heat Exchanger Design Handbook
ASME	American Society of Mechanical Engineers
TEMA	Tubular Exchanger Manufacture Asociation
BHP	Break Horse Power
PCI	Poder Calorífico Inferior
LMTD	Logarithmic Mean Temperature Difference

## Simbología

$P_t$	Presión de trabajo
$T_v$	Temperatura de salida de vapor
$\dot{m}_{\text{vapor}}$	Flujo másico de vapor
$\eta$	Eficiencia
$Q_{\text{comb}}$	Transferencia de energía del combustible
$Q_{\text{vapor}}$	Transferencia de energía del vapor
$Q_{\text{gases}}$	Transferencia energía de los gases de la chimenea
$\dot{m}_{\text{comb}}$	Flujo másico de combustible
$\dot{m}_{\text{aire}}$	Flujo másico de aire
$\dot{m}_{\text{agua}}$	Flujo másico de agua
$\dot{m}_{\text{gases}}$	Flujo másico de los gases de combustión
$\dot{q}_{\text{in}}$	Flujo de calor entregado
$\dot{q}_{\text{real}}$	Flujo de calor aprovechado
$O_2$	Oxígeno
$N_2$	Nitrógeno
$C_3H_8$	Propano
$C_4H_{10}$	Butano
$H_2O$	Agua
$CO_2$	Dióxido de carbono
$r'_{a/c}$	Relación aire/combustible
$\gamma_i$	Fracción volumétrica

$\alpha_m$	Peso molecular
$\beta_i$	Fracción de masas
$C_p$	Calor específico
$k_g$	Conductividad
$c_{pg}$	Calor específico de los gases de combustión
$\dot{Q}_{H_2O}$	Flujo de calor del agua
$\dot{Q}_{gases}$	Flujo de calor de los gases de combustión
$T_{1-gases}$	Temperatura de entrada de los gases
$T_{2-gases}$	Temperatura de salida de los gases
$h_{sal-H_2O}$	Entalpía de salida del agua de alimentación
$h_{ent-H_2O}$	Entalpía de entrada del agua de alimentación
$T_{1-H_2O}$	Temperatura de entrada del agua
$T_{2-H_2O}$	Temperatura de salida del agua
$F_t$	Factor de corrección de la LMTD
$U_o$	Coefficiente global de transferencia de calor
$A_o$	Área total de transferencia de calor
$h_t$	Coefficiente convectivo para el agua
$h_o$	Coefficiente convectivo para el gas
$A_t$	Área de tubo liso
$A_f$	Área libre de la aleta
$A_s$	Área de flujo de los gases
$A_d$	Área del economizador
$r_o$	Radio externo del tubo

$r_i$	Radio interno del tubo
$\delta$	Espesor de la aleta
$L_f$	Longitud de la aleta
$L_t$	Longitud del tubo
$N$	Número de tubos
$n$	Número de aletas por pulgada
$\dot{m}_{\text{tubo}}$	Flujo másico del agua por tubo
$V_{\text{tubos}}$	Velocidad en los tubos
$\rho_{\text{agua}}$	Densidad del agua
$V_{\text{gases}}$	Velocidad del gas
$\rho_{\text{gases}}$	Densidad de los gases de combustión
OD	Diámetro externo del tubo
$V_{\text{smax}}$	Velocidad máxima del gas
$Re_t$	Número de Reynolds del agua
$ID_t$	Diámetro interno del tubo
$\nu$	Viscosidad cinemática
$D_h$	Diámetro hidráulico
$P_p$	Perímetro proyectado
$Re_g$	Número de Reynolds del gas
$N_{u_t}$	Nusselt del agua
Pr	Número de Prandtl
$k_f$	Conductividad térmica
$\varepsilon$	Efectividad de la transferencia

$h_f$	Pérdidas de fricción en el fluido
$g$	Gravedad
$f$	Factor de fricción
$\Delta P$	Pérdidas de presión
$X$	Factor de corrección
$\dot{Q}_a$	Calor transferido al ambiente
$h_s$	Coefficiente de calor por convección del aire
$A_s$	Área de superficie
$T_s$	Temperatura de la superficie
$T_\infty$	Temperatura del ambiente
$Ra_i$	Número de Rayleigh
$T_{prom}$	Temperatura promedio
$R_{conv}$	Resistencia convectiva
$R_{cond}$	Resistencia conductiva
$L_e$	Espesor de aislante

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Configuración interna de una caldera acuotubular.....	6
<b>Figura 2</b> Estructura interna de una caldera pirotubular.....	7
<b>Figura 3</b> Caldera con su respectivo economizador en diferentes configuraciones.....	8
<b>Figura 4</b> Diagrama de flujo para el diseño del economizador.....	15
<b>Figura 5</b> Balance de masa y energía para la caldera pirotubular.....	21
<b>Figura 6</b> Flujos presentes en el economizador.....	27
<b>Figura 7</b> Ventana de la versión de prueba del software SolidWorks.....	40
<b>Figura 8</b> Selección del tipo de análisis para la simulación.....	41
<b>Figura 9</b> Definición de fluidos en el economizador.....	41
<b>Figura 10</b> Ingreso de condiciones iniciales.....	42
<b>Figura 11</b> Condiciones de frontera del agua de alimentación.....	42
<b>Figura 12</b> Condiciones de frontera del aire.....	43
<b>Figura 13</b> Líneas de flujo de los gases de combustión en el economizador.....	49
<b>Figura 14</b> Distribución de temperaturas del economizador.....	50

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Datos de operación de la caldera.....	16
<b>Tabla 2</b> Propiedades del GLP.....	16
<b>Tabla 3</b> Configuraciones de acuerdo con el sentido de flujo.....	18
<b>Tabla 4</b> Tipo de superficie absorbente.....	19
<b>Tabla 5</b> Matriz de decisión y selección de mejor alternativa.....	19
<b>Tabla 6</b> Características de posibles materiales para tubería.....	20
<b>Tabla 7</b> Características de posibles materiales para el cuerpo.....	21
<b>Tabla 8</b> Descripción de variables mostradas en la Figura 5.....	22
<b>Tabla 9</b> Relación de gases.....	24
<b>Tabla 10</b> Propiedades termofísicas de los gases de combustión.....	25
<b>Tabla 11</b> Principales propiedades del agua de alimentació.....	26
<b>Tabla 12</b> Descripción de variables utilizadas.....	29
<b>Tabla 13</b> Correlación para determinar las variables $C1$ y $m$ .....	33

<b>Tabla 14</b>	Matriz de impactos ambientales para el proceso de manufactura del equipo .....	38
<b>Tabla 15</b>	Dimensiones iniciales del economizador .....	40
<b>Tabla 16</b>	Variación del número de tubos con respecto al diámetro .....	46
<b>Tabla 17</b>	Dimensiones externas del economizador .....	46
<b>Tabla 18</b>	Resultados para el diseño del economizador .....	47
<b>Tabla 19</b>	Resultado de variables termodinámicas .....	48
<b>Tabla 20</b>	Datos de temperaturas obtenidas de la simulación .....	49
<b>Tabla 21</b>	Porcentaje de error de las temperaturas obtenidas en la simulación .....	51
<b>Tabla 22</b>	Pérdidas de calor generados en una caldera con y sin economizador .....	51
<b>Tabla 23</b>	Precio estimado del consumo de combustible GLP .....	52
<b>Tabla 24</b>	Manual de operación del economizador .....	53
<b>Tabla 25</b>	Criterios para el análisis del impacto en el proceso de manufactura .....	54
<b>Tabla 26</b>	Matriz de evaluación del impacto ambiental .....	55
<b>Tabla 27</b>	Producción de CO <sub>2</sub> expulsado a la atmósfera .....	56
<b>Tabla 28</b>	Lista de materiales y precios para el desarrollo del proyecto .....	56
<b>Tabla 29</b>	Costo de máquinas para la fabricación del economizador .....	57
<b>Tabla 30</b>	Personal necesario para el proceso de fabricación .....	58
<b>Tabla 31</b>	Costos de ingeniería .....	58
<b>Tabla 32</b>	Costo total de diseño e implementación del proyecto .....	59

## Índice de planos

<b>Plano 1</b> Plano de la estructura del economizador.....	70
---	----

# Capítulo 1

## 1.1 Introducción

En la actualidad, la búsqueda de soluciones energéticas eficientes y sostenibles es vital debido al crecimiento de la demanda energética y su impacto ambiental negativo, como el cambio climático. El sector industrial, al utilizar combustibles fósiles, es uno de los principales contribuyentes al calentamiento global al generar grandes cantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), un gas de efecto invernadero. Esto ha aumentado la importancia de abordar esta problemática a nivel mundial.

De acuerdo con la edición 71<sup>a</sup> del informe *Statistical Review of World Energy* (bp, 2022), la demanda de energía tuvo un aumento del 5.8% en el 2021 con respecto al año 2020, de los cuales se registró que el 82% fue proporcionada por combustibles fósiles. Aunque este porcentaje ha tenido una reducción con el paso de los años, se sigue dependiendo de manera significativa de los combustibles fósiles. Centrándonos en los procesos industriales, las emisiones de CO<sub>2</sub> aumentaron en un 4.6% en el año 2020.

## 1.2 Descripción del problema

Durante un largo periodo de tiempo, los combustibles fósiles, tales como el petróleo, el gas licuado de petróleo (GLP) y el carbón, han sido la fuente principal de energía en los procesos industriales. Sin embargo, su uso continuo ha generado preocupaciones debido a los múltiples impactos asociados. Uno de los usos más importantes de los combustibles fósiles en las industrias es para generación de calor y vapor a alta presión mediante calderas, las cuales son utilizadas para diversos fines.

En el contexto ecuatoriano, se ha evidenciado un aumento del 19.29% en el consumo de combustibles durante el año 2021 en comparación con el año 2020, según lo expuesto en el informe publicado por la *Integrated Carbon Observation System* (Global Carbon Project, 2022). Ese aumento en el uso de derivados de petróleo en el Ecuador no representa mucho a

nivel global. Pero, considerando que el cambio climático es un problema global, todo lo que se pueda hacer en cualquier lado del mundo para disminuir los GEI, es importante. Según un análisis realizado sobre la intensidad energética en Ecuador (Remache et al., 2019), el sector industrial del país es responsable de aproximadamente el 19% del consumo total de energía y contribuye con el 13% de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

El uso de combustibles fósiles como fuente de energía en Ecuador no ha podido ser reemplazado por completo, a pesar de contar con fuentes de energía sostenible. En la industria alimentaria, la generación de calor/vapor es esencial, pero actualmente se realiza mediante la combustión de derivados de petróleo. Además, los precios volátiles de estos combustibles representan una preocupación adicional para Ecuador, ya que depende en gran medida de su importación.

### **1.3 Justificación del problema**

Dado que Ecuador es un país altamente vulnerable a los impactos climáticos, resulta crucial evaluar y regular de manera rigurosa las emisiones de gases contaminantes derivadas del uso de calderas alimentadas con combustibles fósiles. Por lo tanto, es esencial adoptar medidas adecuadas para reducir y controlar estas emisiones, promoviendo así la sostenibilidad y la preservación del entorno natural.

De acuerdo con estudios realizados (Cleaver Brooks, 2023), en las calderas el 15% de las pérdidas de calor se da en los gases de combustión, lo que disminuye la eficiencia de la caldera. La temperatura que poseen los gases de combustión puede utilizarse como fuente de calor para mejorar el rendimiento del proceso, provocando un ahorro de entre el 10 y 15% en el uso de combustible, además de reducir las emisiones de gases en alrededor de 761 toneladas de CO<sub>2</sub> al año (Sánchez Calderón, 2012). Por otra parte, (Restrepo, 2021) concluyó

que al aprovechar los gases de combustión de la caldera se pueden reducir los consumos de combustible hasta un 7.55% al año, creando un ahorro económico considerable.

Mediante la implementación de sistemas eficientes que permitan capturar y reutilizar estos gases, se podría lograr una optimización en el consumo de combustible y una reducción en las emisiones contaminantes. Esta estrategia representa una alternativa viable para fomentar una mayor sostenibilidad en la industria, maximizando el aprovechamiento de los recursos energéticos y minimizando el impacto ambiental asociado al uso de combustibles fósiles.

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo general***

Diseñar un economizador condensativo para una caldera de 200 BHP aplicando principios de ingeniería y las normativas pertinentes, con el fin de calentar el agua de alimentación antes del ingreso a la caldera mediante el uso de los gases de combustión.

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

- Identificar los materiales, partes y accesorios necesarios para el diseño teórico del economizador condensativo, aplicando conceptos del proceso de diseño con el fin de seleccionar las mejores alternativas para optimizar el rendimiento del equipo.
- Diseñar un economizador condensativo teniendo en cuenta los aspectos prácticos como la geometría, disposición y operación, para facilitar las tareas de montaje/desmontaje y mantenimiento.
- Demostrar la factibilidad del proyecto mediante un análisis de comparación de costos y comprobar su comercialización mediante el análisis de la tasa interna de retorno (TIR).

## 1.5 Marco teórico

### 1.5.1 Calderas de Vapor

Las calderas de vapor son máquinas térmicas completamente cerradas y a presión, diseñadas para recibir un líquido, generalmente agua. Su funcionamiento se basa en la transferencia de energía proveniente de reacciones químicas, en la mayoría de los casos debido al uso de combustibles fósiles, hacia el agua que circula en su interior, provocando su transformación en vapor (conocido como fluido caloportador). Este vapor se emplea en una amplia gama de aplicaciones, abarcando desde la generación de energía eléctrica hasta la producción de alimentos (Restrepo, 2021).

La estructura de una caldera va a depender del tipo de ésta, sin embargo, las principales partes de una caldera son las siguientes (Barrera Puigdollers et al., 2018):

- **Quemador:** es el encargado de quemar el combustible que ingresa a la caldera.
- **Hogar o cámara de combustión:** contiene al quemador y en su interior se realiza la combustión y también se generan los gases calientes resultado de estas. Este componente está totalmente sellado debido a las altas temperaturas alcanzadas.
- **Tubos de intercambio de calor:** dependiendo del tipo de caldera, el fluido que atraviesa los tubos es diferente. Estos tubos están rodeados por aletas con el fin de mejorar la transferencia de calor entre los gases y el fluido.
- **Chimenea:** es un ducto que cumple la función de transportar los gases producto de la combustión después de haber cedido su calor al fluido caloportador.

- **Carcasa:** contiene el hogar y el cuerpo de tubos de intercambio de calor.

Este cuerpo debe estar recubierto por un material aislante, con el fin de reducir las pérdidas de calor y proteger a los operadores de éste.

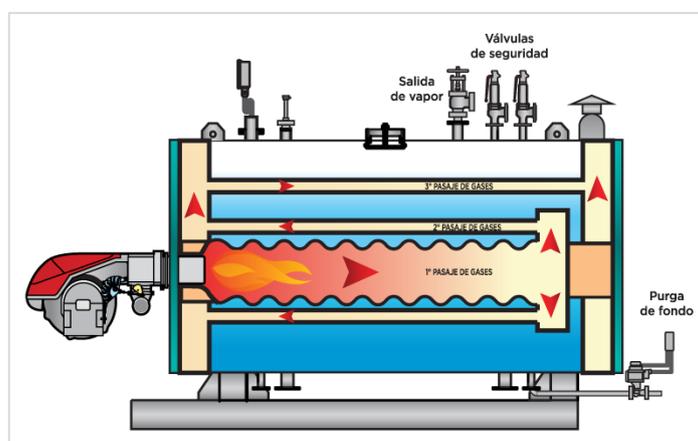
### 1.5.2 Tipos de Calderas

Las calderas se pueden clasificar de acuerdo con diversos criterios y aplicaciones, sin embargo, para este proyecto, se tendrá como referencia la disposición relativa entre el fluido a calentar y los gases resultados de la combustión, sin tomar en cuenta el tipo de combustible utilizado.

