



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE
CALOR EN UN COMPRESOR DE TORNILLO ROTATORIO DE
75 HP PARA EL PRECALENTAMIENTO DEL AGUA DE UNA
CALDERA**

Priscilla María Paz Marroquín

Asesorado por el Ing. Federico Salazar

Guatemala, noviembre de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CALOR EN
UN COMPRESOR DE TORNILLO ROTATORIO DE 75 HP PARA EL
PRECALENTAMIENTO DEL AGUA DE UNA CALDERA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

PRISCILLA MARÍA PAZ MARROQUÍN
ASESORADO POR EL ING. FEDERICO SALAZAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guererro Spínola de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortíz de León
VOCAL V	P.A. José Alfredo Ortíz Herincx
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Dr. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADOR	Ing. Federico Guillermo Salazar Rodriguez
EXAMINADOR	Ing. Renato Giovanni Ponciano Sandoval
SECRETARIO	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CALOR EN
UN COMPRESOR DE TORNILLO ROTATORIO DE 75 HP PARA EL
PRECALENTAMIENTO DEL AGUA DE UNA CALDERA,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, en mayo de 2009.

Priscilla María Paz Marroquín

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



Guatemala, 25 de febrero de 2010.

FACULTAD DE INGENIERÍA

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero:

Le saludo cordialmente, el motivo de la presente es para informarle que he revisado y aceptado el informe final de Priscilla María Paz Marroquín, con carne universitario No. 2005-11764. Con el tema de trabajo de graduación **“Implementación de un sistema de recuperación de calor en un compresor de tornillo rotatorio de 75HP para el precalentamiento de una caldera”**.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Ingeniero Químico Federico Salazar
No. De colegiado 201



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 22 de septiembre de 2010
Ref. EI.Q.TG.037.2010

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-037-10-B-IF le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de INGENIERA QUÍMICA a la estudiante universitaria **PRISCILLA MARÍA PAZ MARROQUÍN**, identificado con carné No. **200511764**, titulado: **"IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CALOR EN UN COMPRESOR DE TORNILLO ROTATORIO DE 75HP PARA EL PRECALENTAMIENTO DEL AGUA DE UNA CALDERA"** el cual ha sido asesorado por el Ingeniero Federico Salazar, como consta en el Acta.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice a la estudiante **Paz Marroquín**, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Inga. Teresa Lisely de León Arana, M.Sc.
COORDINADORA
Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación

C.c.: archivo



El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante **PRISCILLA MARÍA PAZ MARROQUÍN** titulado: **"IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CALOR EN UN COMPRESOR DE TORNILLO ROTATORIO DE 75 HP PARA EL PRECALENTAMIENTO DEL AGUA DE UNA CALDERA"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne rigor, coherencia y calidad requeridos.

Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía; C.Dr.

DIRECTOR

Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, octubre de 2010

Cc: Archivo
WGAM/am





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CALOR EN UN COMPRESOR DE TORNILLO ROTATORIO DE 75 HP PARA EL PRECALENTAMIENTO DEL AGUA DE UNA CALDERA**, presentado por la estudiante universitaria **Priscilla María Paz Marroquín**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A large, handwritten signature in black ink, enclosed within a large, hand-drawn oval shape.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, noviembre de 2010



/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dedico este trabajo de graduación a Dios que me dio la capacidad de soñar y también la sabiduría, inteligencia y paciencia necesaria para poder alcanzar poco a poco cada uno de esos sueños y a la Virgen María; por ser mi guía y compañía a lo largo de mi vida.

A mis padres: por creer y confiar en mí.

A mi abuelo: que me guía y acompaña desde el cielo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que estuvieron a mi lado apoyándome de una u otra forma.

A mis padres Por darme la vida y todo su amor, por ser ese apoyo incondicional a lo largo de todo este tiempo.

A mi familia Por todas sus oraciones, consejos, ayuda, comprensión y apoyo. María José gracias por tu ayuda, por tus explicaciones y consejos. Elisa y María gracias por los favores que me hicieron.

A mis amigos Nancy por estar siempre en todo y ser como una hermana para mí, por ser ese angelito que Dios me mandó; Juan José por escucharme y preocuparte siempre por mí. Julio, por tu apoyo incondicional en todo, porque sé que puedo contar contigo no importando la situación. Mariano, por tus sabios consejos. Mario Alberto, por estar en los momentos difíciles. Aldo por los ánimos que me diste y por darme tu confianza. Oscar por el apoyo que me diste en algún momento dado. Diego, por los momentos que compartimos al inicio de la carrera. A mi grupo de estudio, con ustedes estudiar no era tan difícil. ¿Qué se dicen los amigos? Los quiero a todos, ustedes y los que me faltaron. Gracias por estar siempre.

Marielos, Ana
Lucía, Eugenia
y Alejandro E.

Por sus palabras y consejos. Por su guía y apoyo.

Kaeser
Compresores

Especialmente a Iván López, por toda la ayuda proporcionada

A todos mis
catedráticos

Que me regalaron parte de su vida, tiempo y experiencias en cada una de las clases impartidas. Especialmente a Federico Salazar por asesorarme en el transcurso de la elaboración de este trabajo y por tomarse el tiempo para brindarme sus explicaciones.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 Compresión de aire.....	5
2.1.1. Aire	5
2.1.2. Propiedades físicas del aire	5
2.1.3. Propiedades de la mezcla de aire y vapor	6
2.1.4. Aire comprimido	7
2.1.4.1. Comportamiento del contenido de agua durante la compresión	8
2.1.4.2. Tratamiento del aire comprimido	9
2.1.4.3. Aplicaciones del aire comprimido	16
2.1.5. Compresores	16

2.1.5.1	Métodos de compresión	16
2.1.5.1	Flujo intermitente	16
2.1.5.1.2.	Flujo continuo	17
2.1.5.2.	Tipos de compresores	17
2.1.5.3.	Dispositivos y accesorios	18
2.1.5.4.	Compresor de tornillo	19
2.1.5.5.	Caracterización del compresor de tornillo a analizar.....	23
2.2	Transferencia de calor	35
2.2.1.	Recuperación de calor	37
2.2.1.1.	Esquema y funcionamiento del sistema de recuperación de calor.....	38
2.2.2.	Intercambiador de calor	42
2.2.2.1	Intercambiador de calor de placas	42
2.2.2.1.1.	Características de los intercambiadores de calor de placas	44
2.2.2.1.2.	Placas.....	45
2.2.3.	Eficiencia de conversión de energía	47
2.3	Calderas de vapor	47
2.3.1	Tipos de calderas	47
2.3.1.1	Acuotubulares	47
2.3.1.2	Pirotubulares	48
2.4	Análisis financiero	49
2.4.1.	Análisis de costos	49
2.4.1.1.	Por su ciclo de vida	49
2.4.1.2.	Según el área donde se consume	50
2.4.1.3.	Según su identificación	50
2.4.1.4.	Según su comportamiento	51
2.4.2.	Métodos de toma de decisiones	51
2.4.2.1.	Rentabilidad	51

2.4.2.2.	Valor presente neto (VPN)	52
2.4.2.3.	Tasa interna de retorno (TIR)	52
2.4.2.4.	Relación beneficio/costo	53
2.4.2.5.	Tiempo de recuperación del capital	54
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	55
3.1	Variables	55
3.2.	Delimitación del campo de estudio	56
3.3.	Determinación del tiempo de análisis	56
3.4.	Recursos	56
3.4.1.	Humanos	56
3.4.2.	Económicos	57
3.4.3.	Físicos	57
3.5.	Procedimiento para la recolección, obtención, ordenamiento y cálculo de datos	57
3.5.1.	Análisis del sistema actual	57
3.5.1.1.	Análisis del sistema de compresión	58
3.5.1.2.	Análisis de caldera y sistema de suministro de vapor	63
3.5.2.	Análisis del nuevo sistema	69
3.5.2.1.	Descripción del nuevo sistema	70
3.5.2.2.	Cálculo de las nuevas condiciones	71
3.5.3.	Análisis financiero	75
3.6.	Tabulación y ordenamiento de la información	76
4.	RESULTADOS	77
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	81

CONCLUSIONES	85
RECOMENDACIONES	87
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
BIBLIOGRAFÍA	91
ANEXOS	93
ANEXO 1. Tabla de requisitos académicos	93
ANEXO 2. Árbol de problemas.....	94
ANEXO 3. Diagramas para la instalación del sistema de recuperación de calor.....	95
ANEXO 4. Hoja de especificaciones del compresor.....	104
APÉNDICE	105
A.1. Muestra de cálculo.....	105
A.2. Tablas de datos	123
A.3. Descripción y diseño del nuevo sistema con recuperación de calor integrado	130

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Separador por gravedad utilizado para tratar dispersiones de condensado	14
2. Separador de membranas utilizado para el tratamiento de emulsiones	15
3. Tratamiento de aire comprimido (tanque, secador, filtros, purgadores y separadores de condensados)	15
4. Tipos de compresores	17
5. Secciones de un compresor de tornillo rotatorio	20
6. Proceso de un compresor de tornillo rotativo	22
7. Esquema de funcionamiento de un compresor de tornillo	24
8. Unidad compresora	25
9. Motor con accionamiento 1:1	25
10. Depósito separador	25
11. Sistema de refrigeración y ventilador radial	26
12. Componentes de un compresor de tornillo. Vista real	28
13. Dimensiones del compresor dadas en milímetros	31
14. Aceites lubricantes de la serie Sigma	34
15. Esquema del compresor (1) sin sistema de recuperación de calor, (2) con sistema de recuperación de calor	40
16. Intercambiador de calor de placas empaquetadas	43
17. Intercambiadores de placa soldada	44
18. Diferentes diseños de placas	45
19. Diferentes diseños de placas	46