- **Calderas Acuotubulares.** Estas calderas se caracterizan por tener los gases de combustión rodeando el haz de tubo mientras que el agua circula en el interior de dichos tubos (Figura 1). Además, presentan una ligera inclinación para facilitar el ascenso del vapor, ya que este tipo de caldera no genera vapor puro, sino una mezcla de vapor y agua. El agua utilizada en este tipo de calderas debe ser tratada con diferentes químicos antes de ingresar a los tubos, con el fin de evitar la mayor cantidad de daños en los tubos de la caldera ya sea por corrosión o golpes de ariete.

**Figura 1**

*Configuración interna de una caldera acuotubular*

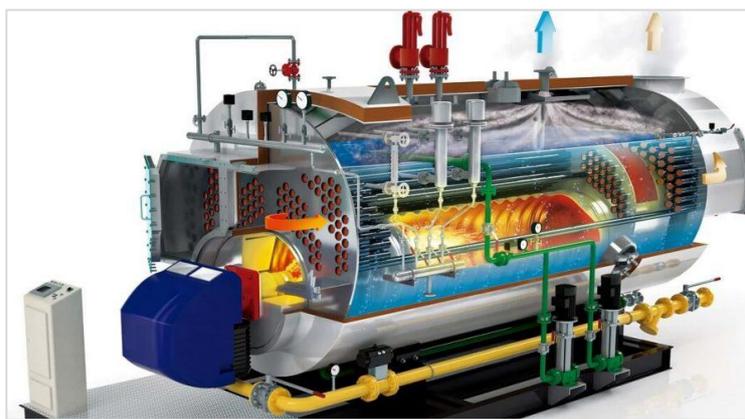


*Nota:* Figura obtenida de (Calderas Markowicz, n.d.)

- **Calderas Piro tubulares.** Por otra parte, en este tipo de caldera los gases de combustión generados en el hogar son los que circulan por el interior de los tubos hasta llegar a la chimenea y ser liberados al ambiente (Figura 2). Durante todo el trayecto de los gases, el agua que recibe el calor se encuentra en el cuerpo de la caldera, la cual rodea completamente los tubos, recibiendo de la manera más directa posible toda la energía transferida, hasta hacerla ebullición y transformarla en vapor (Spirax Sarco, 1999).

**Figura 2**

*Estructura interna de una caldera piro tubular*



*Nota:* Figura obtenida de (Moreno, n.d.)

### 1.5.3 Recuperadores de Calor

La energía térmica contenida en los gases emitidos por la cámara de combustión de la caldera, son expulsado directamente por la chimenea. La temperatura de los gases de combustión depende de la eficiencia de la caldera ya que si se tiene una eficiencia del 84% las temperaturas de los gases varían entre 300 y 400 °F, esta variación se da debido al tipo de combustible utilizado. A medida que aumenta la eficiencia de la caldera, la temperatura de los gases disminuye, teniendo una relación inversamente proporcional (Clever Brooks, 2023). De igual forma, la salida de los gases con estas temperaturas los convierte en una fuente de energía desperdiciada reduciendo la eficiencia de la caldera. Debido a estas circunstancias, se presentan las oportunidades de crear equipos capaces de recuperar el calor desperdiciado a la atmosfera, como es el caso de los economizadores, los cuales otorgan diferentes beneficios entre los cuales los más destacados son el aumento de la eficiencia de la

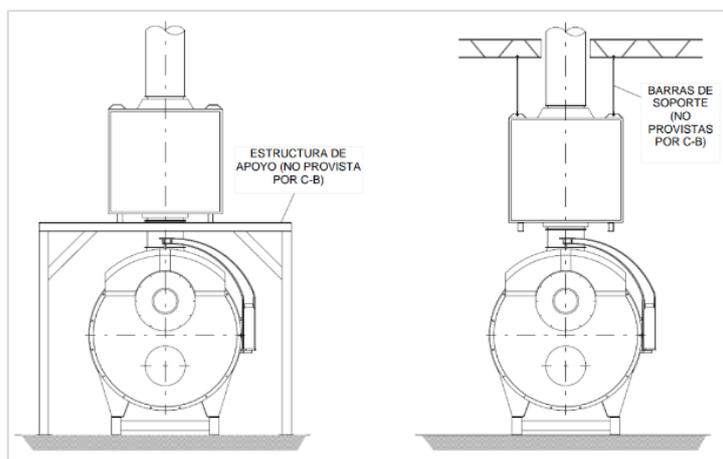
caldera para la generación de vapor y la reducción del uso de combustible junto con los gases de efecto invernadero generados (Restrepo, 2021).

#### 1.5.4 Economizadores.

Los economizadores para caldera son intercambiadores de calor, los cuales aprovechan los gases de la salida de la cámara de combustión por la chimenea. Están formados por un haz de tubos lisos, los cuales puede ser aleteados o corrugados; por los cuales circula el agua de alimentación de la caldera con el fin generar una transferencia de calor desde los gases de combustión hacia el agua (Figura 3), provocando que esta ingrese a una temperatura mayor a la que ingresaría normalmente.

**Figura 3**

*Caldera con su respectivo economizador en diferentes configuraciones*



*Nota:* Figura obtenida de (Cleaver Brooks, 2023b)

El tipo de economizador o calentador de aire va a depender de diferentes factores, entre los cuales se presentan:

- El combustible utilizado en la caldera.
- La presión de trabajo de la caldera.
- La cantidad de vapor requerida por los procesos de la industria.

- La temperatura de rocío de los gases de combustión.
- El tipo de caldera y la disposición de esta en la planta.

Cabe recalcar, que la cantidad de calor que puede ser recuperada por el economizador normal está limitada por el punto de rocío ácido de los gases de combustión. Cuando los gases de combustión atraviesan el economizador de la caldera, transferirán calor al agua que circula dentro del economizador. A medida que el agua se calienta, puede llegar a una temperatura cercana a su temperatura de punto de rocío, la cual produce la condensación del agua en los gases.

La condensación del vapor de agua puede ser problemática en los economizadores de calderas por varias razones:

- **Corrosión:** La presencia de agua condensada puede provocar la corrosión de los componentes del economizador, especialmente si el agua contiene impurezas o compuestos ácidos. La corrosión puede dañar los tubos, intercambiadores de calor y otras partes del sistema, reduciendo su vida útil y aumentando los costos de mantenimiento y reemplazo.
- **Taponamiento:** La condensación del vapor de agua también puede dar lugar a la formación de depósitos de agua o lodo en el interior del economizador. Estos depósitos pueden obstruir los tubos y reducir la eficiencia del intercambio de calor.

Dependiendo de las condiciones y la composición de los gases de combustión, también puede haber la presencia de otros compuestos en forma de condensado. Estos compuestos pueden incluir:

- **Ácidos:** Si los gases de combustión contienen óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), que son subproductos de la combustión de combustibles fósiles, pueden formarse ácidos al reaccionar con el agua condensada. Por ejemplo, el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) puede reaccionar con el agua para formar ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), mientras que el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) puede formar ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>).
- **Sales:** Si el agua condensada contiene impurezas como minerales o compuestos disueltos, estos pueden precipitar y formar sales. Estas sales pueden incluir sulfatos, nitratos, cloruros u otras sustancias dependiendo de la composición química de los gases de combustión y las características del agua.

## 1.6 Normativa aplicable.

Para la selección de un determinado tipo de intercambiador de calor (economizador) es necesario tener de guía rutinas previamente creadas, esto con el fin de conocer los requerimientos necesarios a la hora de realizar un diseño. Dentro de estos requerimientos, se encuentran los establecidos por el cliente y los establecidos por las normas de cada país.

En el ámbito de los intercambiadores de calor, los procedimientos y recomendaciones estándar ya están previamente establecidos por algunas organizaciones e instituciones especializadas. Dentro de este proyecto se tomará en cuenta los siguientes aspectos:

- Diseño térmico y mecánico:
  - *Heat Exchanger Design Handbook (HEDH).*
- Diseño mecánico:
  - Normas Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME).  
Sección VIII (Recipientes a presión).

- Recomendaciones *Tubular Exchanger Manufacturer Association* (TEMA).

### 1.6.1 Manual HEDH

Este manual establece métodos para el diseño de intercambiadores de calor, permitiendo realizar los procesos manualmente con el fin de determinar todos los parámetros esenciales para su construcción. Este método tiene en cuenta criterios como la facilidad de la limpieza y mantenimiento, flujos máximos y mínimos, erosión, caídas de presión, limitaciones de tamaño, etc., los cuales abarcan varios puntos para tener en cuenta en el desarrollo de este proyecto (Cabanzón Labat, 2018).

### 1.6.2 Norma ASME-Sección VIII

Esta norma se encuentra dividida en las siguientes secciones:

- **Requerimientos generales:** Este parte está constituida por una serie de párrafos UG-XX, en donde se establecen los requisitos mínimos a cumplir con respecto a los materiales, el diseño, las ecuaciones para el cálculo de espesores, factores de seguridad, etc.
- **Procesos de fabricación:** Esta sección considera la fabricación de los recipientes a presión, así como también los requisitos que deben cumplir los procesos de soldadura y la categoría de las juntas a utilizar para su fabricación.
- **Materiales:** Esta subsección brinda una completa información referente a los materiales que se han de utilizar para la construcción de los equipos, teniendo en cuenta los esfuerzos admisibles para aceros al carbono, aleados o inoxidables.

### 1.6.3 Recomendaciones TEMA.

Como su nombre lo indica, solo son recomendaciones que se deben tener en cuenta al momento de diseñar un intercambiador de calor tubulares. Toma en cuenta aspectos como los tipos y designaciones utilizadas, dividiendo estos aspectos en tres clases:

- **Clase R:** Están especifican el diseño, fabricación y materiales para los intercambiadores de calor no sometidos a llamas, para la industria.
- **Clase C:** Especifica el diseño, fabricación y materiales para los intercambiadores de calor no sometidos a llamas, para procesos comerciales moderados.
- **Clase B:** Especifica el diseño, fabricación y materiales para los intercambiadores de calor no sometidos a llamas, para procesos de la industria química.

## **Capítulo 2**

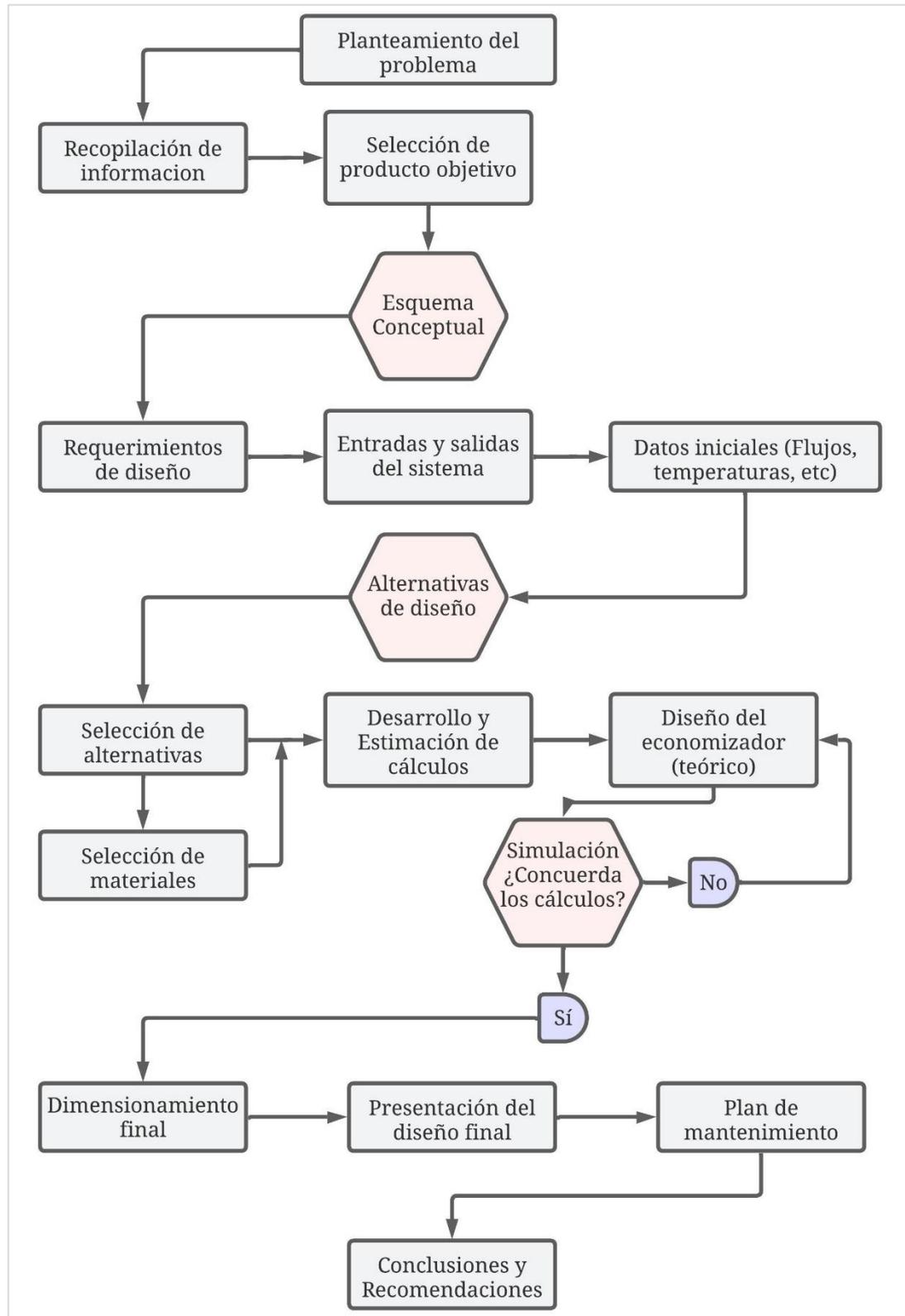
## **2.1 Metodología**

La metodología se basa en un enfoque ingenieril de acuerdo con los pasos detallados en un flujograma (Figura 4).

El objetivo principal es mejorar el rendimiento térmico de una caldera pirotubular de 200 BHP, utilizando GLP como combustible, evaluando diversas alternativas de diseño con el propósito de reducir el flujo de gases de combustión emitidos al ambiente.

Figura 4

Diagrama de flujo para el diseño del economizador



## 2.2 Características de la caldera

Cabe recalcar que este tipo de economizador será utilizado para calderas que utilicen como fuente de poder combustibles gaseosos. Existen economizadores que están ubicados encima de la caldera, provocando que la transferencia de temperatura esté limitada por el punto de temperatura de rocío y también economizadores colocados de forma adyacente a la caldera, la cual ofrece una mayor seguridad en caso de la formación de condensado en la parte externa de las tuberías.

El diseño del economizador se fundamenta en una caldera Cleaver Brooks de 200 BHP (149.14 kW) debido a la viabilidad de los economizadores de régimen condensativo en calderas de baja presión (< 2 MPa). Por otro lado, en la Tabla 2 se muestra las propiedades del GLP.

**Tabla 1**

*Datos de operación de la caldera*

Símbolo	Descripción	Magnitud	Unidades
$P_t$	Presión de trabajo	125 (861.85)	psi (kPa)
$T_v$	Temperatura de salida de vapor	352.88 (178.27)	$^{\circ}F$ ( $^{\circ}C$ )
$\dot{m}_{vapor}$	Flujo másico de vapor	6900 (3129.79)	$\frac{lb}{h}$ ( $\frac{kg}{h}$ )
$\eta$	Eficiencia	80	%

*Nota:* Datos obtenidos de (Cleaver Brooks, 2023)

**Tabla 2**

*Propiedades del GLP*

Propiedades	Valor
Gravedad Específica	2.01
Poder Calorífico Inferior	19,636 $\left[\frac{Btu}{lbm}\right]$
Densidad relativa	1.86

## 2.3 Especificaciones de diseño

Para el diseño del economizador condensativo, se tuvo en cuenta los siguientes parámetros:

- Las dimensiones del economizador no deben superar los 7.55 pies de largo y 9.8 pies de ancho, facilitando el montaje, desmontaje y mantenimiento de éste.
- Los gases de combustión generados por la quema de combustibles para la generación de vapor deben reducirse al menos en un 7%.
- Los costos del combustible utilizado en la caldera deben reducirse en al menos un 5%.
- Para la construcción del economizador condensativo, se deben utilizar materiales disponibles a nivel nacional y tener alta resistencia a la corrosión.

#### **2.4 Criterios de selección.**

Para la selección de la mejor alternativa, se ha considerado cinco parámetros fundamentales. Para la calificación de las alternativas con respecto a cada uno de los criterios se definió la siguiente escala: “1” como un valor descartable y de baja conformidad y “10” un valor de alta conformidad. Los criterios considerados fueron:

- **Proceso de manufactura (Ponderación: 0.15):** Considera el proceso de fabricación del equipo y los procedimientos necesarios para transformar la materia prima en las partes del economizador.
- **Manejabilidad (Ponderación: 0.20):** Este criterio trata de priorizar las condiciones para realizar tareas de mantenimiento en el equipo o reestablecerlo sin tener complicaciones como espacios inaccesibles, posición inadecuada, etc.
- **Costo de implementación (Ponderación: 0.20):** Se debe tener en cuenta que las empresas tratan de realizar inversiones significativas esperando como resultado beneficios de mejora.

- **Seguridad (Ponderación: 0.15):** Se debe tener en cuenta los materiales a seleccionar tanto para el aislamiento del equipo como para su cuerpo, con el fin que las pérdidas de calor sean mínimas hacia los operadores o el entorno.
- **Desempeño (Ponderación: 0.30):** Este criterio es de vital importancia, debido a que debe considerar puntos como la funcionalidad y el cumplimiento de los criterios de diseño sin sobredimensionarlos.

## 2.5 Alternativas de diseño

Un economizador se considera un intercambiador de calor, por lo presenta diferentes configuraciones que dependen de su ubicación.

Para su distribución interna se pueden tener diferentes configuraciones, teniendo en cuenta la dirección de los flujos y el tipo de superficie extendida, cuyas alternativas son mostradas en las tablas 3 y 4 respectivamente.

**Tabla 3**

*Configuraciones de acuerdo con el sentido de flujo*

<b>Configuración</b>	<b>Descripción</b>
Flujo cruzado	En este tipo de arreglo los fluidos que intervienen se cruzan, es decir, se mueven de manera perpendicular.
Flujo paralelo	En este tipo de arreglo el fluido caliente y el fluido frío entran por el mismo extremo, teniendo la misma dirección de flujo y salen por el mismo extremo.
<b>Configuración</b>	<b>Descripción</b>
Contraflujo	En este tipo de arreglo los fluidos entran por extremo opuestos, teniendo el flujo en direcciones contrarias y saliendo en extremos opuestos

*Nota:* Obtenido de (Incropera & DeWitt, 1999)

**Tabla 4***Tipo de superficie absorbente*

<b>Configuración</b>	<b>Descripción</b>
Tubos lisos	Este tipo de superficie lisa es de uso común en economizadores, debido a que minimizan la probabilidad de erosión debido a la quema de los combustibles.
Tubos con superficie extendida	También conocidos como tubos aletados, ya que presentan extensiones a lo largo del cuerpo del tubo con el fin de generar una mayor superficie para la transferencia de calor.

*Nota:* Obtenido de (Guiot Melo & Ramos Rojas, 2018)

## 2.6 Selección de alternativas de diseño

### 2.6.1 Selección del intercambiador de calor.

A continuación, se presenta la matriz de decisión para la selección del intercambiador de calor a diseñar.

**Tabla 5***Matriz de decisión y selección de mejor alternativa*

	<b>Factor</b>	<b>Intercambiador de calor de tubos lisos en contraflujo</b>	<b>Intercambiador de calor de tubos lisos en flujo cruzado</b>	<b>Intercambiador de calor de tubos aletados flujo cruzado</b>
<b>P. manufactura</b>	0.15	9	9	8
<b>Mantenibilidad</b>	0.20	9	9	8
<b>Costo</b>	0.20	7	9	8
<b>Seguridad</b>	0.15	6	7	7
<b>Desempeño</b>	0.30	7	7	10
<b>Total</b>		7.95	8.10	8.45

El intercambiador de calor con tubos lisos tiene un proceso de manufactura más simple que el de tubos aletados, que requiere un proceso adicional para diseñar aletas personalizadas. En mantenimiento, los tubos lisos permiten un mejor acceso para la limpieza que los aletados, además los intercambiadores de tubo liso son más económicos al usar tubos sin modificaciones. En términos de desempeño, los tubos aletados tienen una transferencia de

calor superior debido a su mayor superficie. Tras la matriz de decisión, la mejor opción es el intercambiador de calor de tubo y coraza en flujo cruzado con tubos aletados.

### 2.6.2 Selección de materiales

En esta sección se define el material a utilizar para la estructura del economizador, las tuberías encargadas de transportar el agua de alimentación.

- **Tubería:** Para este componente, se consideró la resistencia a la corrosión, tomando como referencia los materiales expuestos en la norma ASME y las recomendaciones TEMA, debido a la formación de condensado, las temperaturas de trabajo, la conductividad térmica y la durabilidad. En la Tabla 6 se encuentra una comparativa entre los materiales investigados para la selección de la tubería, teniendo en cuenta la disponibilidad en el mercado y tomando como referencia los materiales mencionados en la norma ASME Sección VIII para recipientes a presión.

**Tabla 6**

*Características de posibles materiales para tubería*

Material	Conductividad	Resistencia a la corrosión	Ventajas
Cobre <sup>1</sup>	$231.85 \left[ \frac{BTU}{h \cdot ft \cdot ^\circ F} \right]$	Alta resistencia	Excelente conductividad y maleabilidad
Material	Conductividad	Resistencia a la corrosión	Ventajas
Acero ASTM A53 <sup>2</sup>	$222.02 \left[ \frac{BTU}{h \cdot ft \cdot ^\circ F} \right]$	Tiende a oxidarse	Buena resistencia a la tracción, maleable y dúctil
Acero Inox 304 <sup>3</sup>	$9.42 \left[ \frac{BTU}{h \cdot ft \cdot ^\circ F} \right]$	Alta resistencia	Resistente a la suciedad y oxidación.

Nota. Fuente: (*Propiedades Del Cobre*, 2023)<sup>1</sup>, (Meléndez Villegas & Quelal Quelal, 2009)<sup>2</sup>, (Material Mundial, 2023)<sup>3</sup>

Para el desarrollo del diseño se utilizará acero inoxidable 304 como material para los tubos debido a su alta resistencia a la corrosividad.

- **Cuerpo:** Se consideró aspectos como la disponibilidad, el precio y la resistencia a la corrosión. En la Tabla 7 se encuentran las alternativas de materiales para el cuerpo del economizador. En el tema de los precios, “Alta” corresponde a materiales con precios elevados.

**Tabla 7**

*Características de posibles materiales para el cuerpo*

Características	Acero ASTM A36	Cobre	Acero Inox
Disponibilidad comercial	Alta	Media	Alta
Resistencia a la corrosión	Baja	Alta	Alta
Precio	Media	Alta	Alta

El material que resulta más rentable utilizar es el acero estructural ASTM A-36 debido a su elevada disponibilidad en el mercado local y su costo accesible.

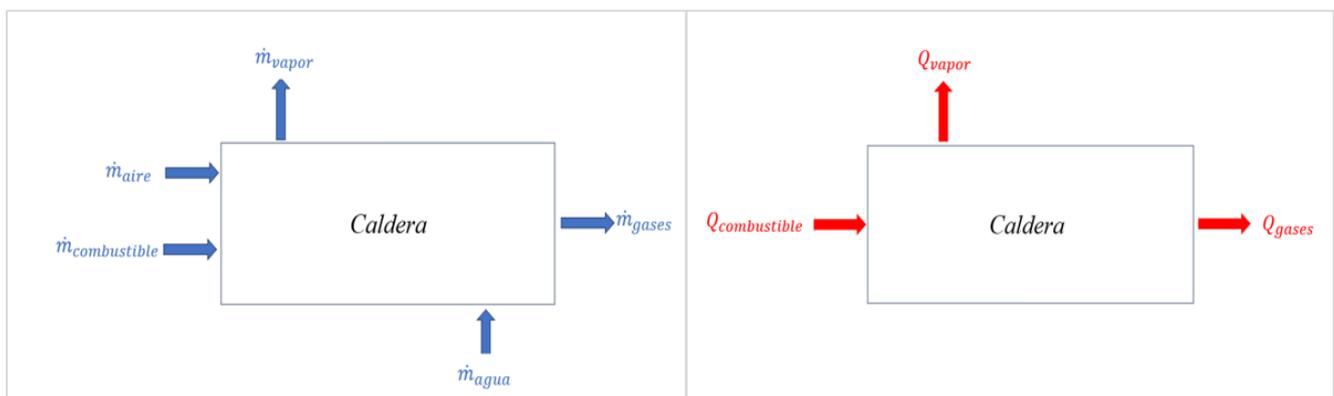
## 2.7 Dimensionamiento del economizador

### 2.7.1 Datos iniciales.

Se definió los flujos de masa y energía que forman parte del proceso de generación de vapor y del proceso para el calentamiento del agua, los cuales se muestran en la Figura 5. La base de cálculo para el porcentaje de las pérdidas sin economizador fue obtenida del documento de eficiencia en calderas (Clever Brooks, 2023).

**Figura 5**

*Balance de masa y energía para la caldera pirotubular*



**Tabla 8**

*Descripción de variables mostradas en la Figura 5*

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
$Q_{comb}$	Transferencia de energía del combustible	BTU
$Q_{vapor}$	Transferencia de energía del vapor	
$Q_{gases}$	Transferencia de energía de los gases de la chimenea	
$\dot{m}_{comb}$	Flujo másico de combustible	$\frac{lb}{h}$
$\dot{m}_{aire}$	Flujo másico del aire	
$\dot{m}_{agua}$	Flujo másico del agua de alimentación	
$\dot{m}_{vapor}$	Flujo másico de vapor	
$\dot{m}_{gases}$	Flujo másico de los gases de combustión	

Partiendo de estos datos, se puede calcular el flujo de calor entregada por la caldera en Btu/h mediante el uso de la ecuación 2.1.

$$\dot{q}_{in} = BHP \text{ Caldera} * 33472 \left[ \frac{BTU/h}{BHP} \right] \quad (2.1)$$

Una vez calculado el flujo de calor entregada por la caldera, se debe calcular cuánto calor se está aprovechando, considerando la eficiencia de la caldera.

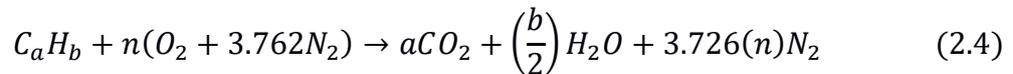
$$\dot{q}_{real} = \frac{\dot{q}_{in}}{\text{Eficiencia de la caldera } (\eta)} \quad (2.2)$$

El consumo de gas GLP de la caldera, está definido mediante la ecuación 2.3.

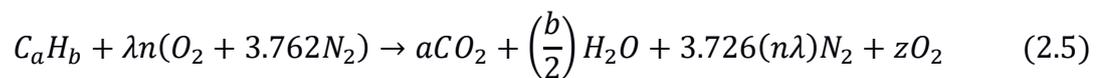
$$\dot{m}_{gases} = \frac{\dot{q}_{real}}{PCI \text{ GLP}} \quad (2.3)$$

Para obtener la masa de aire que ingresa a la caldera, se deben conocer las reacciones químicas resultado del proceso de combustión, teniendo en cuenta que el aire en el ambiente está conformado por 21% O<sub>2</sub> y 79% N<sub>2</sub>.

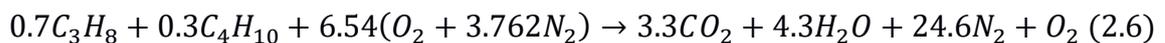
La reacción de la combustión completa se resuelve mediante estequiometría, en donde las variables “a” y “b” representan el tipo de hidrocarburo utilizado, dicha ecuación se presenta a continuación:



Sin embargo, para el análisis de este proyecto con base a la experiencia en el diseño de equipos de este tipo por parte de la empresa, se trabaja con un 20% de exceso de aire ( $\lambda$ ) en el proceso de combustión, dando como resultado la modificación mostrada en la ecuación 2.5.



Las variables mostradas son coeficientes que se reemplazan con el fin de obtener un balance en la ecuación. Además, el GLP se encuentra conformado por una mezcla de propano ( $C_3H_8$ ) al 70% y butano ( $C_4H_{10}$ ) al 30%, lo que provoca que la reacción química de como resultado la ecuación 2.6.



A partir de esta ecuación, se procedió con el cálculo de la relación de los gases presentada en la Tabla 9.

**Tabla 9***Relación de gases*

Compuesto	Moles	Peso Molecular ( $\alpha_i$ )
$O_2$	1	31.99
$H_2O$	4.3	18.01
$CO_2$	3.3	44.01
$N_2$	24.6	28.01

Una vez obtenido el balance de la reacción de combustión, se debe calcular la relación aire/combustible mediante la ecuación 2.7, sin embargo, debido a la mezcla de gases presentes en GLP, la ecuación anterior presenta las modificaciones mostradas en la ecuación 2.8.

$$r_{a/c} = \frac{masa_{aire}}{masa_{combustible}} = \frac{\lambda \cdot n(32 + (3.762 * 28.174))}{a(12) + b(1)} \quad (2.7)$$

$$r'_{a/c} = \frac{masa_{aire}}{masa_{combustible}} = \frac{\lambda \cdot n(32 + (3.762 * 28.174))}{0.7(a * 12 + b * 1) + 0.3(c * 12 + d * 1)} \quad (2.8)$$

Se calculó el flujo másico del aire que ingresa a la caldera, mediante la ecuación 2.9.

$$\dot{m}_{aire} = \dot{m}_{combustible} * (r'_{\frac{a}{c}}) \quad (2.9)$$

### 2.7.2 Propiedades de los gases de combustión.

Para este caso, se deben calcular diferentes propiedades de los gases de combustión, siendo estas la fracción volumétrica ( $\gamma_i$ ), el peso molecular de la mezcla ( $\alpha_m$ ) y la fracción de masas ( $\beta_i$ ), mediante las ecuaciones 2.10, 2.11 y 2.12 respectivamente.

$$\gamma_i = \frac{\text{moles (Compuesto)}}{\sum \text{moles totales}} \quad (2.10)$$

$$\alpha_m = \sum \gamma_i * \alpha_i \quad (2.11)$$

$$\beta_i = \frac{\gamma_i * \alpha_i}{\alpha_m} \quad (2.12)$$

Una vez analizada las propiedades físicas de cada compuesto, se calcularon las propiedades totales, teniendo en cuenta los datos mostrados en la Tabla 10 y el uso de las ecuaciones 2.13 y 2.14 para determinar el calor específico y la conductividad térmica respectivamente (Restrepo, 2021).

**Tabla 10**

*Propiedades termofísicas de los gases de combustión*

Característica/Compuesto	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Calor específico <b>C<sub>p</sub></b> BTU/lb°F (KJ/kg K)	0.234 (0.978)	0.228 (0.956)	0.250 (1.049)	1.01(4.18)
Conductividad térmica <b>k<sub>g</sub></b> BTU/h · ft · °F (W/m K)	0.017 (0.029)	0.070 (0.121)	0.021 (0.036)	0.021 (0.036)

*Nota:* Datos obtenidos de (Y. Çengel & Boles, 2012)

$$c_{pg} = \sum \beta_i * c_p \quad (2.13)$$

$$k_h = \frac{\sum \gamma_i * k_g * \sqrt[3]{\alpha_i}}{\sum \gamma_i * \sqrt[3]{\alpha_i}} \quad (2.14)$$

### 2.7.3 Propiedades del agua de alimentación.

Con el fin de que el sistema obtenga la mayor eficiencia posible, el circuito del agua de alimentación debe contar con un tanque desaireador siguiendo el esquema mostrado en la Figura A-1 (Apéndice A). La finalidad del tanque desaireador es eliminar el oxígeno y otros gases disueltos en el agua, para evitar daños como la corrosión a los componentes del sistema.