20. Sistema actual de compresión	58
21. Sistema de suministro de vapor	62
22. Sistema nuevo. Sistema con intercambiador de calor integrado	68
23. Localización de los flujos de agua y aceite en el intercambiador de placas	80
24. Recuperador de calor interno integrado en el compresor	80
25. 5300: Intercambiador de calor interno; 2080: Válvula termostática; 7530: Entrada de agua; 7540: Salida de agua	80
26. Árbol de problemas	94
27. Diagrama de tuberías a remover e instalar en el sistema sin recuperación de calor y con el sistema de recuperación integrado	95
28. Diagrama de tuberías e instrumentos del sistema sin recuperación de calor y con el sistema de recuperación integrado	98
29. Diagrama de flujo del nuevo sistema	132
30. Diagrama tridimensional del nuevo sistema. Vista frontal con ángulo	133
31. Diagrama tridimensional del nuevo sistema. Vista trasera con ángulo	133
32. Diagrama tridimensional del nuevo sistema. Vista frontal	135
33. Diagrama tridimensional del nuevo sistema. Vista trasera	135
34. Diagrama tridimensional del nuevo sistema. Vista lateral derecha	136
35. Diagrama tridimensional del nuevo sistema. Vista lateral izquierda	136
36. Diagrama tridimensional del nuevo sistema. Vista desde arriba	137
37. Diagrama tridimensional de los tanques de agua	138
38. Diagrama tridimensional del intercambiador de calor a instalar	139
Gráfica 1. Consumo de combustible diario durante un mes, con y sin recuperación de calor	127
Gráfica 2. Costo de combustible diario durante un mes, con y sin recuperación de calor	128

TABLAS

I.	Temperaturas de los diferentes elementos térmicos para diferentes climas	27
II.	Peso del compresor	28
III.	Temperaturas del equipo	29
IV.	Condiciones ambientales	29
V.	Ajuste de la válvula de alivio /seguridad	30
VI.	Caudal a presión nominal	30
VII.	Datos del motor del compresor y del motor del ventilador	31
VIII.	Cantidad de aceite refrigerante en el compresor de tornillo rotatorio	35
IX.	Propiedades del aceite lubricante utilizado en el compresor de tornillo rotatorio modelo CSD 75	35
X.	Especificaciones de la calidad del agua a utilizar en la recuperación térmica	41
XI.	Variables medidas y forma de obtención de datos del sistema de compresión	60
XII.	Variables necesarias para el cálculo y obtención de datos del sistema de compresión	61
XIII.	Variables medidas y forma de obtención de datos del sistema de suministro de vapor	67
XIV.	Variables necesarias para el cálculo y obtención de datos del sistema de suministro de vapor	68
XV.	Variables medidas para la obtención de los datos del sistema nuevo	74
XVI.	Variables necesarias para el cálculo y obtención de datos del sistema nuevo	75

XVII.	Variables a medir semanalmente en el sistema de suministro de vapor	76
XVIII.	Variables a medir en el compresor	76
XIX.	Calor recuperable del compresor	77
XX.	Eficiencia energética del compresor	77
XXI.	Costo de producción de vapor	77
XXII.	Resultados del análisis financiero	78
XXIII.	Especificaciones de la calidad del agua a utilizar en el intercambio de calor	79
XXIV.	Tabla de requisitos académicos	93
XXV.	Simbología para los diagramas de tuberías e instrumentos	101
XXVI.	Simbología para los diagramas de tuberías e instrumentos	102
XXVII.	Materiales y precios a utilizar en la instalación del sistema de recuperación de calor	118
XXVIII.	Inversión total	118
XXIX.	Cantidad de agua y combustible consumido	123
XXX.	Calor necesario para evaporar el agua y cantidad de combustible consumido y costo del mismo sin recuperación de calor. Entrando el agua potable a 28 °C y el condensado a 68 °C	124
XXXI.	Calor necesario para evaporar el agua y cantidad de combustible consumido y costo del mismo con recuperación de calor. Entrando el agua precalentada con el aceite a 70 °C y el condensado a 68 °C	125
XXXII.	Cantidad de agua y de combustible consumido promedio, diario, mensual y anual	126
XXXIII.	Cantidad de combustible y dinero que se ahorra al instalar el sistema de recuperación de calor, diario, mensual y anual	127
XXXIV.	Flujo de efectivo y valores utilizados en el análisis financiero	129

XXXV.	Resultados del análisis financiero	129
XXXVI.	Nomenclatura del diagrama de flujo del nuevo sistema	131

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado	Unidades
A	Área	[m ²]
Cp	Capacidad Calorífica	[KJ/Kg K]
K	Conductividad Térmica	[W/m K]
ρ	Densidad	[Kg/m ³]
η	Eficiencia	[%]
\hat{H}	Entalpía Específica	[KJ/Kg]
Q	Flujo de calor	[KW]
m	Flujo másico	[Kg/s]
Pc	Poder Calorífico	[Btu/gal]
W	Potencia	[KW]
P	Presión	[bar]
B/C	Relación Beneficio/Costo	[Adimensional]
TIR	Tasa interna de retorno	[%]
T	Temperatura	[K]
VPN	Valor presente neto	[Q]
v	Velocidad lineal	[m/s]

GLOSARIO

CAGI	En inglés <i>Compressed Air and Gas Institute</i> que traducido significa Instituto de aire y gases comprimidos.
Capacidad calorífica	Es la energía necesaria para aumentar 1 K la temperatura de una determinada cantidad de una sustancia. Es el cociente entre la cantidad de energía calorífica transferida a un cuerpo o sistema en un proceso cualquiera y el cambio de temperatura que experimenta.
Cfm	En inglés, <i>cubic feet per minute</i> que traducido significa pies cúbicos por minuto. Unidad en la que se mide el caudal de aire.
Condensados	Sustancia, generalmente agua, que pasa del estado gaseoso al estado líquido.
Conductividad térmica	Propiedad de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. Capacidad de una sustancia de transferir la energía cinética de sus moléculas a otras moléculas adyacentes o a sustancias con las que está en contacto.

Electroválvula	Dispositivo diseñado para controlar el flujo de un fluido a través de un conducto como puede ser una tubería.
Emulsión	Mezcla de dos líquidos inmiscibles de manera más o menos homogénea. Un líquido (la fase dispersa) es dispersado en otro (la fase continua o fase dispersante).
Flujo de efectivo	Cálculo del volumen de ingresos y de gastos, que ocurrirán en una empresa durante un determinado período de tiempo.
Micrón	Unidad de longitud equivalente a una millonésima parte de un metro. Se abrevia μm .
Poder calorífico	Es la cantidad de energía que la unidad de masa de materia puede desprender al producirse una reacción química de oxidación. El poder calorífico expresa la energía máxima que puede liberar la unión química entre un combustible y el comburente y es igual a la energía que mantenía unidos los átomos en las moléculas de combustible, menos la energía utilizada en la formación de nuevas moléculas en las materias (generalmente gases) formadas en la combustión.

Presión absoluta	La presión atmosférica más la presión manométrica. Cuando la presión se mide en relación a un vacío perfecto.
Presión de vapor	Es la presión, para una temperatura dada, en la que la fase líquida y el vapor se encuentran en equilibrio dinámico; su valor es independiente de las cantidades de líquido y vapor presentes mientras existan ambas.
Presión manométrica	Diferencia entre la presión absoluta o real y la presión atmosférica. Es la presión cuando esta se mide con respecto a la presión atmosférica.
Presión nominal	Presión de trabajo en determinadas condiciones. Número convencional que coincide con la presión máxima de trabajo a 20 °C (para temperaturas mayores se aplica un factor de corrección $P_{r\ tr} = P_{r\ nom} \times f$). Valor de la presión interna para la que se ha diseñado un tubo con un coeficiente de seguridad que puede mantenerse sin fallo durante 50 años.
Presión parcial	En una mezcla o solución sería aproximadamente la presión de dicho gas si se eliminaran repentinamente y sin que hubiese variación de temperatura todos los demás componentes de la mezcla o solución.

Presión relativa

Presión por encima de la presión atmosférica

RESUMEN

Se determinó por medio de un balance de energía que el calor recuperable del aceite de lubricación de un compresor de tornillo de 75 HP es de 27.83 KW. Al aprovechar este calor para el precalentamiento del agua de alimentación de una caldera pirotubular de 100 HP, se estimó que la eficiencia energética del compresor de tornillo aumenta en un 47.4%. Este aumento en la eficiencia energética conduce a un ahorro financiero al consumir la caldera menos combustible para la generación de vapor. Para determinar este ahorro se midió el consumo de combustible bajo las condiciones actuales, es decir, sin utilizar el calor del aceite para el calentamiento del agua. Luego con el valor del calor recuperable del aceite de lubricación se calculó que la temperatura que el agua alcanza al transferírsele el calor del aceite es de 70 °C. Con este dato se estimó el consumo de combustible bajo las nuevas condiciones.

Se calculó el costo anual de combustible necesario para producir el vapor requerido para el proceso bajo ambas condiciones y con esto el ahorro anual que resultó ser de Q60,783.42. Con el ahorro anual y los costos por modificaciones en los equipos e instalaciones se obtuvo un valor presente neto de Q167, 240.56, una tasa interna de retorno de 57%, un B/C de 4.7971 y un tiempo de recuperación de la inversión de 13 meses, con lo cual se concluyó que la instalación del sistema de recuperación de calor en el compresor es rentable.

Palabras clave:

Análisis financiero, compresión de aire, eficiencia energética, precalentamiento de caldera, recuperación de calor, reducción de costos.

ABSTRACT

It was determined by an energy balance that the recoverable heat from a 75 HP screw compressor is 27.83 KW. By harnessing this heat to preheat the feed water of a 100HP Boiler, it was estimated that the energetic efficiency of the screw compressor increased in 47.4%. This increase leads to an economic saving by consuming less amount of fuel, used to generate the steam required. To determine this saving, the consumption of fuel was measured under the current conditions, it means without using the heat from the lubricating oil from the compressor to warm up the water. Then with the value of the recoverable heat from the lubricating oil, it was calculated that the water reaches a temperature of 70 °C when the heat from the lubricating oil is transferred to it. With this information the consumption of fuel under the new conditions was calculated.