**Tabla 11**

*Principales propiedades del agua de alimentación*

Característica/Compuesto	H <sub>2</sub> O
Calor específico $C_{pi}$ BTU/lb°F (KJ/Kg°C)	0.1591 (0.666)
Conductividad térmica $C_{pi}$ BTU/h · ft · °F (KJ/Kg°C)	0.3958 (68.46*10 <sup>-5</sup> )

*Nota:* Datos obtenidos de (Y. Çengel & Boles, 2012)

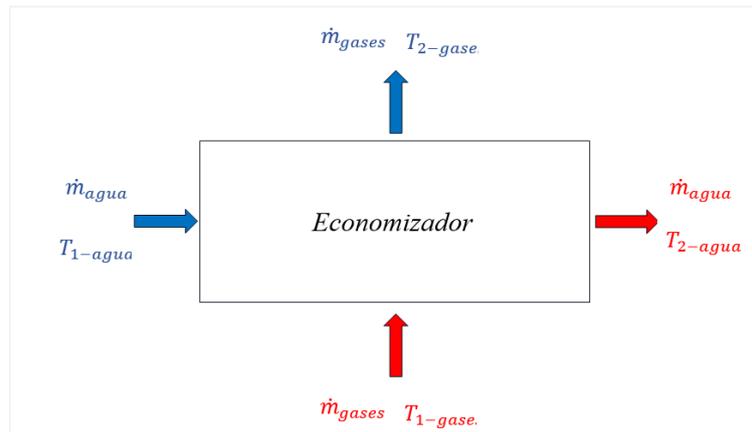
### 2.7.4 Diseño térmico – Análisis termodinámico.

Mediante el balance de masas de la caldera, tomando como referencia los flujos másicos de combustible, aire y gases de combustión mostrados en la Figura 5, se obtuvo lo siguiente.

$$\dot{m}_{gases} = \dot{m}_{combustible} + \dot{m}_{aire} \quad (2.15)$$

$$\dot{m}_{agua} = \dot{m}_{vapor} \quad (2.16)$$

El calor transferido para el intercambiador de calor se lo obtiene mediante el balance de masas a partir de la figura 6.

**Figura 6***Flujos presentes en el economizador*

Debido a que es un proceso de flujo estable, la energía del sistema es igual a cero, provocando que la cantidad de calor que recibe el agua sea aportada por los gases de combustión de la chimenea

$$\dot{Q}_{H_2O} = \dot{Q}_{gases} \quad (2.17)$$

$$\dot{Q}_{H_2O} = \dot{m}_{H_2O} \cdot (h_{sal-H_2O} - h_{ent-H_2O}) \quad (2.18)$$

$$T_{2-gases} = \frac{\dot{m}_{gases} \cdot C_{p-gases} \cdot T_{1-gases} - \dot{Q}_{H_2O}}{\dot{m}_{gases} \cdot C_{p-gases}} \quad (2.19)$$

Siendo,

$C_{p-gases}$ : Coeficiente de calor de los gases [*Btu/lb R*]

$T_{1-gases}$ : Temperatura de entrada de gases [*°F*]

$T_{2-gases}$ : Temperatura de salida de gases [*°F*]

$h_{sal-H_2O}$ : Entalpía de salida del agua [BTU/lbm]

$h_{ent-H_2O}$ : Entalpía de entrada del agua [BTU/lbm]

### 2.7.5 Diseño térmico – Análisis de transferencia de calor.

Con respecto a los parámetros de transferencia de calor, los cálculos se realizaron basándose en la ecuación de la Diferencia Media de Temperaturas Logarítmicas (LMTD) (Kern, 1999).

$$LMTD = \frac{(T_{1-gases} - T_{2-H_2O}) - (T_{2-gases} - T_{1-H_2O})}{\ln \left[ \frac{(T_{1-gases} - T_{2-H_2O})}{(T_{2-gases} - T_{1-H_2O})} \right]} \quad (2.20)$$

Una vez conocido los valores de las temperaturas, se definieron las constantes  $P$  y  $R$  mediante las ecuaciones 2.21 y 2.22 respectivamente con el fin de calcular el factor de corrección de la temperatura LMTD (Figura B-1).

$$P = \frac{T_{2-agua} - T_{1-agua}}{T_{1-gases} - T_{1-agua}} \quad (2.21)$$

$$R = \frac{T_{1-gases} - T_{2-gases}}{T_{2-agua} - T_{1-agua}} \quad (2.22)$$

$$\Delta t = F_t * LMTD \quad (2.22)$$

Se definió la ecuación de transferencia de calor generalizada mediante la ecuación

2.24.

$$q = U_o A_o \Delta t \quad (2.24)$$

En donde  $U_o$  representa el coeficiente global de transferencia de calor,  $A_o$  el área total de la transferencia de calor.

El coeficiente global de transferencia de calor se calculó mediante la ecuación 2.25.

$$U_o = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_o} \quad (2.25)$$

El área transversal por la cual cruza el agua se utilizó la ecuación 2.26 y para los gases de combustión la ecuación 2.28.

$$A_t = \frac{\pi ID^2}{4} \quad (2.26)$$

$$A_o = 2\pi \cdot [(r_e^2 - r_o^2) \cdot n + r_o \cdot (1 - n \cdot \delta)] \cdot L_t \quad (2.27)$$

$$A_s = A_d - N \cdot OD \cdot L_t - N \cdot (2\delta \cdot n \cdot L_f \cdot ancho) \quad (2.28)$$

En donde las variables involucradas se encuentran definidas en la Tabla 12.

**Tabla 12**

*Descripción de variables utilizadas*

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
$A_o$	Área total de la superficie expuesta	
$A_f$	Área de la superficie de aleta expuesta	
$A_t$	Área de tubo liso	$[ft^2]$
$A_s$	Área de flujo de gases	
$A_d$	Área del economizador	
$r_o$	Radio externo del tubo	
$r_i$	Radio de la aleta	$[ft]$
$\delta$	espesor de la aleta	

$L_f$	Longitud de la aleta	
$L_t$	Longitud del tubo	
$N$	Número de tubos	
$n$	Número de aletas por pulgada	---

Para la velocidad del agua de alimentación de la caldera, se tienen las ecuaciones 2.29 y 2.30.

$$V_{tubos} = \frac{\dot{m}_{tubo}}{\rho_{agua} A_t} \quad (2.29)$$

$$\dot{m}_{tubo} = \frac{\dot{m}_{agua}}{N} \quad (2.30)$$

Donde

$\rho_{agua}$ : Densidad del agua de alimentación [ $lb/ft^3$ ].

$\dot{m}_{tubo}$ : Flujo masico por cada tubo [ $lb/h$ ].

Para el caso de los gases de combustión, se utiliza la siguiente ecuación.

$$V_{gases} = \frac{\dot{m}_{gases}}{\rho_{gases} A_s} \quad (2.31)$$

El arreglo es de tipo triangular, siguiendo las pautas de diseño para un servicio de gases de combustión con una tubería de 3/4 pulgadas de diámetro interno.

$$S_d = \sqrt{\left(\frac{S_t}{2}\right)^2 + S_l^2} \quad (2.32)$$

En los gases de combustión, se considera la velocidad máxima, la cual debe cumplir la inecuación 2.33 planteada a continuación.

$$2(S_d - OD) < S_t - OD \quad (2.33)$$

Si la inecuación planteada anterior se cumple, se utiliza la ecuación 2.33, caso contrario se utiliza la ecuación 2.34.

$$V_{smax} = \frac{S_t}{2(S_d - OD)} V_s \quad (2.34)$$

$$V_{smax} = \frac{S_t}{(S_t - OD)} V_s \quad (2.35)$$

En donde la variable  $S_t$  representa el paso transversal entre tubos,  $S_l$  el paso longitudinal y  $S_d$  la bifurcación diagonal.

Conociendo las velocidades de los flujos, se procedió con el cálculo del número de Reynolds para cada sección, siendo el del agua calculado mediante la ecuación 2.36.

$$Re_t = \frac{V_{tubos} ID_t}{\nu} \quad (2.36)$$

La variable  $\nu$  representa la viscosidad cinemática del agua en unidades de  $[ft^2/h]$ . Por otra parte para el diseño de la coraza, se calculó el diámetro hidráulico mediante la ecuación 2.37 siendo  $P$  el perímetro de transferencia de calor en  $[ft]$ .

$$D_h = \frac{4 \cdot A_s}{P_p} \quad (2.37)$$

$$Re_g = \frac{V_{smax} D_h}{\nu} \quad (2.38)$$

Se determinó que existe flujo turbulento en ambos fluidos, por lo tanto, las ecuaciones para el cálculo del número de Nusselt se definen para este tipo de flujo.

Para el agua de alimentación esta dado mediante la ecuación 2.42.

$$N_{ut} = \frac{h_i * D_i}{k} = 0.23 Re_t^{4/5} Pr^n \quad (2.39)$$

$$Re_t > 2200$$

$$0.7 < Pr < 160$$

$$\frac{L}{D} > 60$$

El factor  $n$  de la ecuación 2.39 toma el valor de 0.4 si el fluido está siendo calentado o 0.3 si el fluido está siendo enfriado y las variables involucradas son:

$N_{ut}$ : Número de Nusselt para tuberías.

$k_f$ : Conductividad térmica [ $btu/hft \text{ } ^\circ R$ ].

$h_i$ : Coeficiente de convección para tuberías [ $Btu/hft^2 \text{ } ^\circ R$ ].

$Pr$ : Número Prandlt.

El número de Prandlt y la conductividad térmica se encuentran en las tablas termodinámicas correspondiente a cada fluido. De la misma forma, para los gases de combustión se determinó el número de Nusselt de la siguiente forma.

$$Nu_s = \frac{h_o OD_t}{k_f} = C_1 * 1.13 Re_t^m Pr^{0.33} \quad (2.40)$$

$$Re_t > 2000$$

$$Pr > 0$$

$$N > 60$$

En donde  $h_o$  representa el coeficiente de convección para los gases [ $Btu/hft^2 \circ R$ ] y las variables  $C_1$  y  $m$  son constantes que dependen de la relación existente entre la distancia longitudinal y transversal con respecto a la parte externa de los tubos (Tabla 13).

**Tabla 13**

*Correlación para determinar las variables  $C_1$  y  $m$*

$S_L/D$	$S_T/D$							
	1.25		1.5		2.0		3.0	
	$C_1$	$m$	$C_1$	$m$	$C_1$	$m$	$C_1$	$m$
Alineado								
<b>1.25</b>	0.348	0.592	0.275	0.608	0.100	0.704	0.0633	0.752
<b>1.50</b>	0.367	0.586	0.250	0.620	0.101	0.702	0.0678	0.744
<b>2.00</b>	0.418	0.570	0.299	0.602	0.229	0.632	0.198	0.648
<b>3.00</b>	0.290	0.601	0.357	0.584	0.374	0.581	0.286	0.608
Escalonado								
<b>0.600</b>	–	–	–	–	–	–	0.213	0.636
<b>0.900</b>	–	–	–	–	0.446	0.571	0.401	0.581
<b>1.000</b>	–	–	0.497	0.558	–	–	–	–
<b>1.125</b>	–	–	–	–	0.478	0.565	0.518	0.560
<b>1.250</b>	0.518	0.556	0.505	0.554	0.519	0.556	0.522	0.562
<b>1.500</b>	0.451	0.568	0.460	0.562	0.452	0.568	0.488	0.568
<b>2.000</b>	0.404	0.572	0.416	0.568	0.482	0.556	0.449	0.570
<b>3.000</b>	0.310	0.592	0.356	0.580	0.440	0.562	0.428	0.574

*Nota:* Valores de la tabla obtenidos de (Incropera & DeWitt, 1999)

Los coeficientes convectivos de los fluidos se definen en dos partes. El agua tiene un coeficiente de convección interno y uno externo que se definieron mediante las ecuaciones 2.41 y 2.42.

$$h_i = \frac{Nu_t k_f}{D_i} \quad (2.41)$$

$$h_t = \frac{h_{it}ID_t}{D_o} \quad (2.42)$$

En el caso de los gases de combustión mediante la ecuación 2.43.

$$h_o = \frac{N_u k_f}{D_e} \quad (2.43)$$

El área libre de transferencia de calor que ocupan los tubos es:

$$A_o = NM\pi ODL \quad (2.44)$$

Las variables  $N$  y  $M$  representan el número de tubos utilizados y el número de pasos respectivamente. Se utilizó la ecuación 2.45 para determinar el número de tubos totales

$$N_T = NM \quad (2.45)$$

### 2.7.6 Efectividad del economizador

Se calculó la efectividad de la transferencia de calor con el fin de conocer el porcentaje de aprovechamiento del sistema.

$$C_h = \dot{m}_{gases} C_{p_{gases}} \quad (2.46)$$

$$C_c = \dot{m}_{H_2O} C_{p_{H_2O}} \quad (2.47)$$

En donde  $C_c$  y  $C_h$  representan la capacidad calorífica del fluido frío y caliente respectivamente. Se realizó una comparación para encontrar la capacidad calorífica mínima ( $C_{min}$ ) con el fin de calcular el calor máximo en el sistema.

$$Q_{max} = C_{min}(T_{h-in} - T_{c-in}) \quad (2.48)$$

La ecuación 2.49 da a conocer la efectividad en la transferencia.

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} \quad (2.49)$$

### 2.7.7 Caídas de presión

Para el lado del agua, la caída de presión en el banco de tubos se utilizó la ecuación de Darcy, teniendo en cuenta que la fórmula esta expresada en metros.

$$h_l = \frac{fLV^2}{2g} \quad (2.50)$$

Donde

$h_l$ : Pérdida de fricción en fluido [m].

$f$ : Factor de fricción.

$g$ : gravedad.

$V$ : Velocidad del fluido.

Calculada  $h_l$  en el punto anterior, se determinó la caída de presión en los tubos.

$$\Delta P = h_l \rho g \quad (2.51)$$

En donde el  $\Delta P$  representa la pérdida de presión. Para el cálculo del factor de fricción  $f$  se utilizó el diagrama de Moody.

La caída de presión en los gases se calculó mediante la ecuación 2.52.

$$\Delta P = N_L X \left( \frac{\rho V_{max}^2}{2} \right) f \quad (2.52)$$

La variable  $X$  representa el factor de correlación y la variable  $N_L$  el número de líneas de tubos dentro del economizador, las cuales se calcularon mediante las ecuaciones 2.53 y 2.54.

$$P_T = \frac{S_T}{D} \quad (2.53)$$

$$P_L = \frac{S_L}{D} \quad (2.54)$$

$$X = \frac{P_T}{P_L} \quad (2.55)$$

Se utilizó la gráfica de la Figura B-3 (apéndice B) para determinar el factor de fricción para un arreglo triangular.

### 2.7.8 Aislamiento térmico.

Para calcular el espesor que envolverá la estructura del economizador, se calculó la conductividad térmica entre paredes definida mediante la ecuación 2.56, y la Figura B-4 (apéndice B).

$$\dot{Q}_a = h_s A_s (T_s - T_\infty) \quad (2.56)$$

Donde

$\dot{Q}_a$ : Calor transferido al ambiente [Btu/h].

$h_s$ : Coeficiente de calor por convección del aire [Btu/h ft<sup>2</sup>°R].

$A_s$ : Área de superficie [ft<sup>2</sup>].

$T_s$ : Temperatura de la superficie [°F].

$T_\infty$ : Temperatura del ambiente [°F].