The annual fuel cost to produce the steam needed was calculated under both conditions and with this the annual saving that resulted in Q60, 783.42. With the annual saving and the extra costs, for modification and installation of equipment, the net present value resulted in Q167, 240.56, an internal rate of Return of 57%, a Benefit/cost relation of 4.7971 and a recovery of the investment of 13 months, with all this information it was concluded that the installation of a heat recovery system in a screw compressor is profitable.

Key words:

Financial analysis, air compression, energetic efficiency, preheat water, heat recovery, costs reduction.

OBJETIVOS

General

Considerar la posibilidad de instalar un sistema de recuperación de calor a partir de la cantidad total de calor recuperable del aceite de lubricación de un compresor de tornillo rotativo de 75HP.

Específicos

1. Realizar un balance de energía en el compresor para cuantificar el calor recuperable del mismo.
2. Caracterizar el sistema de recuperación de calor a instalar en el compresor de tornillo.
3. Estimar el valor de la eficiencia energética del compresor sin el sistema de recuperación de calor y con el mismo.
4. Determinar cuál es el costo de producción del vapor bajo las condiciones actuales, sin precalentamiento del agua de alimentación.
5. Determinar cuál es el costo de producción de vapor bajo las nuevas condiciones de operación, precalentando el agua de alimentación con el aceite de lubricación.
6. Cuantificar el ahorro financiero que se obtendría al aprovechar el calor del aceite.
7. Realizar un análisis financiero para determinar si es rentable o no la implementación de un sistema de recuperación de calor.

INTRODUCCIÓN

Para que cualquier proceso se lleve a cabo se necesita de energía. La energía en años anteriores no significaba un costo considerable del proceso y por ello no era de gran importancia hacer un buen uso de la misma. En muchos procesos parte de la energía suministrada se transforma en calor, el cual es desechado al ambiente. A esta energía desperdiciada se le denomina calor residual y puede ser recuperada de varias formas; una de ellas, expuesta en el presente trabajo de graduación, es el calentamiento de agua no consumible por el hombre. Para hacer uso del calor residual que se genera en un determinado equipo se utilizan los sistemas de recuperación de calor. La función de éstos es la de canalizar o direccionar el flujo de calor hacia donde se tenga alguna demanda de energía.

En una planta productora de pastas alimenticias se utiliza vapor como parte del proceso de producción, el cual es generado en una caldera pirotubular que utiliza un combustible derivado del petróleo. El combustible es el que proporciona la energía, por medio de la combustión, que el agua necesita para evaporarse. Debido a la gran demanda del petróleo y sus derivados, el costo ha ido incrementando con el paso del tiempo, y como consecuencia el costo de la energía ha aumentado, así como los costos de operación de las plantas industriales.

Por otra parte, se utiliza aire comprimido como fuente de energía para hacer funcionar la maquinaria. Se sabe que en el proceso de compresión una parte de la energía suministrada se utiliza para realizar el trabajo de compresión y el resto es liberado en forma de calor hacia los alrededores.

Entonces surge la inquietud de ver de qué manera se podría hacer uso del calor residual del compresor y transferirlo al sistema de la caldera, para lograr una reducción en el consumo de combustible. Con lo cual se lograría una disminución en los costos de operación. Para el aprovechamiento del calor residual del compresor se debe instalar un sistema de recuperación de calor, el cual consta de un intercambiador de calor. En este caso se plantea la posibilidad de utilizar un intercambiador de placas para la recuperación de calor.

En este trabajo de graduación se presenta un análisis energético de un compresor de tornillo rotatorio realizado por medio de un balance de energía, el cual se utilizó para estimar el calor residual del compresor de tornillo y luego para calcular la temperatura que alcanza el agua al ponerla en contacto con el aceite. Con este dato se estimó la cantidad de combustible que utiliza la caldera al entrarle agua a mayor temperatura y se comparó con la cantidad de combustible que utiliza la caldera actualmente. Se realizó un análisis financiero en el cual se calculó el valor presente neto, la tasa interna de retorno, la relación beneficio/costo y el tiempo de recuperación de la inversión, datos con los cuales se determinó que la implementación del sistema de recuperación de calor en el compresor es rentable.

Se muestran los fundamentos teóricos requeridos para llevar a cabo de manera justificada los procedimientos establecidos. Se presentan los objetivos y la metodología establecida a seguir con base en los mismos. Así como todos los cálculos realizados para obtener los resultados y por último un diagrama de flujo y un esquema de cómo quedará instalado el nuevo sistema.

1. ANTECEDENTES

En la recuperación de calor se logra absorber una parte importante de la energía calorífica desechada en algún equipo o dispositivo de cualquier proceso productivo y transmitirla a otro fluido; con lo que se consiguen ahorros de energía. Cuando la recuperación de calor se logra en un equipo que proporciona calor mediante la combustión, entonces se obtienen ahorros de consumo de combustible y una reducción de las emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero.

Los requisitos de recuperación de calor tienen sus orígenes en el aumento en el costo de energía, la necesidad de mantener la rentabilidad de un negocio y la necesidad de reducir la emisión de gases contaminantes. Esta se logra utilizando los recuperadores de calor. Una inversión en un sistema de recuperación de calor es rentable ya que el precio de la energía sube continuamente, el período de recuperación de la inversión es corto y la vida útil del sistema es grande.

La recuperación de calor se produce a diferentes niveles dependiendo de donde se encuentre la fuente de calor y de cuál será el sumidero que absorberá ese calor. Por ejemplo, puede efectuarse de los humos calientes en la salida de la caldera o puede también efectuarse al nivel del condensador de un grupo frigorífico o hasta se puede llevar a cabo en paneles solares para aprovechar la energía solar, entre otras fuentes de calor.

El calor recuperado se puede utilizar para calentar cualquier fluido ya sea calentar el aire de un cuarto, calentar agua, o calentar cualquier otro fluido involucrado en un proceso ya establecido. De esta manera, se afirma que la recuperación de calor puede ser a nivel industrial o a nivel doméstico ya que en las dos hay un ahorro de energía y por lo tanto de dinero.

Recuperación de calor para calentar agua

Entre las aplicaciones en las que se utiliza el calor recuperado para calentar agua se encuentra la producción de leche. Cuando se refrigera la leche se le extrae calor que se recupera para calentar agua. Con un sistema de recuperación de calor se calientan 75 litros de agua al enfriar 100 litros de leche. Esto representa aproximadamente 1000 KWh de energía que sale de la leche sin ningún consumo adicional.

Se recupera también, calor de un acondicionador de aire o de una bomba de calor para proporcionar agua caliente. El calor se recupera de la línea refrigerante entre el condensador exterior y el equipo interior. Un intercambiador de calor montado en esa línea extrae calor del gas refrigerante sobrecalentado, a alta presión, que es lo suficientemente caliente para poder perder calor sin que comience a condensarse.

Existen también calentadores solares de agua, que aprovechan la energía solar desperdiciada como fuente de calor. Girón Garcés (2007) en su tesis "Análisis costo/beneficio y especificaciones técnicas de la implementación de un sistema solar térmico para calentamiento de agua sanitaria en un hotel spa" describe los beneficios económicos que se obtienen al implementar el sistema solar de agua caliente, así como, el diseño correcto que se adecuó a las necesidades presentadas.

Escobar Ochoa (1985), en su tesis “Diseño de un intercambiador para calentar agua aprovechando el calor de los gases de chimenea de una caldera Cleaver Brooks de 74,600 W”, presenta el diseño de un recuperador de calor gases de combustión/agua. Muestra los cálculos de balance de masa y energía que realizó para estimar el calor que ceden los gases de chimenea de la caldera para luego diseñar un intercambiador de calor de superficies extendidas, en forma de anillos de cobre. Menciona las condiciones de operación y los límites de temperatura dentro de los cuales es recomendable la utilización del equipo recuperador de calor.

Recuperación de calor (otras aplicaciones)

Rosales Quijada (2008), en su tesis “Diseño de una unidad de recuperación de calor aprovechando los gases de combustión de un incinerador industrial”, muestra otra de las aplicaciones de la recuperación de calor. Presenta el diseño de un sistema de recuperación de calor que aproveche el calor sensible de los gases de combustión. El calor recuperado se reintroduce en el proceso, y se utiliza para calentar el aire de alimentación para la reacción de combustión. De esta forma logró aumentar la eficiencia del equipo y reducir el consumo de combustible utilizado y por lo tanto los costos de operación.

León Márquez (2006), en su tesis “Diseño de un sistema recuperador de calor para una torre de secado de detergente” presenta los balances de masa y energía realizados para cuantificar cuanto se pierde en forma de calor en el aire que sale caliente del secador para luego diseñar el recuperador de calor. El calor para el secado es proporcionado por un horno de aceite o gas con fuego directo. El calor recuperado se utilizó entonces para calentar el aire de secado y así se logró reducir los costos del combustible utilizado en el horno.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Compresión de aire

2.1.1 Aire

Es la mezcla de gases que conforman la atmósfera terrestre, que permanece alrededor de la Tierra debido a la fuerza de la gravedad. Está compuesto en composiciones ligeramente variables de nitrógeno en un 78%, oxígeno 21%, y 1% de otras sustancias tales como el ozono, dióxido de carbono, hidrógeno y algunos gases nobles, como el criptón o el argón. Esta es la composición aproximadamente del aire seco. En la naturaleza se encuentra que el aire contiene vapor de agua, el cual se comporta como un gas más de la mezcla y su proporción varía alrededor del 0% al 7%.

Propiedades físicas del aire

- **Expansión:** cuando el volumen de una masa de aire aumenta al reducirse la presión ejercida por una fuerza o debido a la introducción de calor.
- **Contracción:** es la reducción del volumen de una masa de aire al verse presionada por una fuerza.
- **Fluidez:** es el flujo de aire de un lugar de mayor a menor concentración sin gasto de energía.
- **Presión atmosférica:** es la fuerza que ejerce el aire a todos los cuerpos.
- **Volumen:** es el espacio que ocupa el aire.