Se definió el número de Rayleigh y de Nusselt para el aire, mediante las ecuaciones 2.57 y 2.58 respectivamente, con el fin de determinar el coeficiente convectivo y el área de la superficie.

$$Ra_i = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (2.57)$$

$$Nu_\infty = 0.1Ra_i^{1/3} \quad (2.58)$$

$$h_s = \frac{kNu_\infty}{L} \quad (2.59)$$

$$A_s = L * b \quad (2.60)$$

El calor disipado al ambiente se definió mediante la ecuación 2.61, la cual sirvió para determinar el espesor  $L_e$  del aislante térmico.

$$Q = \frac{T_{prom} - T_\infty}{\sum R} = \frac{T_{prom} - T_\infty}{R_{conv} + R_{cond}} \quad (2.61)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \quad (2.62)$$

$$R_{cond} = \frac{L}{kA} \quad (2.63)$$

$$L_e = kA \left[ \left( \frac{T_{prom} - T_{\infty}}{Q} \right) - R_{conv1} - R_{conv2} - 2R_{cond} \right] \quad (2.64)$$

Donde

$T_{prom}$ : Temperatura promedio de los gases [ $^{\circ}F$ ].

$R_{cond}$ : Resistencia conductiva térmica [ $^{\circ}Fft/Btuh$ ].

$R_{conv}$ : Resistencia convectiva térmica [ $^{\circ}Fft/Btuh$ ].

$L_e$ : Espesor de aislante [ $ft$ ].

### 2.7.9 Impacto ambiental

En esta sección del capítulo, se describe el análisis sobre la afectación y las posibles variables que pueden afectar el ecosistema de manera negativa.

Con el fin de evaluar e identificar estas afectaciones generadas por las actividades del proceso de manufactura del economizador, se presenta la matriz de impactos (Tabla 14) en donde el aspecto ambiental se refiere a las actividades que pueden interactuar con el medio ambiente y ocasionar uno o varios impactos ambientales, ya sean adversos o beneficiosos.

(Universidad Nacional de Colombia, n.d.)

**Tabla 14**

*Matriz de impactos ambientales para el proceso de manufactura del equipo*

Proceso	Actividad	Aspecto ambiental	Impacto ambiental
Corte	Planchas ASTM A-36 para el cuerpo del equipo.	Generación de residuos sólidos, consumo de energía y materias primas, generación de calor.	Contaminación de suelo, contaminación del aire, agotamiento de recursos.
	Ángulos para fabricación de soportes.		
	Tubería de hierro negro A-53 para construcción cuerpo		

Tubería de acero inoxidable A-304 para los tubos			
Soldadura	Cuerpo, estructura interna, sistema de alimentación.	Generación de gases, proyección de partículas, consumo de energía.	Contaminación del aire, agotamiento de recursos.
Transporte	Vehículos, maquinaria.	Consumo de combustible, emisiones de gases contaminantes, Potenciales derrames, generación de ruido	Contaminación del suelo, contaminación del aire, contaminación del agua, contaminación acústica.
Montaje	Instalación de sistema mecánico.	Generación de residuos sólidos, gases contaminantes, consumo de energía	Contaminación del aire, contaminación del suelo, agotamiento de recursos.
Arranque	Operación de la maquina	Consumo de combustibles, recirculación y generación de gases.	Agotamiento de recursos, contaminación del aire.

Además, se abordará el cálculo de la reducción de gases generados por la caldera tras la implementación del equipo. Para llevar a cabo dicho cálculo, se utilizará el factor de emisión, el cual para el GLP es de 2.96 kg de CO<sub>2</sub> por cada kg de GLP (Guía para el cálculo de emisiones, 2013).

$$EE_s = \text{Consumo de combustible} * FE \quad (2.65)$$

### 2.7.10 Evaluación financiera

Se llevó a cabo un análisis financiero para evaluar la viabilidad de implementar un economizador condensativo, proyectando el flujo de efectivo durante un período de cinco años, tomando en cuenta los principales costos asociados con la construcción de éste. Para la evaluación económica, se calcularon dos indicadores clave: el valor actual neto (VAN) utilizando una relación costo/beneficio y la tasa interna de retorno (TIR) que

indica el tiempo requerido para recuperar la inversión, permitiendo determinar la rentabilidad del proyecto.

### 2.7.11 Dimensiones iniciales

Las dimensiones iniciales se realizaron con base a las especificaciones mencionadas anteriormente, observando en la Tabla 15 las variables y valores a considerar.

**Tabla 15**

*Dimensiones iniciales del economizador*

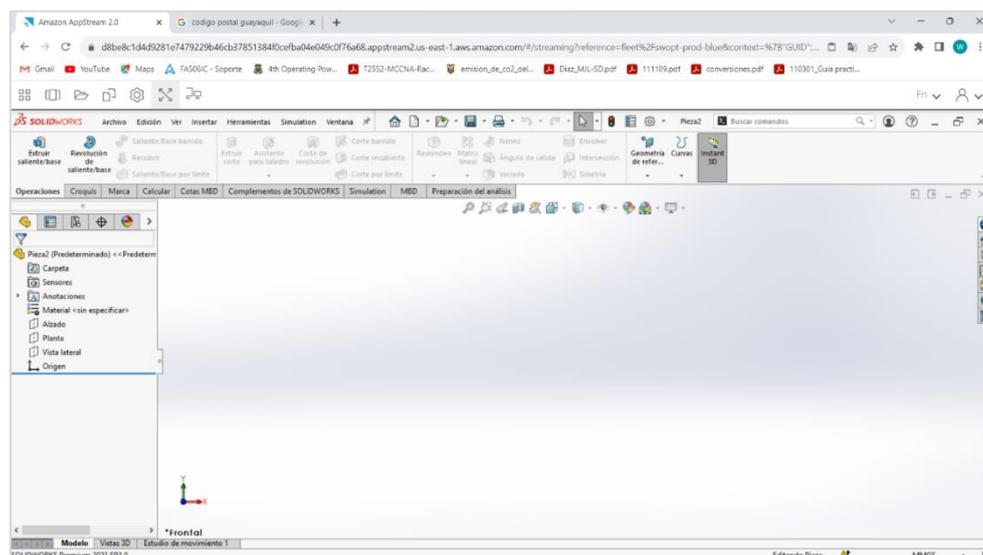
Descripción	Valor	Unidades
Longitud de tubos	3.28	ft
Diámetro interno de tubería	3/4	in
Ancho del economizador	6	ft
Altura del economizador	7.55	ft
Largo del economizador	9.85	ft
Número de pasos	4	---

### 2.7.12 Simulación

Para la parte final del diseño, se realizó el diseño y la simulación del economizador condensativo mediante el uso de la versión de prueba online gratuita del software *SolidWorks*, la cual permite el acceso al modelado 3D y a las herramientas de simulación.

**Figura 7**

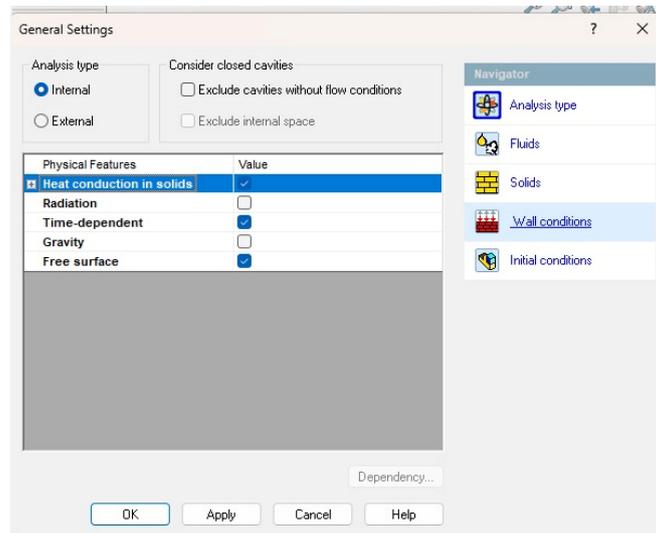
*Ventana de la versión de prueba del software SolidWorks*



La herramienta de simulación es conocida como “*Flow Simulation*”. En el cuadro de dialogo mostrado en la Figura 8, se definió el tipo de análisis a utilizar para la simulación, despreciando la acción de la gravedad ya que el equipo es estacionario, y el calor por radiación con el fin de simplificar el modelo debido al recurso computacional limitado.

**Figura 8**

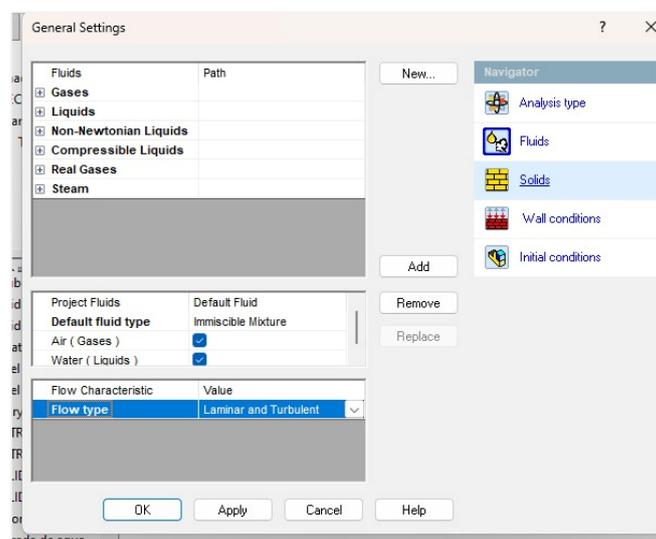
*Selección del tipo de análisis para la simulación*



Se definió los fluidos que intervienen en el economizador, para el caso de los gases de combustión se utilizó el aire como referencia para proceder con la simulación.

**Figura 9**

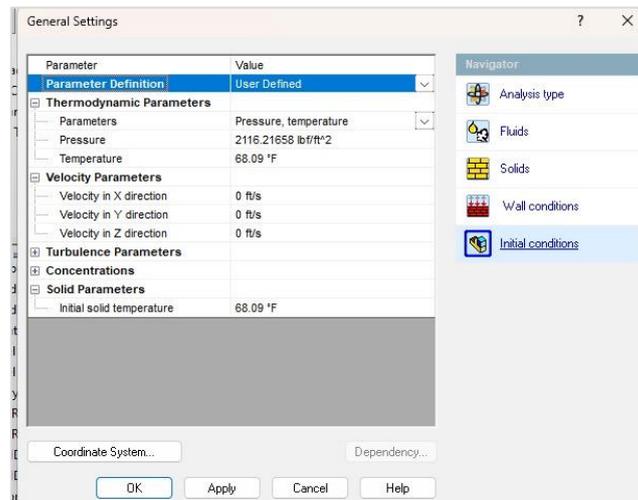
*Definición de fluidos en el economizador*



Se estableció las condiciones iniciales (Figura 9), siendo estas la presión atmosférica y la temperatura ambiente del entorno.

**Figura 10**

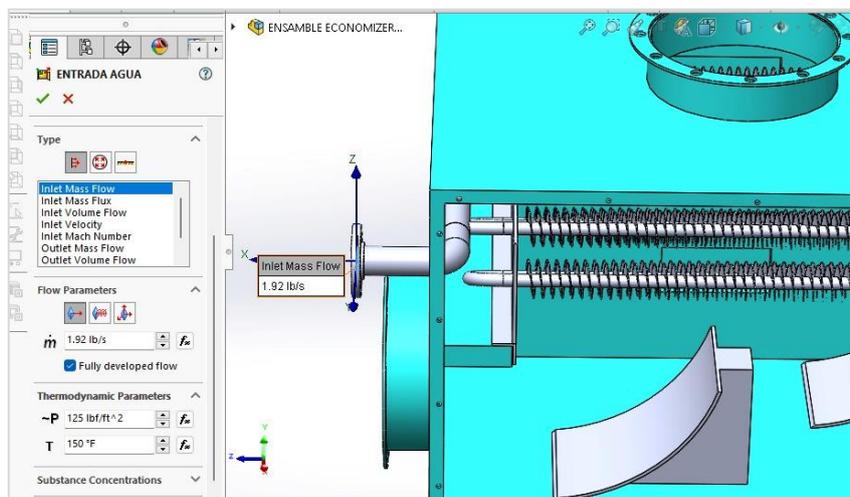
*Ingreso de condiciones iniciales*

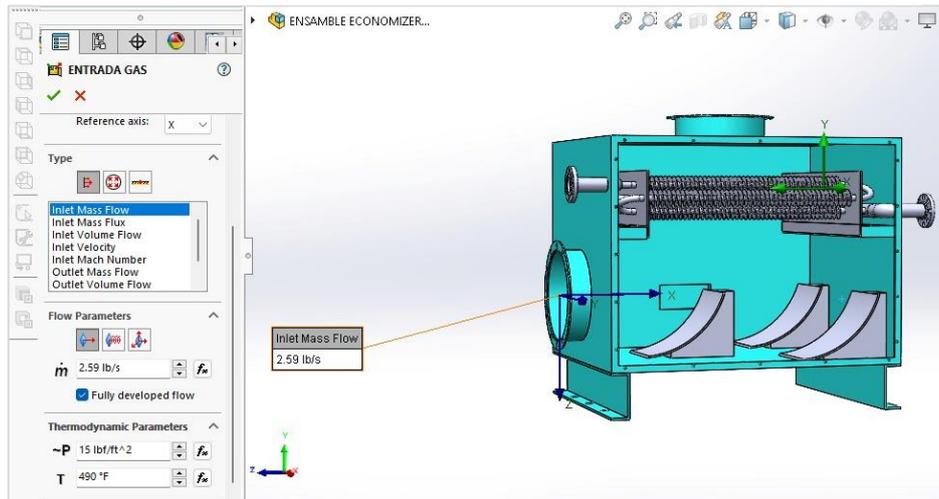


Se finalizó la configuración de la simulación al ingresar las condiciones de frontera, las cuales están definidas por los flujos máxicos tanto del agua de alimentación (Figura 11) como del aire que simula los gases de combustión (Figura 12), ambos junto con sus respectivas temperaturas y presiones.

**Figura 11**

*Condiciones de frontera del agua de alimentación*



**Figura 12***Condiciones de frontera del aire*

## **Capítulo 3**

### **3.1 Resultados y análisis**

El enfoque de esta investigación se centró en analizar una caldera pirotubular de 200 BHP de la marca Cleaver Brooks, esta caldera utiliza GLP como su fuente de combustible y libera los productos de la combustión a través de una chimenea a una temperatura de 460 °F. Esta característica despertó el interés en explorar la posibilidad de aprovechar la energía térmica desperdiciada en el entorno, mediante la implementación de un sistema de precalentamiento del agua de alimentación de la caldera a través de un economizador.

El proceso implica el bombeo del agua de alimentación de la caldera a una presión de 120 psi mínimo, y la temperatura inicial del agua depende del sistema adoptado. Para los propósitos de este proyecto, optamos por considerar un sistema con desaireador, lo que resultó en una temperatura de entrada de 180 °F. Este planteamiento se fundamenta en la intención de maximizar la eficiencia y el rendimiento del sistema, al tiempo que se minimiza el desperdicio de calor.

Se llevó a cabo una comparación entre los resultados del análisis del agua de alimentación y del gas de combustión en la salida del economizador. Los datos obtenidos se tabularon, considerando tanto los resultados analíticos calculados mediante ecuaciones, como aquellos generados utilizando el software *SolidWorks*. Como paso final, se realizó una evaluación del margen de error entre ambos conjuntos de resultados.

### **3.2 Diseño final del economizador**

Las dimensiones obtenidas para el economizador condensativo se obtuvieron mediante la iteración del número de tubos y pasos teniendo en cuenta el área de transferencia de calor calculada anteriormente y los requerimientos de diseño propuestos como parte del proyecto.

Para el cálculo del número de pasos se utilizó el método logarítmico con el fin de tener la temperatura de salida del agua a 250 °F. Las distancias establecidas entre el arreglo de tubos permitieron definir la altura y el ancho mediante el cálculo del número de tubos del economizador, mientras que el largo de los tubos permitió determinar la profundidad de éste. Para el cálculo del aislante térmico del economizador se utilizó las ecuaciones de conducción entre dos placas, asumiendo el aislante térmico entre dos capas de metal.