- **Densidad:** es de 1.18 kg/m³ a 25 °C.
- **Viscosidad:** es de 0.018 cP a 20 °C.

2.1.2 Propiedades de la mezcla de aire y vapor

La ciencia que estudia las propiedades de las mezclas de gas y vapor es la psicrometría. El sistema aire-vapor de agua es el que se encuentra comúnmente en la naturaleza. La terminología y las relaciones asociadas con la psicrometría son las siguientes:

- **Humedad absoluta:** es la cantidad de vapor de agua contenida en el aire. Es igual a las libras de vapor de agua transportadas por libra de aire seco. Cuando la presión parcial del vapor de agua en el aire, a una temperatura dada, es igual que la presión de vapor del agua a la misma temperatura, el aire está saturado y la humedad absoluta se designa como la humedad de saturación.
- **Humedad relativa:** la humedad relativa informa sobre el grado de saturación del aire, es decir, la relación entre el vapor de agua realmente contenido en el aire y el punto de saturación correspondiente. El punto de saturación varía con la temperatura, cuanto mayor es la temperatura mayor cantidad de humedad podrá admitir el aire.
- **Punto de rocío atmosférico:** es la temperatura a la cual se alcanza el grado de saturación a presión atmosférica. El punto de rocío es la temperatura a la que una mezcla dada de vapor de agua y aire se satura.

- **Punto de rocío de presión:** es la temperatura a la que el aire comprimido alcanza su punto de saturación.
- **Temperatura de bulbo seco:** es la temperatura que se lee en un termómetro ordinario.
- **Temperatura de bulbo húmedo:** al cubrir el bulbo de un termómetro con un paño mojado con agua y al moverlo a través de un aire no saturado, el agua se evapora en proporción a la capacidad del aire para absorber la humedad. Esto provoca que la temperatura leída sea menor que la temperatura de bulbo seco. Al alcanzar el equilibrio dinámico, la temperatura que se obtiene es la temperatura de bulbo húmedo.

Las características del aire se pueden encontrar por medio de cálculos o por medio de la carta psicrométrica una vez conocidas las temperaturas de bulbo húmedo y de bulbo seco, éstas se pueden medir con instrumentos llamados psicrómetros.

2.1.3 Aire comprimido

El aire está disponible en todas partes en cantidades ilimitadas. Es un medio elástico, así que permite su compresión. Una vez comprimido puede ser almacenado en recipientes. Esta posibilidad de almacenamiento hace que su transporte pueda ser interpretado de dos formas: una por conductos y tuberías, y la otra, en recipientes preparados para tal efecto.

El aire comprimido se refiere a una tecnología o aplicación técnica que hace uso de aire que ha sido sometido a presión por medio de un compresor. En la mayoría de aplicaciones, el aire no sólo se comprime sino que también se deshumidifica y se filtra. El uso del aire comprimido es muy común en la industria, su uso tiene la ventaja sobre los sistemas hidráulicos de ser más rápido, aunque es menos preciso en el posicionamiento de los mecanismos y no permite fuerzas grandes.

El aire comprimido tiene una infinidad de aplicaciones, debido a su adaptabilidad y facilidad de transporte en comparación con el vapor de agua. Una importante aplicación es el accionamiento de taladros, martillos, chorros de arena, controles, pulverizadores y bombas.

El aire comprimido no posee características explosivas ya que es insensible a las variaciones de temperatura, no existen riesgos de chispas o cargas electrostáticas. La compresibilidad del aire no compromete los circuitos debido a los golpes de ariete.

2.1.3.1 Comportamiento del contenido de agua durante la compresión

El aire al comprimirse contiene la misma cantidad de agua que al inicio. Si una muestra de aire no saturado (en determinadas condiciones de temperatura y humedad relativa) se empieza a comprimir, se distinguen dos etapas, en las cuales sucede lo siguiente:

1. Antes de alcanzar la saturación
 - La humedad absoluta permanece constante.
 - La humedad de saturación disminuye.
 - La humedad relativa aumenta.
 - El punto de rocío aumenta.

2. Una vez la saturación es alcanzada
 - La humedad absoluta disminuye.
 - La humedad de saturación sigue disminuyendo.
 - La humedad relativa es constante e igual al 100%.
 - El punto de rocío permanece constante.
 - Se elimina agua en estado líquido.

Por lo tanto, se deduce que es más conveniente tratar al aire ya comprimido que tratarlo antes de la compresión.

2.1.3.2 Tratamiento del aire comprimido

Los compresores funcionan como una gran aspiradora y absorben impurezas que luego comprimen junto al aire y que llegarán a la red de aire comprimido si no se lleva a cabo el tratamiento correspondiente. A parte de la contaminación por impurezas contenidas en el aire, se tienen otros contaminantes, tales como: el agua, el vapor de agua y el aceite en sí.

▪ Tratamiento de impurezas

Para los compresores que no utilizan aceite de lubricación el tratamiento del aire se da por medio de un filtro de polvo. En los compresores que utilizan aceite tanto para la lubricación como para el enfriamiento parcial del aire, el aceite arrastra las partículas sólidas contenidas en el aire comprimido.

- **Tratamiento de aceite**

De acuerdo con la ISO 8573-1, el aire comprimido sólo podrá calificarse como libre de aceite si su contenido residual (incluyendo el vapor de aceite) es inferior a 0.01 mg/m³.

La fuente principal de contaminación por aceite en un sistema de aire comprimido se encuentra en el compresor. El aceite se utiliza para la lubricación del compresor, pero cuando aparece junto con el aire comprimido previo a la distribución, el aceite se encuentra en un estado totalmente inutilizable. Al haber sido sometido a elevadas temperaturas durante la compresión del aire, el aceite queda oxidado y ácido, con lo que puede ser considerado como un contaminante agresivo para el sistema, más que un lubricante propiamente, por lo que debe ser eliminado. Los filtros de aire normales eliminarán el suficiente aceite líquido (junto con agua) como para dejar el aire del sistema en condiciones para alimentar a la mayoría de máquinas y cilindros neumáticos, pero en determinados procesos se requiere aire completamente libre de aceite. Para el tratamiento del aceite se utilizan filtros de eliminación de aceite de alta eficacia en los puntos del sistema en que se requiera aire libre de aceite. Ello asegura que la cantidad de aire que necesita tratamiento especial se mantenga al mínimo, permitiendo trabajar en la zona afectada con un filtro especial más pequeño, en lugar de tener que utilizar un filtro especial de mayor tamaño para la totalidad de la planta.

El aceite de un sistema de aire comprimido puede existir en tres formas; como: emulsiones de aceite/agua, aerosoles (pequeñas partículas suspendidas en el aire) y vapores de aceite.

Los aerosoles de aceite son gotas minúsculas de aceite que se encuentran en la corriente de aire, y son las que causan mayores problemas tienen un tamaño de entre 0,01 a 1 micra (aprox. el 90%), el resto pueden ser ligeramente mayores. La mayoría de los filtros estándar de las líneas de aire consiguen la eliminación del agua mediante una acción centrífuga, pero en el caso de los aerosoles no es así, debido al pequeño tamaño de las partículas, y requieren la utilización de filtros especiales de tipo coalescente. Además de eliminar estas pequeñas gotas de aceite, estos filtros suprimirán también gotas diminutas de agua, pero deben ser protegidos contra la contaminación de suciedades o gotas de agua de mayor tamaño por medio de filtros estándar instalados inmediatamente aguas arriba. Los filtros coalescentes se clasifican normalmente por la cantidad de aire que pueden procesar para conseguir un rendimiento de eliminación de aceite determinado, normalmente un contenido residual de aceite en el aire de salida de $0,01 \text{ mg/m}^3$ (o 0,01 ppm). Las emulsiones pueden eliminarse mediante la utilización de filtros de aire estándar.

En la mayoría de los procesos la eliminación de vapor de aceite no es necesaria dado que, a diferencia del vapor de agua, el vapor de aceite existe únicamente en cantidades mínimas y no es objetable excepto en circunstancias en las que su olor sea inaceptable. El método más común de eliminación consiste en hacer pasar el aire a través de un lecho absorbente, normalmente de carbón activo, aunque también pueden utilizarse otros materiales.

- **Tratamiento de agua y vapor de agua**

Para cualquier tipo de compresor la base del tratamiento debe ser un secado suficiente del aire comprimido. Por secado se entiende la eliminación de agua del aire comprimido.

En los sistemas de aire comprimido, el agua existe como contaminante, originándose en la salida del compresor en forma de vapor, a medida que el aire se enfría, existirá agua tanto en forma líquida como de vapor.

La cantidad de vapor de agua que puede existir en un determinado volumen de aire comprimido es directamente proporcional a la temperatura del aire e inversamente proporcional a la presión. Así la cantidad de agua, en forma líquida, será mayor en cuanto menor sea la temperatura y mayor sea la presión, siendo estas condiciones las más eficaces para la eliminación de agua en el aire.

Para eliminar el agua del aire comprimido se utiliza un secador. Existen tres clases principales de secadores de aire:

- Secador frigorífico (Refrigerador)
- Secadores regenerativos adsorbentes
- Desecantes y delicuescentes
- Absorbentes

El más utilizado es el secador frigorífico en el cual se reduce la temperatura del aire y se condensa el agua que se encontraba en forma de vapor en el aire comprimido.

El aire comprimido al salir del compresor pasa a un tanque de almacenamiento, al que se le llama tanque húmedo. En este ocurre un intercambio de calor entre el aire y los alrededores y cualquier cantidad de vapor de agua que existiese, se condensa. El aire se introduce en la parte inferior y sale por la parte superior, con esto se logra que el agua condensada se acumule por gravedad en la parte inferior del tanque donde puede ser purgada. Luego pasa por un filtro de agua en donde se eliminan la mayor parte de gotas de agua.

Es al salir del filtro de agua que el aire comprimido entra al secador en donde se elimina casi en su totalidad el agua contenida en el aire. Al salir del secador pasa por un filtro de aceite y luego entra a un segundo tanque de almacenamiento, llamado tanque seco. Los tanques de almacenamiento se utilizan como puntos de remanso. Estos garantizan que la velocidad y la presión en todo el circuito sean constantes, con lo que se obtiene un buen tratamiento del aire en el que no hay acarreo de contaminantes.

- **Tratamiento de condensados**

En todos los sistemas de aire comprimido se forma condensados en puntos concretos y con diferentes sustancias contaminantes, debido a que el aire siempre presenta cierto grado de humedad. Por lo tanto, es imprescindible un sistema de evacuación de condensados confiable. La evacuación del condensado tiene una influencia decisiva sobre la calidad final del aire comprimido, la seguridad del servicio y la economía del sistema.

Se empieza a coleccionar y evacuar el condensado por medio de elementos mecánicos instalados en el sistema de compresión en los cuales se elimina gran parte del condensado total, siempre que los compresores cuenten con un buen sistema de refrigeración final.

Se evacua condensado de los filtros, del separador centrífugo, del depósito de aire comprimido (tanque húmedo) y del secador.

Hay que recordar que con el aire aspirado entran muchas sustancias contaminantes, como partículas de polvo, dióxido de azufre, cobre, plomo, hierro y otras sustancias debidas a la contaminación del aire que aspira el compresor. Estas sustancias salen en el condensado, por lo que es importante tratarlo.

En el condensado se pueden formar dispersiones y/o emulsiones debido a los aceites lubricantes que se utilizan en los compresores. En las dispersiones las impurezas del ambiente se depositan sobre la capa aceitosa que flota sobre el agua y se pueden separar fácilmente. Las emulsiones son líquidos de aspecto lechoso que no se separan en dos fases, por lo tanto no se pueden separar el aceite y el agua ni las impurezas aspiradas por medio de la gravedad. Se tiene también el condensado que se forma en sistemas libres de aceite que contiene los contaminantes que fueren aspirados en la compresión.

Para el tratamiento de condensados con dispersiones se utiliza generalmente un aparato de tres cámaras, formado por dos cámara y un filtro de carbón activado. La separación se produce por la acción de la gravedad. La capa de aceite que flota encima del agua se dirige a un depósito colector y se trata como aceite viejo. El agua que permanece en el depósito se filtra y puede eliminarse por el desagüe.

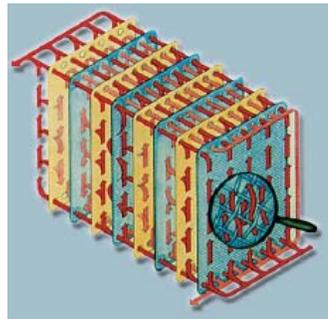
Figura 1. Separador por gravedad utilizado para tratar dispersiones de condensado



Fuente: www.kaeser.com

Para tratar emulsiones se pueden utilizar dos sistemas. Uno de membranas que funcionan según el principio de ultrafiltración en el cual el condensado atraviesa unas membranas y sale líquido que se puede desechar por el desagüe. El segundo tipo de sistema funciona con un agente separador pulverizado. Éste encapsula las partículas de aceite y forma con ellas copos fácilmente filtrables que se eliminan utilizando filtros con la porosidad correcta. El agua sobrante se puede desechar por el desagüe.

Figura 2. Separador de membranas utilizado para el tratamiento de emulsiones



Fuente: www.kaeser.com

El condensado de los compresores libres de aceite debe tratarse por procedimientos químicos de separación.

Figura 3. Tratamiento de aire comprimido (tanque, secador, filtros, purgadores y separadores de condensados)



Fuente: www.kaeser.com

2.1.3.3 Aplicaciones del aire comprimido

El aire comprimido tiene diferentes aplicaciones. En la industria de pastas alimenticias el aire comprimido se utiliza, después de pasar por el debido tratamiento, para el sistema de automatización de las máquinas que opera válvulas servo-pilotadas, pistones neumáticos, posicionadores de proceso, sistemas de empaque, etiquetado o impresión y movimiento de producto.

2.1.4 Compresores

La producción de aire comprimido se realiza mediante el compresor.

2.1.4.1 Métodos de compresión

Se utilizan cuatro métodos para comprimir un gas. Dos son de flujo intermitente, y los otros dos de flujo continuo. Estos métodos consisten en:

2.1.4.1.1 Flujo intermitente (Desplazamiento positivo)

- Atrapar cantidades consecutivas de gas en una cámara, reducir el volumen (incrementando así la presión) y empujar luego el gas comprimido fuera de la cámara.
- Atrapar cantidades consecutivas de gas en un espacio cerrado, trasladarlo sin cambio de volumen a la descarga de un sistema de alta presión y, comprimir el gas por contraflujo del sistema de descarga; finalmente, empujar el gas comprimido fuera de la cámara.

2.1.4.1.2 Flujo continuo

- Compresores dinámicos

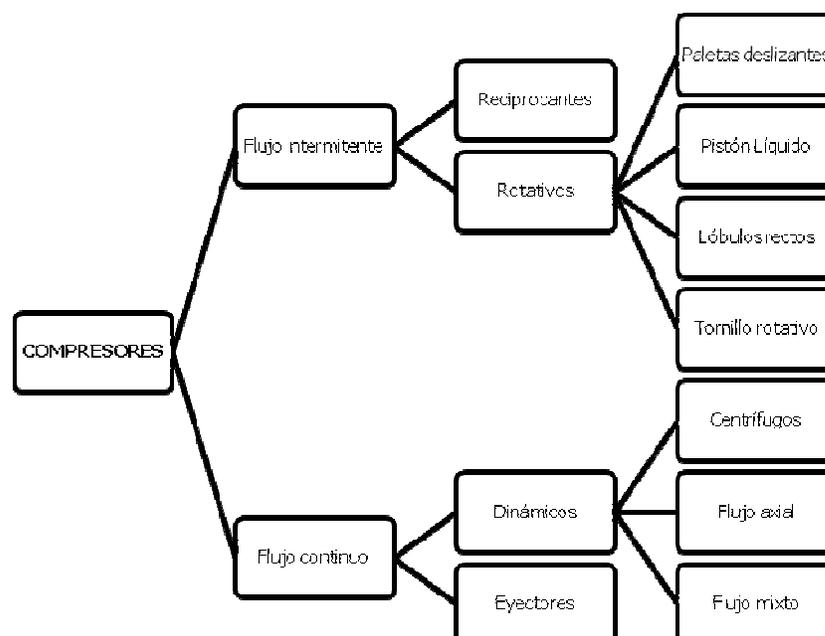
Comprimir el gas por la acción mecánica de un impulsor o rotor con paletas en rápida rotación, el cual imparte velocidad y presión al gas que está fluyendo (la velocidad se convierte en presión en difusores estacionarios o paletas).

- Eyectores

Utilizar un chorro de gas o vapor que arrastre el gas a comprimir para luego convertir la alta velocidad de la mezcla en presión en un difusor localizado corriente abajo. Los eyectores normalmente operan con una presión de admisión inferior a la atmosférica.

2.1.4.2 Tipos de compresores

Figura 4. Tipos de compresores



2.1.4.3 Dispositivos y accesorios

El compresor por sí mismo no sirve para hacer funcionar una instalación si no viene acompañado de una serie de dispositivos

- Dispositivos de arranque: tratan de evitar que el motor en el encendido demande más energía de la que normalmente consume, para ese fin se disponen en los motores eléctricos de variadores de frecuencia y en los motores de explosión con el arranque en vacío o el embrague.
- Dispositivos de regulación: las válvulas que facilitan o impiden el paso del aire a los pistones. Este sistema se utiliza para que el motor no trabaje de forma continuada cuando no se le requiere.
- Dispositivos de refrigeración: son dispositivos necesarios para la refrigeración del aire de admisión ya que así se reduce el trabajo realizado en la compresión y se condensa el agua de entrada al circuito que nos oxida la maquinaria. Existen diversos tipos de refrigeración: por agua, por aceite y por aire (ventilador).

Por efecto de la compresión del aire se desarrolla calor que debe evacuarse. De acuerdo con la cantidad de calor que se desarrolle, se adoptará la refrigeración más apropiada. En compresores pequeños, las aletas de refrigeración se encargan de irradiar el calor. Los compresores mayores van dotados de un ventilador adicional, que evacua el calor.

Cuando se trata de una estación de compresión de más de 30 kW de potencia, no basta la refrigeración por aire. Entonces los compresores van equipados de un sistema de refrigeración por circulación de agua en circuito cerrado o abierto.

A menudo se temen los gastos de una instalación mayor con torre de refrigeración. No obstante, una buena refrigeración prolonga la duración del compresor y proporciona aire más frío y en mejores condiciones. En ciertas circunstancias, incluso permite ahorrar un enfriamiento posterior del aire u operar con menor potencia.

Los accesorios necesarios son:

- Accesorios de acumulación: el más importante es el tanque húmedo que es un depósito destinado a almacenar aire comprimido situado a la salida del compresor. Su finalidad es regular la salida de aire comprimido, condensar el agua y regular el rendimiento compensando las variaciones en la toma del aire. Generalmente se estima su volumen en la producción del compresor en metros cúbicos por minutos
- Accesorios de filtro: es muy importante que los compresores tengan un filtro para que no se introduzcan impurezas.

2.1.4.4 Compresor de tornillo

Es una unidad rotativa de desplazamiento positivo con dos rotores helicoidales (o tornillos rotativos) que comprimen el gas en las cámaras que se forman entre las caras de los lóbulos helicoidales encajados y la carcasa. El elemento básico es la carcasa con su ensamble de rotores. Los lóbulos en los rotores no son idénticos. El rotor macho o guía (rotor principal) tiene una forma que coincide en la cavidad del rotor hembra o guiado. Alrededor del 85 al 90% de la potencia es utilizada por el rotor principal; el guiado requiere entre 10 y 15% lo más.