En la Tabla 16, se puede observar que a medida que cambia el diámetro del tubo el número total de tubos disminuye, sin embargo, el utilizar tubos de mayor diámetro aumento el costo del economizador ya que se utilizarían tubos de cédula 80 debido a su alto coeficiente de transferencia de calor.

**Tabla 16**

*Variación del número de tubos con respecto al diámetro*

<b>Diámetro interno [in]</b>	<b>Número de tubos totales</b>	<b>Número de tubos de ingreso</b>	<b>Número de pasos</b>
1/2"	20	4	5
3/4"	12	4	3
1"	10	4	3
2"	6	4	2
2 1/2"	5	4	2

Una vez realizado el proceso de iteración y de selección del diámetro de tubería a utilizar, se procedió con el cálculo de las dimensiones de economizador las cuales son presentados en la tabla 17.

**Tabla 17**

*Dimensiones externas del economizador*

<b>Dimensiones</b>	<b>Valor [unidades]</b>
Ancho	3.94 [ft]
Alto	3.28 [ft]
Profundidad	4.59 [ft]

Se estimaron los datos de temperatura al salir del economizador, tanto para el agua de alimentación como para los gases de combustión. Esta estimación se basó en factores cruciales como las áreas de tubos, las velocidades de flujo del agua y de los gases de combustión, el tipo de arreglo utilizado y el calor requerido para la transferencia. Estos parámetros se presentan de manera organizada en la Tabla 18, permitiendo una representación visual y clara de las variables implicadas.

**Tabla 18**

*Resultados para el diseño del economizador*

<b>Variable</b>	<b>Teórico</b>	<b>Unidades</b>
Temperatura gases a la entrada	490	[°F]
Temperatura gases a la salida	210	[°F]
Temperatura agua a la entrada	180	[°F]
Temperatura agua a la salida	276.65	[°F]
Calor requerido	700256	[Btu/h]
Diferencia de temperaturas media logarítmica	93.46	[°F]
Diámetro interno del tubo	0.75	[in]
Diámetro externo del tubo	1.05	[in]
Diámetro de la aleta	3	[in]
Número total de tubos	12	[–]
Tipo de arreglo	Triangular	[–]
Paso de tubo SL	0.40	[ft]
Paso de tubo ST	0.38	[ft]
Paso de tubo SD	0.55	[ft]
Espesor de aislamiento	3	[in]

En la Tabla 18 se muestra que la temperatura que circula por los humos de la chimenea es de 490 °F, la cual al cruzar por el economizador disminuye su temperatura hasta los 210 °F de manera teórica. En el caso del calor requerido se observa que la cantidad necesaria de calor para el aumento de la temperatura del agua es de 700256 [Btu/h]. El diámetro de tubo seleccionado es de 3/4 [in], generando una cantidad total de 12 tubos dispuestos en un arreglo triangular.

Además, se logró identificar diversas variables termodinámicas, entre las que se incluyen los coeficientes de convección y la temperatura logarítmica promedio. Al concluir

este proceso, se calculó el calor transferido, un dato esencial para la determinación precisa de la eficiencia del economizador.

**Tabla 19**

*Resultado de variables termodinámicas*

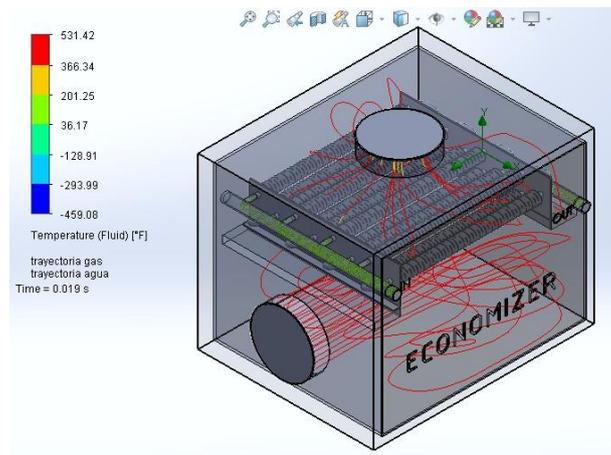
<b>Variable</b>	<b>Teórico</b>	<b>Unidades</b>
Coefficiente global de transferencia de calor	37.21	[ $Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ R$ ]
Área de flujo de calor	203.38	[ $ft^2$ ]
Calor máximo requerido	699,138.5	[ $Btu/h$ ]
Efectividad	90.3	[%]
Velocidad del agua	2.61	[ $ft/s$ ]
Velocidad de los gases	10.59	[ $ft/s$ ]
Reynolds del agua	59,752	[–]
Reynolds de los gases	10267.21	[–]
Nusselt del agua		[–]
Nusselt de los gases	79.52	[–]
Coefficiente de convección del agua ( $h_t$ )	688.74	[ $Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ R$ ]
Coefficiente de convección de los gases ( $h_o$ )	39.34	[ $Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ R$ ]
Pérdida de presión en tuberías	4.40	[ $psi$ ]
Pérdida de presión del lado de los gases	1.29	[ $psi$ ]

### 3.3 Simulación

De la simulación, se obtuvo las temperaturas tanto de los gases de combustión como la del agua de alimentación. En la figura 13 se observa las líneas de flujo de los gases de combustión en el economizador, además se observa que el ingreso de los gases se da por la parte frontal del economizador y su salida está situada de manera perpendicular.

**Figura 13**

*Líneas de flujo de los gases de combustión en el economizador*



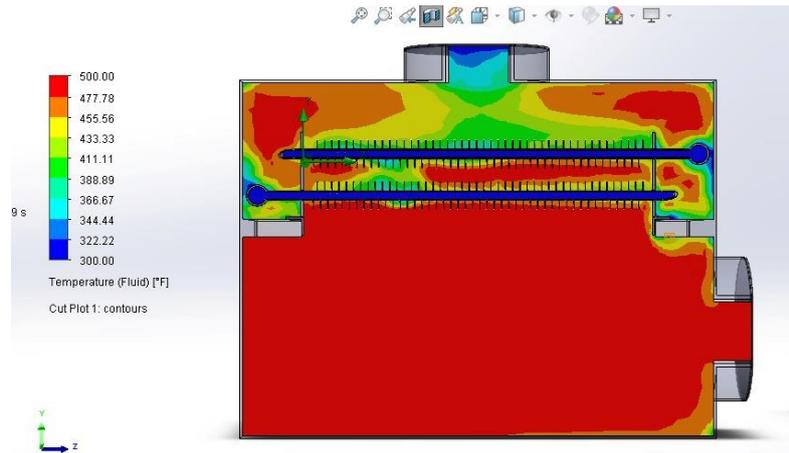
En la Tabla 20, se muestran los resultados obtenidos de la simulación.

**Tabla 20**

*Datos de temperaturas obtenidas de la simulación.*

Variable	Valor	Unidades
Temperatura de entrada del agua de alimentación	180	[°F]
Temperatura de salida del agua de alimentación	270.18	[°F]
Temperatura de entrada de los gases de combustión	490	[°F]
Temperatura de salida de los gases de combustión	218.55	[°F]

En la Figura 14 se puede observar la distribución de las temperaturas a lo largo del economizador. En el caso de los gases, se puede observar que el ingreso aparece en color Rojo como referencia a una temperatura de 500 °F, y a medida que cruza por los tubos aletados se muestran diferentes colores de acuerdo con el cambio de temperatura existente, hasta su salida que se visualiza en color Azul a una temperatura de 318 °F aproximadamente, esto implica que la distribución de las tuberías permite que la diferencia de temperaturas a la entrada y salida sea la esperada, además dando como resultado que la geometría utilizada para el cuerpo del economizador permita una distribución uniforme a lo largo del trayecto de los gases.

**Figura 14***Distribución de temperaturas del economizador*

Con respecto al agua de alimentación, esta se visualiza de un solo color debido a que las variaciones de temperaturas son más amplias en los gases, sin embargo, se el color Azul en los tubos denota que el agua alcanza una temperatura de aproximadamente 300 °F.

### 3.4 Sesgo

Esta sección compara los resultados teóricos obtenidos con respecto a la simulación, con el fin de obtener un margen de error menor al 5%. Estos porcentajes de error se definen mediante las ecuaciones 3.1 y 3.2.

$$\%Error_{T_{saldia-H_2O}} = \left| \frac{T_{2-agua} - T_{2-sim}}{T_{2-agua}} \right| \times 100\% \quad (3.1)$$

$$\%Error_{T_{saldia-gases}} = \left| \frac{T_{2-gases} - T_{2-sim-gases}}{T_{2-gases}} \right| \times 100\% \quad (3.2)$$

Los resultados de dichas ecuaciones se presentaron en la Tabla 20, evidenciando lo planteado anteriormente, es decir, un porcentaje de error del valor teórico menor al 5% con respecto al valor simulado.

**Tabla 21**

*Porcentaje de error de las temperaturas obtenidas en la simulación*

Variable	Valor
$\%Error_{T_{saldia-H_2O}}$	2 %
$\%Error_{T_{saldia-gases}}$	4 %

### 3.5 Comparación del sistema con y sin economizador

La implementación de un economizador en una caldera varía el balance de energía de esta, en específico en las pérdidas de calor de los gases de combustión provocando una disminución debido al intercambio de temperatura con el agua. En la Tabla 22 se observó la diferencia de porcentajes de las pérdidas de calor generadas por una caldera sin economizador y una caldera con economizador.

**Tabla 22**

*Pérdidas de calor generados en una caldera con y sin economizador*

Variable	Valor	
	Sin Economizador	Con economizador
Pérdida por gases de combustión	12 %	4.5 %
Pérdidas por purga	6 %	6 %
Pérdidas por radiación	2 %	2 %

Con respecto a las pérdidas por purgas y radiación se observa el mismo valor en el sistema debido a que el equipo no interviene con estos factores.

Para obtener la eficiencia total del equipo caldera-economizador, solo se debe restar los porcentajes de pérdidas, del 100% del calor total suministrada por el combustible, aumentando la eficiencia desde un 80% del sistema sin economizador a un valor del 87.5% del sistema con economizador. Conociendo que el calor total suministrado por el combustible es de 9'279,379 [Btu/h], se tiene que la caldera está aprovechando 8'123,759 [Btu/h].

### 3.6 Rendimiento del economizador

Para el cálculo de este parámetro, primero se realizó el cálculo del nuevo consumo de combustible de la caldera mediante la ecuación 3.3, en donde la variable  $h_{f_{H_2O}}$  representa la entalpia del agua a la salida del economizador.

$$\dot{m}_{GLP\ nuevo} = \frac{P_v (H_v - h_{f_{H_2O}})}{\eta_{con\ economizador} * PCI} \quad (3.3)$$

$$\dot{m}_{GLP\ nuevo} = 178.42 \left[ \frac{kg}{h} \right]$$

Luego, en base a las horas de producción de la caldera se obtuvo el consumo de GLP mensual junto con el precio estimado consumido, teniendo en cuenta un valor de \$0.7311 por cada Kg de GLP de acuerdo con los precios publicados por la empresa Petroecuador (Petroecuador, 2023).

**Tabla 23**

*Precio estimado del consumo de combustible GLP*

Variable	Valor	
	Sin economizador	Con economizador
Consumo de GLP	120,873 [kg/mes]	111,333 [kg/mes]
Precio estimado	88,373 [\$ /mes]	81,401 [\$ /mes]

### 3.7 Manual de operación

Esta sección trata de definir los procesos necesarios para el traslado, instalación y mantenimiento del equipo con el fin de obtener el mejor rendimiento de éste, y garantizar su eficiencia y durabilidad durante su tiempo de vida útil.

### 3.7.1 Puesta en marcha del equipo

Es importante tener en cuenta las siguientes recomendaciones para el proceso de manipulación, instalación y puesta en marcha del economizador, los cuales se pueden observar en la Tabla 24.

**Tabla 24**

*Manual de operación del economizador*

<b>Procedimiento</b>	<b>Descripción</b>
Descarga del equipo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La descarga del equipo requiere de la utilización de máquinas que faciliten el desplazamiento de cargas pesadas tales como montacargas o transpaletas.</li> <li>- La posición de la caja se relaciona directamente con la disposición del equipo en la caldera.</li> </ul>
Instalación del equipo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Las conexiones de escape de los gases se unen con bridas de acoplamiento.</li> <li>- Tener en cuenta las dimensiones del equipo y la disposición de este</li> <li>- El equipo debe situarse adjunto a la caldera, con el fin de evitar la caída de condensado directamente sobre la chimenea de la caldera.</li> <li>- La bomba a utilizar para impulsar el agua de alimentación, debe dimensionarse para evitar cualquier tipo de pérdida de presión.</li> <li>- Se recomienda el uso de agua desgasificada con el fin de evitar daños acelerados por la corrosión.</li> </ul>
Arranque del equipo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Antes de aplicar el calor de los gases de combustión, revisar que el agua circule sin inconvenientes por todas las tuberías del economizador.</li> <li>- Revisar posibles fugas en las juntas o uniones presenten a lo largo del trayecto de tuberías.</li> </ul>
Monitoreo de desempeño	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se recomienda registrar de manera periódica el desempeño del equipo desde su instalación con el fin de comparar cambios a futuro.</li> </ul>

### 3.7.2 Manual de mantenimiento

Con respecto a los mantenimientos del equipo, debido a que los componentes son fijos, no están sometidos a desgaste por fricción o rozamientos entre sí lo que provoca que no requieran de constantes mantenimiento de tipo mecánico. Por otra parte, es importante

realizar inspecciones periódicas, debido a las incrustaciones que pueden formarse debido al combustible utilizado.

Teniendo esto en cuenta, dichas inspecciones deben realizarse teniendo en cuenta el uso del economizador en la caldera, analizando las temperaturas de salida, las velocidades de flujo y otros parámetros relevantes. Dichas limpiezas deben realizarse con agua a presión en el caso de la tubería de agua de alimentación y con aire o vapor a alta presión en la parte externa de los tubos con el fin de quitar las incrustaciones ubicadas en las aletas.

El mantenimiento del equipo debe realizarse anualmente al igual que el mantenimiento de las calderas, sin embargo, se recomienda llevar a cabo inspecciones visuales al menos cada 3 meses, llevando un registro del análisis de la eficiencia con el fin de comprobar el buen funcionamiento del equipo.

### 3.8 Impacto ambiental

Como se mencionó en el capítulo anterior, un estudio ambiental es un aspecto importante al momento de desarrollar equipos mecánicos dirigidos a uso en zonas industriales.

#### 3.8.1 Evaluación del impacto ambiental

Para el desarrollo de esta sección, se evaluó mediante una matriz (Tabla 25) el impacto ambiental generado por los procesos de manufactura para el diseño del economizador planteado anteriormente. Los criterios para el análisis de los impactos se encuentran definidos en la Tabla 26.

**Tabla 25**

*Criterios para el análisis del impacto en el proceso de manufactura*

<b>Criterio</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Frecuencia</b>
Frecuencia de impacto (1)	Número de veces que se genera el impacto	1	Baja
		2	Media
		3	Alta

Magnitud del impacto (2)	Alcance del impacto	1	Baja
		2	Media
		3	Alta
Duración (3)	Intervalo de tiempo que dura el impacto	1	Baja
		2	Media
		3	Alta
Probabilidad (4)	Posibilidad del impacto	1	Baja
		2	Media
		3	Alta

**Tabla 26**

*Matriz de evaluación del impacto ambiental*

Impacto ambiental	Criterio				Total	Resultado	Solución
	1	2	3	4			
Contaminación de suelo	1	1	1	1	4	No significativo	Trabajar en zonas adecuados y designadas para los diferentes trabajos a realizar. Contar con programas eficaces de tratamiento de residuos.
Contaminación del agua	1	1	1	1	4	No significativo	Trabajar en zonas adecuados y designadas para los diferentes trabajos a realizar. Contar con plan de prevención de riesgos
Generación de gases	2	1	1	1	5	No significativo	Seguir las regulaciones de emisiones de gases. Contar con equipos para reducir la expulsión de gases
Contaminación del aire	2	2	2	2	8	Significativo	Contar con disipadores y equipos para reducción de expulsión de gases a la atmósfera
Disminución de recursos	1	1	2	1	5	No significativo	Controlar el uso de energías a utilizar para el proceso de manufactura

Como se mostró en la matriz anterior, el impacto que genera la fabricación, montaje y arranque del economizador, no genera un cambio ambiental significativo irreversible, sin

embargo, para cada uno de los criterios mencionados anteriormente se debe contar con planes de contingencia y sus respectivas normas de seguridad.