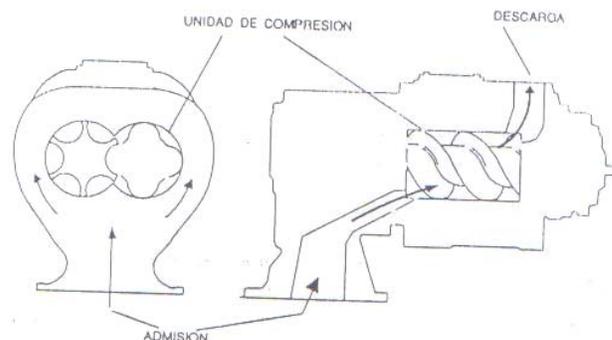
Hay dos tipos de mecanismos de tornillo rotativo: uno utiliza piñones acoplados para mantener los dos rotores en fase todo el tiempo; esta clase no requiere lubricación y el sello se consigue mediante tolerancias ajustadas. El segundo tipo usa un baño de aceite a lo largo de la máquina para lubricar, sellar y refrigerar el gas comprimido; en este tipo de mecanismo los piñones acoplados generalmente son omitidos.

Estas unidades tienen compresión interna. La relación de compresión está determinada por la localización de los bordes de las entrantes, la abertura de descarga y el ángulo de enrollamiento de los lóbulos. No hay válvulas.

Usualmente, el rotor principal tiene menos lóbulos que el guiado y por lo tanto opera a mayor velocidad. Los diseños varían en el ángulo de hélice y en el contorno de los lóbulos. La operación de uno de estos diseños está ilustrada en las figuras 5 y 6.

La figura 5 ilustra dos secciones transversales, mostrando en la sección radial el área de admisión en un extremo. La sección longitudinal muestra el flujo del gas a lo largo de la máquina.

Figura 5. Secciones de un compresor de tornillo rotatorio



Fuente: An introduction to compressors, Ingersoll-Rand Company

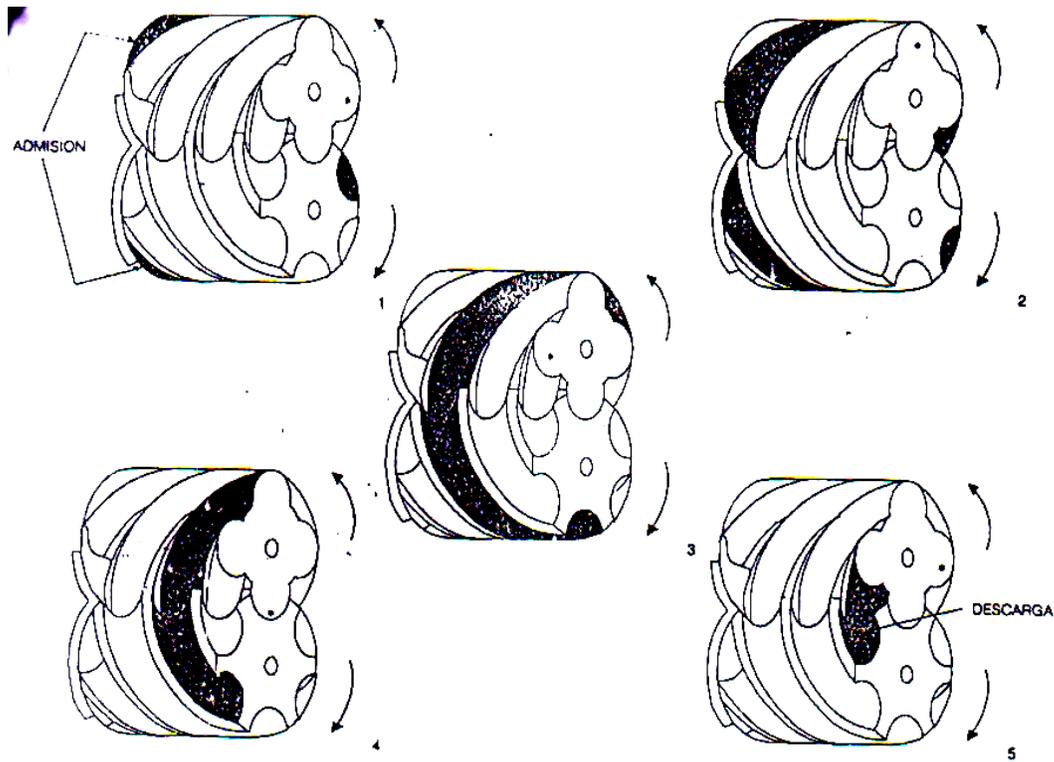
En la figura 6, las porciones sombreadas muestran que el gas ha sido comprimido paso a paso considerando una sola de las cámaras formadas entre los rotores y la carcasa durante una revolución completa del rotor principal.

1. La cámara del rotor guiado está totalmente abierta y se llena con el gas de admisión. La cámara del rotor principal está abierta hacia la admisión, pero todavía no está llena en su totalidad.
2. La cámara del rotor guiado se ha cerrado y la cámara del rotor principal se ha llenado, aunque aun está abierta hacia la admisión.
3. Los lóbulos se han entrelazado, las cámaras que casan se juntan y comienzan a disminuir su volumen.
4. Las cámaras espirales se hacen más pequeñas. El gas se comprime a medida que es llevado en dirección axial hacia el extremo de descarga. A lo largo de la secuencia de 1 a 4 la cubierta del extremo de descarga ha estado sellando la cámara.
5. La abertura de descarga se descubre y el gas comprimido es entregado al sistema.

Mientras esto ocurre con una cámara, las demás están siguiendo el mismo ciclo.

Es posible tener doble etapa haciendo un arreglo de dos unidades de compresión en serie. Ocasionalmente, las dos etapas están en la misma carcasa comunicadas por conductos internos.

Figura 6. Proceso de un compresor de tornillo rotativo



Fuente: An introduction to compressors, Ingersoll-Rand Company

La mayoría de compresores de aire industriales son los compresores rotativos de tornillo, porque pueden correr durante largos períodos de tiempo, y son muy fáciles de mantener. Además, la salida del aire de un compresor de aire de tornillo rotativo es lisa y libre de los impulsos que se pueden encontrar en otros modelos de compresor de aire. Además, estos modelos son pequeñas, compactas máquinas que aún están en condiciones de salida de un gran volumen de aire a un fuerte poder y tienen una vida muy larga.

2.1.4.5 Caracterización del compresor de tornillo a analizar

El compresor de tornillo utilizado en una planta productora de pastas alimenticias es un compresor Kaeser modelo CSD75. A continuación, se presentan las características propias de este compresor.

2.1.4.5.1 Esquema de funcionamiento de un compresor de tornillo rotativo

El aire de la atmósfera se aspira a través del filtro de aire seco (1), donde se purifica para pasar a la unidad compresora (3) por medio de la válvula de admisión (2) para ser comprimido. El compresor es accionado por el motor eléctrico (4).

El aceite refrigerante se inyecta dentro de la unidad compresora. El aceite lubrica las piezas móviles y forma un sello que impide la fricción entre los rotores, así como entre éstos y la carcasa. La efectiva acción refrigerante del aceite asegura una baja temperatura de trabajo dentro de la cámara compresora. El aceite, que se recupera en el tanque separador (5) se enfría en el intercambiador de calor (7). El aceite circula enseguida por el filtro y regresa al punto de inyección. La presión interna del equipo mantiene el aceite circulando. Así que no se necesita una bomba especial. Una válvula termostática mantiene la temperatura del aceite en un nivel óptimo.

El aire al salir de la unidad compresora pasa por un separador de tres fases (5) en donde se elimina el aceite de lubricación de la corriente de aire.

El aire comprimido al salir del separador (ya sin aceite) circula por la válvula cheque/presión mínima para ingresar inmediatamente a la unidad de enfriamiento (6) para luego pasar al sistema de tratamiento de aire comprimido.

La válvula cheque/presión mínima garantiza que siempre haya suficiente presión interna para que el aceite refrigerante circule permanentemente.

Figura 7. Esquema de funcionamiento de un compresor de tornillo



Fuente: www.kaeser.com

2.1.4.5.2 Componentes de un compresor de tornillo rotativo

- **Filtro de aspiración:** filtro de dos fases de 4 micrones.
- **Válvula de admisión:** admite la entrada de aire cuando el compresor está en marcha.

- **Unidad compresora:** compresor de tornillo. Comprime el aire. La velocidad de la unidad compresora es igual a la velocidad del motor.

Figura 8. Unidad compresora



Fuente: www.kaeser.com

- **Motor de accionamiento:** fuente de energía para que el compresor trabaje.

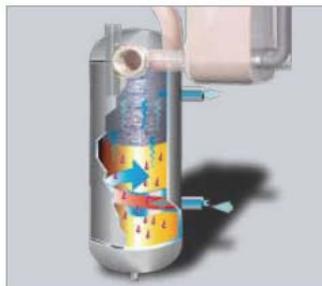
Figura 9. Motor con accionamiento 1:1



Fuente: www.kaeser.com

- **Depósito separador de fluidos:** el aceite de lubricación se separa de la corriente de aire por medio de fuerza centrífuga.

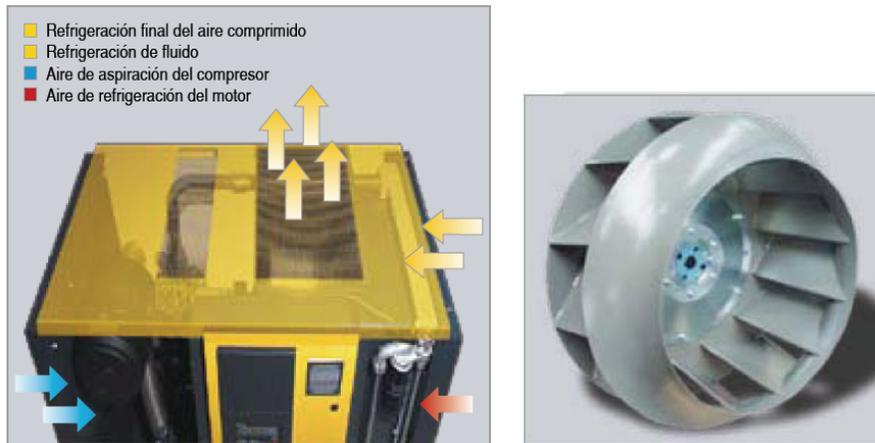
Figura 10. Depósito separador.



Fuente: www.kaeser.com

- **Refrigerador final de aire comprimido y refrigerador de fluido:** los refrigeradores de aire y de fluido se encuentran separados pero utilizan el mismo ventilador.

Figura 11. Sistema de refrigeración y ventilador radial



Fuente: www.kaeser.com

La temperatura del aceite de lubricación es regulada por una válvula térmica. Esta contiene un elemento termostático o elemento de trabajo, el cual indica la temperatura mínima a la que debe entrar el aceite a la unidad compresora. El aceite al estar en contacto con el aire se mezcla con el vapor de agua que pueda tener el aire, entonces si el aceite se enfría demasiado el vapor de agua se puede condensar. Esto propiciaría la formación de una emulsión y causaría daños en los lóbulos del compresor de tornillo.

Entonces si el aceite sale del separador a una temperatura menor a la temperatura óptima, la válvula térmica desvía el aceite de lubricación directo a la unidad compresora sin pasar por el enfriador. Por el otro lado, si el aceite sale del separador con una temperatura mayor a la óptima la válvula térmica deja pasar al aceite separador por el enfriador para pasar luego a la unidad compresora.

El vapor de agua contenido en el aceite de lubricación proviene de la humedad presente en el aire aspirado, y esta humedad depende del tipo de clima de la región. Para diferentes climas existen diferentes elementos térmicos. La siguiente tabla muestra las temperaturas de los elementos térmicos de acuerdo con el tipo de clima.

Tabla I. Temperaturas de los diferentes elementos térmicos para diferentes climas

TEMPERATURA (°C)	CLIMA
55	Cálido seco
65	Cálido seco
70	Estándar
75	Estándar
80	Estándar
85	Frío/Cálido húmedo
90	Frío/Cálido húmedo
100	Frío/Cálido húmedo

Fuente: Manual de servicio, Compresores de tornillo, Kaeser Compresores.

Figura 12. Componentes de un compresor de tornillo. Vista real

(1) Filtro de aspiración, (2) válvula de admisión, (3) Unidad compresora, (4) Motor de accionamiento, (5) Depósito separador de fluidos, (6) Refrigerador final de aire comprimido, (7) Refrigerador de fluido.



Fuente: www.kaeser.com

2.1.4.5.3 Especificaciones técnicas

- **Peso**

Corresponde al peso máximo del equipo. El peso real de un equipo en particular depende de los componentes que lo integran.

Tabla II. Peso del compresor

	CSD 75
Peso (Lb)	3510

Fuente: Manual de servicio, Compresores de tornillo, Kaeser Compresores.

- **Temperatura**

Tabla III. Temperaturas del equipo

ESPECIFICACIÓN	CSD 75
Temperatura mínima de corte (°F)	40
Temperatura típica del aire de salida de la unidad compresora durante la operación (°F)	167 – 200
Temperatura máxima del aire de salida de la unidad compresora (apagado automático) (°F)	230

Fuente: Manual de servicio, Compresores de tornillo, Kaeser Compresores.

- **Condiciones ambientales**

Tabla IV. Condiciones ambientales

ESPECIFICACIÓN	CSD 75
Máxima elevación (pies)	3000
Temperatura ambiente (°F)	40 – 115
Temperatura del aire de admisión/aire de enfriamiento (°F)	40 – 115
Humedad del aire de admisión a 88 °F (%)	100
Humedad del aire de admisión a 113 °F (%)	50

Fuente: Manual de servicio, Compresores de tornillo, Kaeser Compresores.

- **Presión**

Tabla V. Ajuste de la válvula de alivio /seguridad

Máxima presión de trabajo (psig)	Ajuste de los puntos máximo y mínimo de la válvula de alivio/ seguridad (psig)
125	155
175	230
217	230

Fuente: Manual de servicio, Compresores de tornillo, Kaeser Compresores.

- **Entrega libre de aire (Caudal)**

Tabla VI. Caudal a presión nominal

Presión de trabajo (psig)	Caudal (CFM)
110	363
125	361
145	296
175	292
190	232
217	229

Fuente: Manual de servicio, Compresores de tornillo, Kaeser Compresores.

- **Motores y capacidad de potencia**

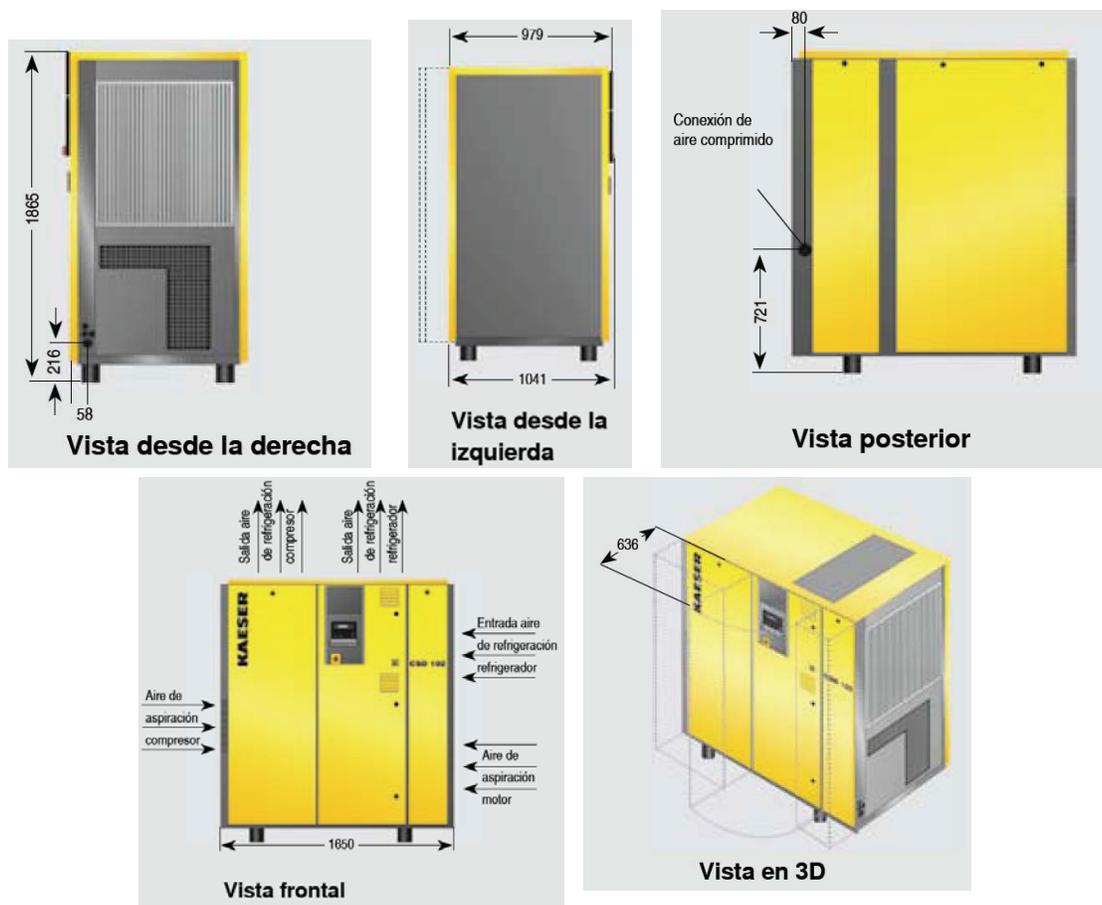
Tabla VII. Datos del motor del compresor y del motor del ventilador

	Motor del compresor	Motor del ventilador
Potencia nominal (hp)	75	1.3
Velocidad nominal (rpm)	3568	1120

Fuente: Manual de servicio, Compresores de tornillo, Kaeser Compresores.

- **Dimensiones**

Figura 13. Dimensiones del compresor dadas en milímetros



Fuente: www.kaeser.com

2.1.4.5.4 Aceite de lubricación

La lubricación de un compresor de aire es un factor esencial que garantiza la confiabilidad operativa del equipo. Es posible que el aceite del compresor contenga residuos de carburo y barniz. Dichos residuos forman depósitos que obstruyen el flujo del aceite y hacen que las piezas móviles del equipo se desgasten en exceso y finalmente terminen dañándose. La contaminación del aceite puede dar lugar a la formación de ácidos que ocasionan un alto grado de corrosión interna. La humedad puede condensarse, reduciendo las propiedades lubricantes del aceite y causar daños a la unidad compresora.

El aceite no se limita simplemente a lubricar el compresor de tornillo rotativo. Durante la compresión, el aceite actúa como sello hermético de la unidad compresora, con el fin de garantizar la máxima eficiencia del equipo. El aceite absorbe gran parte del calor producido durante el proceso de compresión, con el propósito de enfriar la unidad compresora y reducir la temperatura del aire comprimido. El aceite, además de lubricar adecuadamente el compresor, debe resistir los efectos del calor, la presión y los contaminantes presentes en todo el compresor de aire.

- **Lubricante sintético**

Proveen de una protección superior PAO (poli-alfa-olefina)/ MFSE (multi-funcional sintético éster), los cuales son mezclados en la formulación con aditivos ya conocidos y aprobados. Por lo que, se obtiene como resultado una protección térmica y antioxidante muy superiores. Aumentan la eficiencia de la máquina, está formulado para lograr una excelente separación del condensado y provee de una excelente lubricación a altas y bajas temperaturas.