Otro factor analizado en la operación del equipo es el cálculo de los gases de combustión a la salida de la chimenea de la caldera sin economizador y con economizador, lo cual dio como resultado los valores mostrados en la Tabla 27.

**Tabla 27**

*Producción de CO<sub>2</sub> expulsado a la atmósfera*

Variable	Valor	
	Sin economizador	Con economizador
TON CO <sub>2</sub> /año	4,541.1	4,231.8

### 3.9 Evaluación financiera.

Para el análisis financiero del proyecto, se determinaron los costes asociados al proceso de diseño, fabricación y montaje del economizador, además de tener en cuenta los ingresos recaudados por el ahorro de combustible.

#### 3.9.1 Costo de materiales.

Los materiales seleccionados para la fabricación del economizador se pueden encontrar comercialmente en el mercado local, dichos precios se encuentran tabulados en la siguiente tabla.

**Tabla 28**

*Lista de materiales y precios para el desarrollo del proyecto*

Material	Proveedor	Costo unitario (\$)	Cantidad	Costo total (\$)
Ángulo Hierro negro	Tuval S. A	71,00	1	71,00
Tubo rectangular	Tuval S. A	180,00	0,5	90,00
Plancha Lisa H/N (4 mm)	Tuval S. A	240,00	3	720,00
Pernos con tuerca	Tuval S. A	1,00	24	24,00
Tubo Inox aletado	---	80,00	3	240,00
Codos para soldar Inox	Tuval S. A	30,00	8	240,00
Plancha Lisa (6 mm)	Tuval S. A	120,00	1	120,00

Tubo SCH 40 (2 in)	Tuval S. A	96,85	1	-
Brida Inox Clase 150 (2 in)	Tuval S. A	25,00	2	96,85
Unión universal Inox (2 in)	Tuval S. A	8,00	8	50,00
Válvula de mariposa (2 in)	Tuval S. A	56,83	2	64,00
Soldadura 6011x1/8	Tuval S. A			113,66
Soldadura 7018x1/8	Tuval S. A	5,00	20	
Disco de desbaste 4"	Tuval S. A	5,00	20	100,00
Disco de corte 7"	Tuval S. A	2,10	20	100,00
Argón	Tuval S. A	80	1	42,00

Además de los precios de los materiales para la fabricación del equipo, se consideró el alquiler de las herramientas y equipos necesarios para llevar a cabo dichos procesos en la

Tabla 29.

### Tabla 29

*Costo de máquinas para la fabricación del economizador*

Máquina	Cantidad	Días	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
Soldadora	2	15	100	1,725
Amoladora	2	15	30	517.50
Dobladora de tubos	1	5	70	402.50
Cortadora	1	10	30	345
Equipo de argón	1	7	80	644
Teclé 1 Ton	1	2	100	230

### 3.9.2 Costo de mano de obra.

El personal encargado de la fabricación del economizador deberá estar calificado para el uso de las máquinas mencionadas anteriormente. El precio del proyecto dependerá en mayor parte del plazo establecido de entrega y del personal disponible para la fabricación. El personal necesario para la fabricación del equipo en un plazo de 30 días se muestra en la

Tabla 30.

**Tabla 30***Personal necesario para el proceso de fabricación*

<b>Personal</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Días</b>	<b>Costo Unitario (\$)</b>	<b>Costo total (\$)</b>
Supervisor	1	30	441.13	507.30
Soldador	2	30	466.95	1,073.99
Armador	2	30	466.95	1,073.99
Ayudante	1	30	460	529
Oficial	1	30	466.95	536.99
Mecánico	2	30	466.95	1,073.99
Seguridad industrial	1	30	490	563.50

**3.9.3 Costos ingenieriles.**

Debido a que el proceso de diseño del economizador depende de la caldera a analizar, se debe contar con un costo ingenieril para la toma de datos en campo y el desarrollo de los cálculos de acuerdo con esto. Otro punto por considerar a parte del diseño son las inspecciones de los trabajos realizados, es decir, se involucran costos de supervisores de calidad y seguridad ambiental, sin embargo, estos valores fueron mencionados en la tabla anterior.

**Tabla 31***Costos de ingeniería*

<b>Ítems</b>	<b>Costo total</b>
Ingenieros	\$ 3,000
Software y equipos	\$ 1,100
Alimentación	\$ 150
Transporte	\$ 150
Fungibles	\$ 100

Finalmente, el costo total para el diseño del economizador se define mediante la Tabla 32.

**Tabla 32***Costo total de diseño e implementación del proyecto*

<b>Tipo de costo</b>	<b>Costo total</b>
Diseño e ingeniería	\$ 4,500
Materiales	\$ 6,200
Fabricación e implementación	\$ 8,000
<b>Total</b>	<b>\$ 18,700</b>

El valor total calculado del proyecto es de \$18,700 teniendo en cuenta la fabricación e instalación del equipo en sitio.

### **3.9.4 Flujo de caja.**

El periodo para el estudio del flujo de caja fue de 5 años, sin embargo, se asumió un préstamo de 100% a una entidad bancaria. La tabla de amortización del préstamo a realizar se puede apreciar en el Apéndice C, con un plazo de pago de 60 meses. En esta misma sección se puede observar el flujo de caja obtenido para el proyecto teniendo como resultado una tasa de retorno de inversión del 106%, lo que demuestra que la empresa estaría recuperando el precio de inversión al primer año de uso del equipo.

## **Capítulo 4**

#### 4.1 Conclusiones

- Para tratar de aprovechar la mayor cantidad de energía disponible por los gases de combustión se seleccionó un diseño un intercambiador de flujo cruzado con una distribución de tubos aletados de manera triangular, dicho diseño propuesto demuestra una geometría sencilla y compacta que facilita su disposición, montaje/desmontaje y tareas de mantenimiento, evitando la generación de posturas inadecuadas a la hora de realizar los trabajos mencionados anteriormente.
- Los materiales elegidos para la fabricación del economizador condensativo han sido identificados como elementos plenamente disponibles en el mercado local. Esta confirmación refuerza la factibilidad y aplicabilidad del diseño propuesto.
- La implementación del economizador condensativo en la caldera reduce las pérdidas de calor generadas, aumentando su eficiencia a un 87.5%, es decir que se pasó de utilizar 472.57 [lb/h] de combustible GLP para un flujo constante de agua de 6,900 [lb/h] a una temperatura de ingreso de 180 [°F], a utilizar un flujo de combustible de 352.92 [lb/h] debido al aumento de temperatura del agua a 277 [°F].
- El ahorro energético generado por el aumento de la eficiencia reduce el consumo de combustible anual en al menos un 7%, sin embargo, este factor puede variar debido al tiempo de uso que se le dé al economizador, ya que el caso del presente proyecto corresponde a un caso crítico, utilizando el menor tiempo posible el economizador.
- La geometría del economizador permite un flujo continuo de los gases de combustión, además de minimizar las pérdidas de presión del lado de los gases mediante el uso de los direccionales de flujo ubicados en la parte inferior del economizador, provocando que al momento de cruzar por los tubos aletados se genera una distribución uniforme de temperaturas.

- Con respecto al análisis económico del proyecto, se obtuvo una tasa de retorno de inversión del 106%, lo que evidencia que, en el plazo de 1 año, la empresa que adquiriera el equipo comenzara a generar ganancias debido a la reducción del combustible.

#### ***4.2 Recomendaciones***

- Realizar mediciones en sitio con el fin de obtener comparativos entre resultados teóricos y experimentales con respecto a las perdidos y consumos generados en la caldera.
- Antes de realizar el proceso de fabricación, se deben realizar inspecciones de la sala de caldera, con el fin de utilizar el espacio existente sin realizar modificaciones estructurales que puedan afectar o generar mayor gasto a la empresa.
- Instalar sensores tanto a la entrada como a la salida del economizador, con el fin de monitorear tanto la temperatura como los flujos que intervienen, analizando la eficiencia constantemente.
- Colocar una pantalla LCD que resuma en tiempo real la eficiencia y el consumo de combustible, además de controlar el flujo del agua dependiendo de la producción de vapor

## Referencias

- Barrera Puigdollers, nombre, Valls, B., Gómez, C., & Esteve, P. (2018). *Aspectos básicos relacionados con el funcionamiento de una caldera*.  
<https://riunet.upv.es/handle/10251/104064>
- bp. (2022). *Statistical Review of World Energy 2022*.
- Cabanzón Labat, J. (2018). *Diseño y cálculo de un intercambiador de calor*.  
<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/13702/407960.pdf>
- Calderas Markowicz. (n.d.). *Calderas Argentinas*. Retrieved June 18, 2023, from  
<https://calderasargentinas.com.ar/calderas/>
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones* (Y. A. Çengel & J. M. Cimbala, Eds.; 1ra Edición). McGraw-Hill.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de Calor y Masa* - (Y. A. Çengel & A. J. Ghajar, Eds.; 4ta Edición). Mc Graw-Hill.
- Çengel, Y., & Boles, M. (2012). Termodinámica. In Y. Çengel & M. Boles (Eds.), *Mc Graw Hill* (7ma Edición). Mc Graw Hill.
- Cleaver Brooks. (2023a). *Boiler Efficiency Guide*. Cleaver Brooks.  
<https://cleaverbrooks.sharepoint.com/sites/ReferenceCenter/Sales%20Packaged%20Boiler%20Systems/Forms/BasicView.aspx?id=%2Fsites%2FReferenceCenter%2FSales%20Packaged%20Boiler%20Systems%2FPackaged%20Firetube%20Boilers%2F0%20All%20Models%2FTechnical%20Guides%20PDF%29%2FEfficiency%20Guide%20%2D%20es%2Epdf&parent=%2Fsites%2FReferenceCenter%2FSales%20Packaged%20Boiler%20Systems%2FPackaged%20Firetube%20Boilers%2F0%20All%20Models%2FTechnical%20Guides%20PDF%29&p=true&ga=1>
- Cleaver Brooks. (2023b). *C2X Economizer*. Cleaver Brooks.  
<https://cleaverbrooks.com/Product/c2x>
- Global Carbon Project. (2022). *Supplement Data of Global Carbon Budget 2022*. Integrated Carbon Observation System.
- Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)*. (2013).
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). Intercambiadores de Calor. In F. P. Incropera & D. P. DeWitt (Eds.), *Fundamentos de Transferencia de Calor* (4ta ed., Vol. 4, pp. 581–584). Pearson Education.

- Kern, D. Q. (1999). *PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR* (Primera). Continental.
- Material Mundial. (2023). *Acero Inoxidable AISI 304*. Grados, Material Mundial. <https://www.materialmundial.com/acero-inoxidable-ss-astm-sae-aisi-304-ficha-tecnica/>
- Meléndez Villegas, A., & Quelal Quelal, V. (2009). *Análisis y resultados del comportamiento de los esfuerzos residuales y las deformaciones en juntas soldadas a tope de acero A36, aplicando el método SMAW con electrodos E6011* [ESPE]. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/301>
- Moreno, R. (n.d.). *Asesoría y consultoría en tratamientos de agua*. Retrieved June 18, 2023, from <https://tratamientodeaguass.com/>
- Petroecuador. (2023). *Estructura de precios Agosto 2023*. <https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/08/ESTRUCTURA-DE-PRECIOS-AGOSTO-2023.pdf>
- Propiedades del Cobre*. (2023). <https://material-properties.org/es/cobre-propiedades-precio-aplicaciones-produccion/>
- Remache, A. P., Arroyo, F. R., & Ganciano, Grace. (2019). *Analysis of energy intensity and CO 2 emissions related to energy consumption: Possible scenarios of the industrial sector of Ecuador*. <https://www.revistaespacios.com/a19v40n30/a19v40n30p30.pdf>
- Restrepo, N. (2021). *DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR (ECONOMIZADOR) PARA UNA CALDERA PIROTUBULAR DE 300BHP*. Universidad de Antioquia.
- Sánchez Calderón, S. D. (2012). *"Cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero del Plantel El Alto en "Cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero del [a Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica]*. [https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3026/Informe\\_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3026/Informe_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Spirax Sarco. (1999). *GUIA DE REFERENCIA TECNICA*. <http://www1.frm.utn.edu.ar/electromecanica/materias%20pagina%20nuevas/INSTA>

LACIONES%20TERMICAS%20MECANICAS%20Y%20FRIGORIFICAS/material/apuntes/01-Distribucion%20de%20Vapor%20-%20Spirax%20Sarco.pdf

Universidad Nacional de Colombia. (n.d.). *Protocolo para la identificación y evaluación de aspectos e impactos ambientales*. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved September 8, 2023, from [https://ogabogota.unal.edu.co/wp-content/uploads/2021/03/B.PC\\_.SGA\\_.023-Protocolo-de-identificaci%C3%B3n-y-evaluaci%C3%B3n-de-aspectos-e-impactos-ambientales.pdf](https://ogabogota.unal.edu.co/wp-content/uploads/2021/03/B.PC_.SGA_.023-Protocolo-de-identificaci%C3%B3n-y-evaluaci%C3%B3n-de-aspectos-e-impactos-ambientales.pdf)

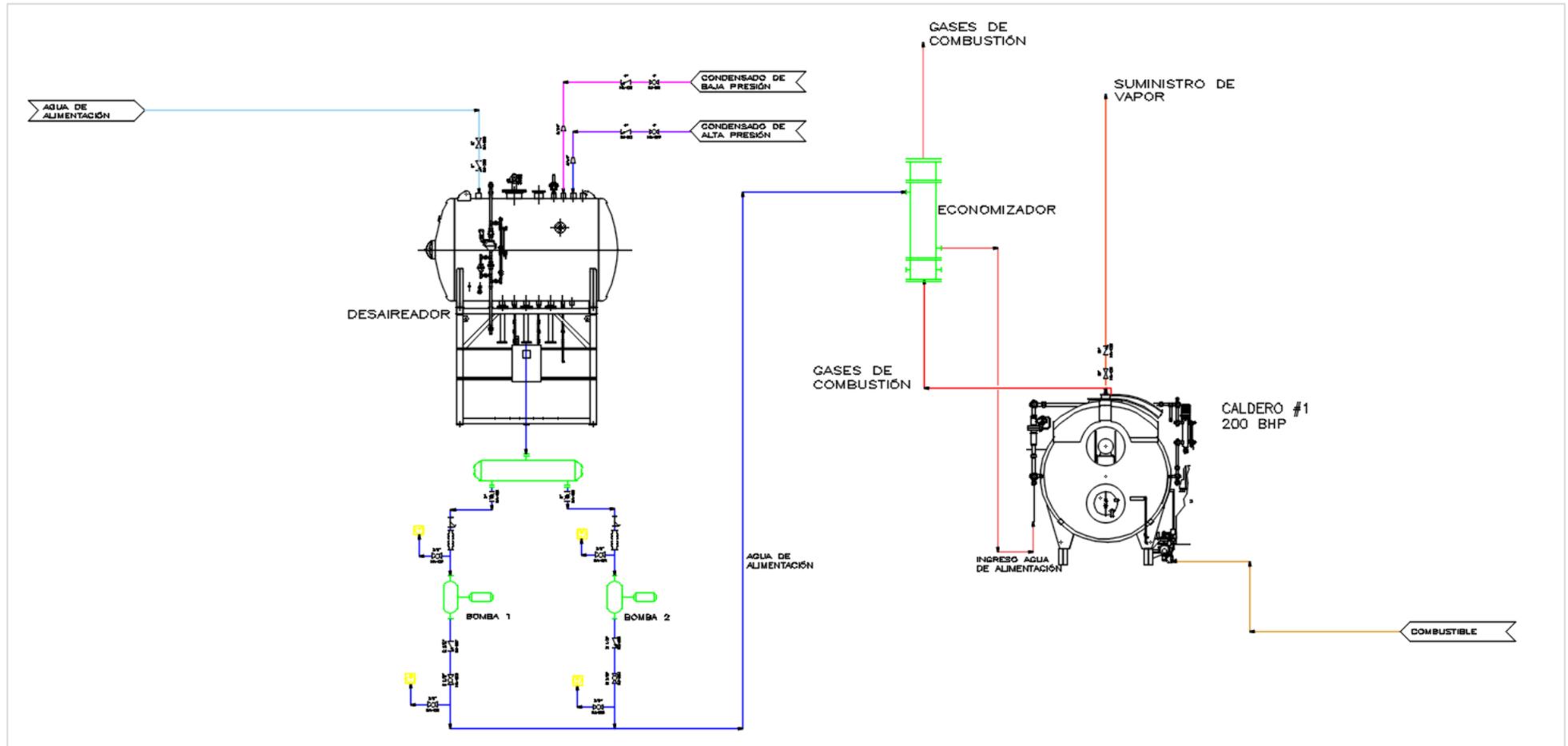
## **Apéndices**

## Apéndice A

### Distribución del sistema economizador-caldera

Figura A - 1

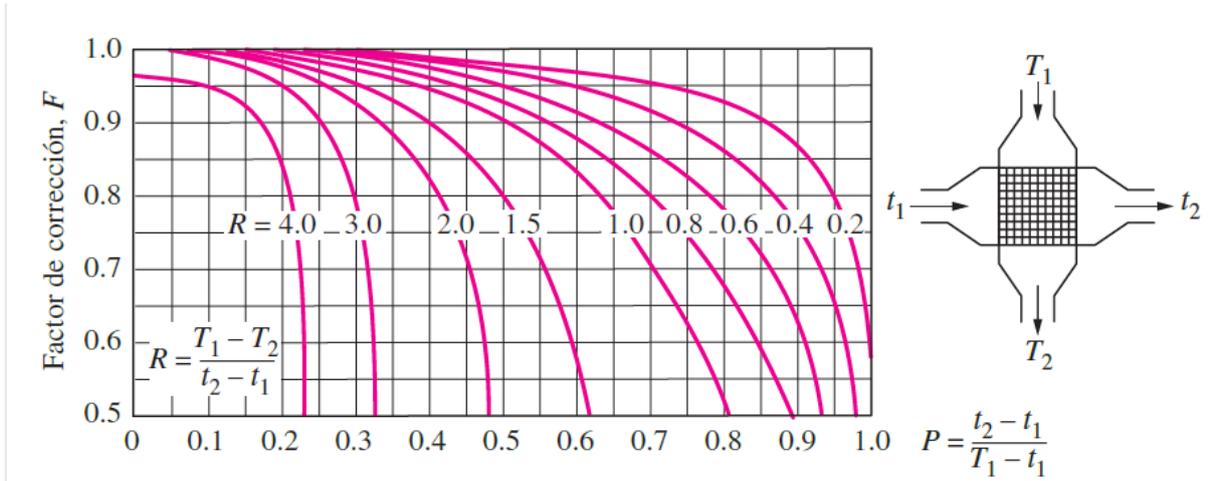
*P&ID de una sala de calderas típica*



**Apéndice B**  
**Gráficos para el análisis termodinámico**

**Figura B - 1**

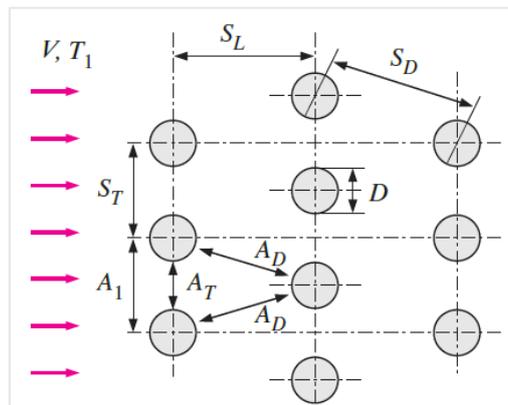
*Factor de corrección de temperatura para flujo cruzado sin mezclarse*



Nota: Figura obtenida de (Y. A. Çengel & Ghajar, 2011)

**Figura B - 2**

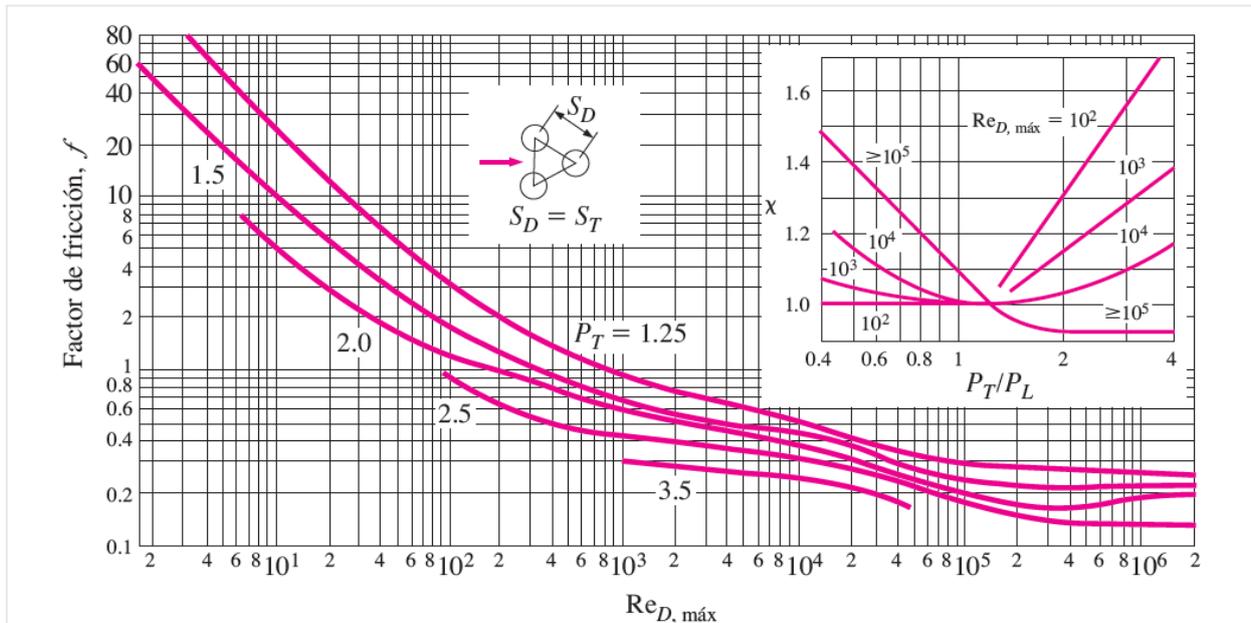
*Diseño de arreglo triangular*



Nota: Figura obtenida de (Y. A. Çengel & Cimbala, 2006)

**Figura B - 3**

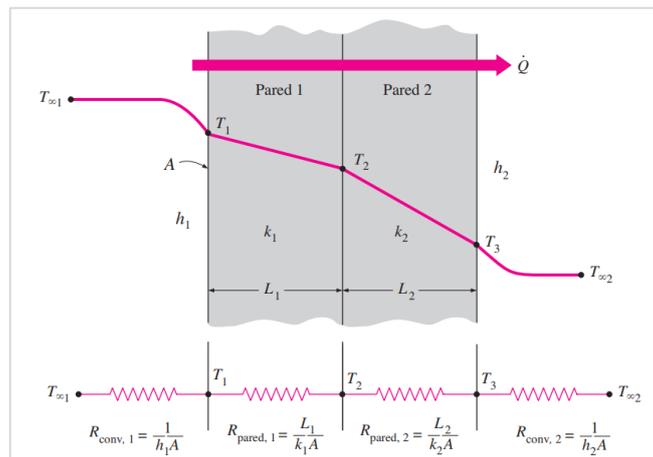
Factor de fricción  $f$  y factor de corrección  $X$  para banco de tubos



Nota: Tomada de (Y. A. Çengel & Ghajar, 2011)

**Figura B - 4**

Transferencia de calor entre paredes de superficie plana



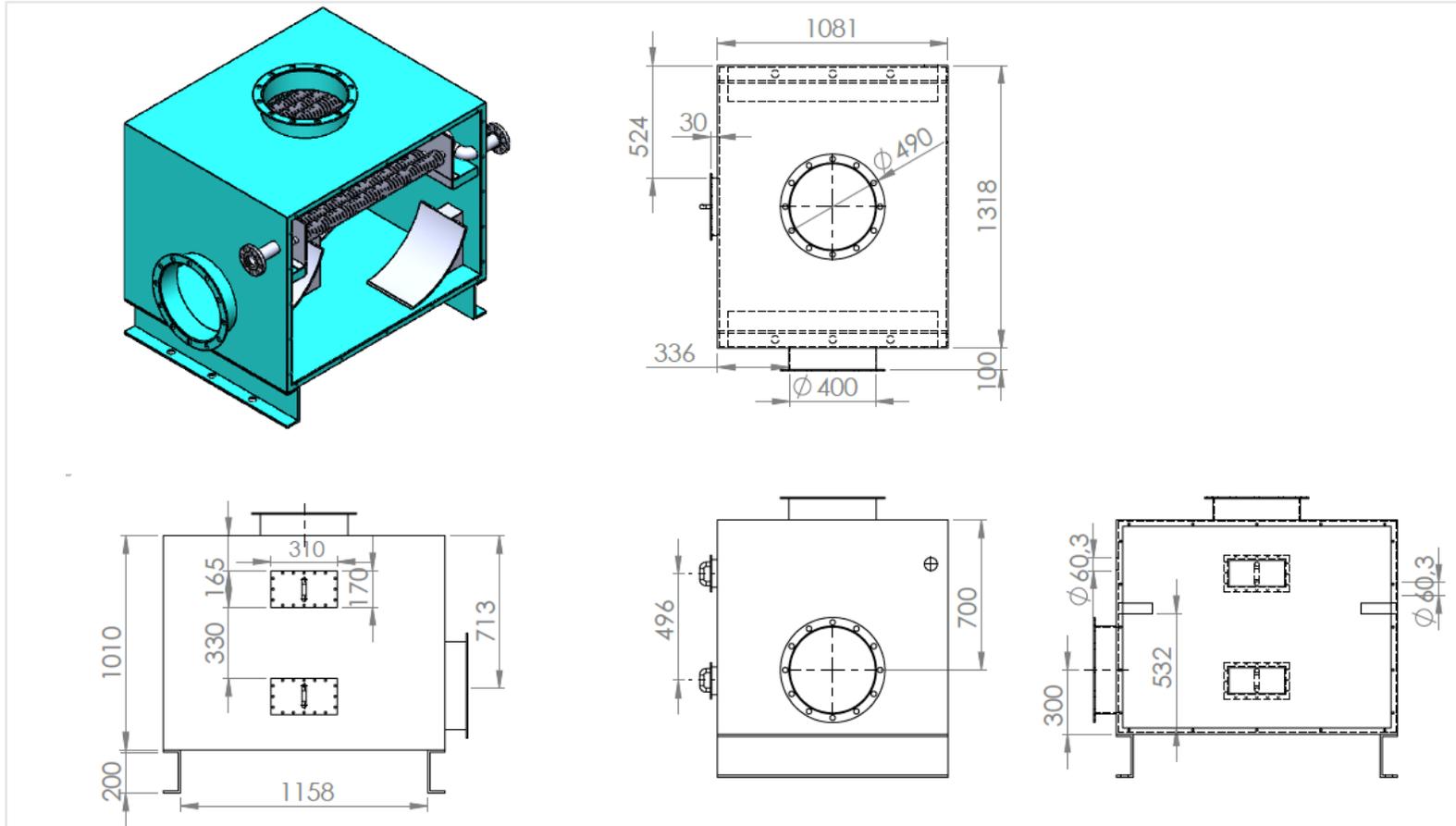
Nota: Figura obtenida de (Y. A. Çengel & Ghajar, 2011)

## Apéndice C

### Diseño del economizador condensativo

#### Plano 1

*Plano de la estructura del economizador*



## Apéndice C

### Tabla de análisis financiero

**Tabla C - 1**

*Amortización con cuota fija*

<b>Monto de Préstamo</b>	\$ 25,000.00
<b>Pago mensual</b>	\$ 556.50
<b>Periodos mensuales</b>	60 meses
<b>Tasa de interés</b>	1,00%
<b>Tasa de interés anual</b>	12,03%

**Tabla C - 2**

*Resumen de pago de cuotas fijas proyectado a 5 años*

<b>Años</b>	<b>Saldo inicial</b>	<b>Cuota fija</b>	<b>Interés</b>	<b>Abono de capital</b>	<b>Saldo final</b>
0	---	---	---	---	\$ 25,000.00
1	\$ 25,000.00	\$ 6,678	\$ 2,789.39	\$ 3,879.61	\$ 21,120.39
2	\$ 21,120.39	\$ 6,678	\$ 2,305.03	\$ 4,372.97	\$ 16,747.42
3	\$ 16,747.42	\$ 6,678	\$ 1,748.92	\$ 4,929.08	\$ 11,818.34
4	\$ 11,818.04	\$ 6,678	\$ 1,244.93	\$ 5,555.90	\$ 6,262.44
5	\$ 6,262.44	\$ 6,678	\$ 415.56	\$ 6,262.44	\$ 0

**Tabla C - 3***Flujo de caja*

	<b>Año 0</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 3</b>	<b>Año 4</b>	<b>Año 5</b>						
<b>Saldo inicial</b>	\$	<b>\$43.700,00</b>	\$	<b>28.460,00</b>	\$	<b>100.620,00</b>	\$	<b>172.780,00</b>	\$	<b>244.940,00</b>		
<b>Ingresos</b>												
Ahorro de combustible		\$	67.000,00	\$	67.000,00	\$	67.000,00	\$	67.000,00	\$	67.000,00	
<b>Total Ingresos</b>	\$	-	\$	67.000,00	\$	67.000,00	\$	67.000,00	\$	67.000,00	\$	67.000,00
<b>Egresos</b>												
Costo ingeniería	\$	4.500,00	\$	-	\$	-	\$	-	\$	-	\$	-
Compra de materiales	\$	6.200,00	\$	-	\$	-	\$	-	\$	-	\$	-
Mano de obra	\$	8.000,00	\$	-	\$	-	\$	-	\$	-	\$	-
Mantenimiento anual			\$	3.500,00	\$	3.500,00	\$	3.500,00	\$	3.500,00	\$	3.500,00
Inspecciones trimestrales			\$	2.400,00	\$	2.400,00	\$	2.400,00	\$	2.400,00	\$	2.400,00
Depreciación			\$	3.740,00	\$	3.740,00	\$	3.740,00	\$	3.740,00	\$	3.740,00
<b>Total Egresos</b>	\$	18.700,00	\$	9.640,00	\$	9.640,00	\$	9.640,00	\$	9.640,00	\$	9.640,00
<b>Flujo de caja económico</b>	\$	-18.700,00	\$	13.660,00	\$	64.320,00	\$	114.980,00	\$	165.640,00	\$	216.300,00
<b>Financiamiento</b>												
Préstamo recibido	\$	25.000,00	\$	-	\$	-	\$	-	\$	-	\$	-
Pago de préstamos			\$	6.700,00	\$	6.700,00	\$	6.700,00	\$	6.700,00	\$	6.700,00
<b>Total Financiamiento</b>	\$	25.000,00	\$	6.700,00	\$	6.700,00	\$	6.700,00	\$	6.700,00	\$	6.700,00
<b>Flujo de caja financiero</b>	\$	-43.700,00	\$	6.960,00	\$	57.620,00	\$	108.280,00	\$	158.940,00	\$	209.600,00
<b>VAN (Valor actual Neto)</b>	<b>\$ 300.275,22</b>											
<b>TRI (Tasa de retorno de inversión)</b>	<b>106%</b>											