El aceite sintético es ideal para aplicaciones donde se requiere extender los intervalos de servicio. Este está formulado para desmulsificar y mantener una óptima viscosidad sobre el más amplio rango de temperatura de trabajo en los compresores. Pruebas han demostrado que proporciona una vida de servicio superior, minimizando el tiempo en que este se hace circular a través de la unidad y reduciendo el mantenimiento.

- **Lubricante sintético biodegradable**

Esta es la mezcla de polyolester (POE), lubricante sintético de larga duración, realmente biodegradable y no tóxico. Es especialmente ventajoso en aplicaciones en donde este es expuesto a elevadas temperaturas por largos períodos de tiempo. Es resistente a formaciones de lodo y barniz aún bajo condiciones extremas. Esta formulado para ser reciclable bajo las mismas normas y tecnología que se utilizan en el sistema de reciclaje de aceite mineral.

- **Lubricante semisintético**

Posee características tanto del aceite a base mineral como del sintético. Minimiza el mantenimiento y los tiempos improductivos. Es un compuesto de hidrocarbón altamente purificado y que cuenta con un compuesto especial de aditivos, los cuales proveen de economía en operación y servicio en sistemas de compresores de tornillo rotativo. Ofreciendo una superior estabilidad térmica, de oxidación, control de viscosidad, condensado y baja tendencia espumante, mientras que minimiza la formación de barniz.

- **Lubricante a base de petróleo**

Este tipo de aceite es formulado con base en petróleo de la más alta calidad y combinado con mejoradores del índice de viscosidad inhibidores de corrosión y de oxidación, agentes antidesgaste, antiespumantes y detergentes. Su alto índice de viscosidad y su bajo punto de mezcla asegura un buen flujo de aceite durante el arranque en frío mientras mantiene una buena lubricación aún bajo severas condiciones ambientales.

- **Especificaciones del aceite de lubricación del compresor de tornillo rotativo a analizar**

El compresor a analizar utiliza aceite semisintético serie S (S-460). Los aceites Sigma de la serie S se obtienen a partir de una fórmula que combina los más avanzados lubricantes sintéticos. El componente básico de estos aceites es petróleo. Luego de ser refinados, se procesan y purifican hasta obtener aceites con una estructura molecular consistente. Enseguida, se mezclan cuidadosamente a fin de obtener aceites extraordinariamente consistentes con propiedades inigualables. Los aceites sintéticos tienen todas las ventajas tanto de los lubricantes a base de polialfaolefina (PAO) como de los aceites de biodiesel.

Figura 14. Aceites lubricantes de la serie Sigma



Fuente: www.kaeser.com

Tabla VIII. Cantidad de aceite refrigerante en el compresor de tornillo rotatorio

ESPECIFICACIÓN	CSD 75
Carga total (gal)	9.5
Volumen de llenado (gal) (mínimo-máximo)	1.1

Fuente: Manual de servicio, Compresores de tornillo, Kaeser Compresores.

Tabla IX. Propiedades del aceite lubricante utilizado en el compresor de tornillo rotatorio modelo CSD 75

Propiedades	M-460
Viscosidad a 40°C cSt	46
Viscosidad a 100°C cSt	6.7
Índice de viscosidad	91
Punto de inflamabilidad °C (°F)	241 (465)
Punto de fluidez (°F)	-26 (-15)
Gravedad específica 16°C (60°F)	0.872

Fuente: Manual de servicio, Compresores de tornillo, Kaeser Compresores.

2.2 Transferencia de calor

El calor es la forma de energía que se transfiere de un sistema a otro debido a una diferencia de temperatura. Un análisis termodinámico se interesa en la cantidad de transferencia de calor conforme un sistema pasa por un proceso, de un estado de equilibrio a otro. La ciencia que trata la determinación de las velocidades de esas transferencias de energía es la transferencia de calor.

La transferencia de energía como calor siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja, y la transferencia se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura².

El calor se puede transferir de tres formas diferentes: conducción, convección y radiación.

- **Conducción:** es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas². La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas. El mecanismo de transferencia de calor por conducción está regido por la ley de Fourier, que dice que la velocidad de la conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de ésta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa.
- **Convección:** es la transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que se encuentran en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos². Entre más rápido es el movimiento del fluido, mayor es la transferencia de calor por convección.

Se le llama convección forzada cuando el fluido es forzado a fluir sobre la superficie haciendo uso de medios externos, y convección natural cuando el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura. El mecanismo de transferencia de calor por convección está regido por la ley de enfriamiento de Newton, que dice que la transferencia de calor es proporcional a la diferencia de temperatura.

- Radiación: es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas, como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas². La transferencia de calor por radiación no requiere de un medio interpuesto. La radiación térmica es la transferencia de calor provocada por los cuerpos debido a su temperatura. Todos los cuerpos que tengan una temperatura mayor del cero absoluto emitirán radiación térmica. La velocidad máxima de radiación que puede ser emitida desde una superficie a determinada temperatura se expresa mediante la ley de Stefan-Boltzmann.

2.2.1 Recuperación de calor

La transmisión de calor es necesaria en los procesos industriales actuales, mediante esta transmisión se consiguen ahorros de costes energéticos y máximo aprovechamiento de la energía ya disponible en el sistema. Los fluidos, por tanto, se calientan o refrigeran para seguir siendo aprovechados dentro del proceso industrial gracias a los intercambiadores.

Recuperación de calor se refiere a la transferencia de calor desde un medio donde se tiene calor que está siendo desperdiciado hacia otro en donde se podría aprovechar. Para la recuperación de calor se utilizan los sistemas de recuperación de calor que no son nada más que intercambiadores de calor. Estos pueden ser de cualquier tipo y se utiliza el que mejor se adapte a las necesidades que se tienen.

El equipo a analizar es un compresor Kaeser de tornillo rotativo de 75 HP. El calor que se desea recuperar es el transferido al aceite de lubricación cuando se comprime el aire, por lo que el sistema de recuperación de calor se instalaría en el compresor. La instalación puede ser interna o externa. Para compresores pequeños la instalación es externa, para compresores grandes en los que hay suficiente espacio para colocar un compresor la instalación es interna. En el caso de un compresor de 75 HP la instalación es interna y el sistema de recuperación de calor es un intercambiador de calor de placas.

2.2.1.1 Esquema y funcionamiento del sistema de recuperación de calor

El sistema de recuperación de calor consiste en integrar un intercambiador de calor de placas en la parte inferior del separador, cuando el aceite sale caliente por efecto de la compresión de aire, tal y como se muestra en la figura 15. Por un lado del intercambiador entra agua fría y en un flujo a contracorriente entra el aceite caliente.

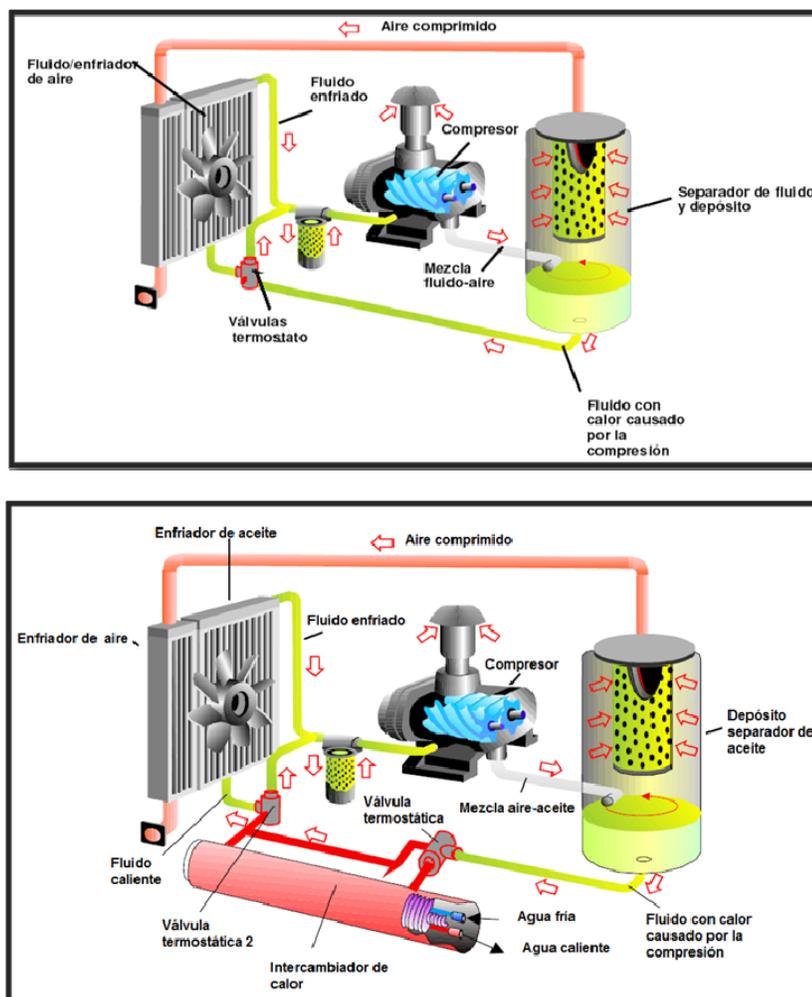
Al agregar el sistema de recuperación de calor, el aceite se encuentra todavía en un circuito cerrado el cual se encuentra a presión, por lo que el aceite aún circula sin necesidad de incorporar una bomba. Como el área aumenta al integrar el intercambiador de calor, se debe agregar una cantidad adicional de aceite. Para un compresor de tornillo de 75 Hp la cantidad adicional de aceite es de 1.1 y de 0.8 galones cuando se tiene una diferencia de temperatura de aproximadamente 25 K y 55 K respectivamente. Estas diferencias de temperatura se refieren al cambio de temperatura que sufre el agua al transferírsele el calor del aceite.

La cantidad de calor transferida del aceite al agua es aquella que reduce la temperatura del aceite a la temperatura óptima de funcionamiento y no más. Para asegurar que la temperatura del aceite no se reducirá hasta valores no permitidos se tiene una válvula termostática colocada antes del intercambiador de calor y antes del sistema de enfriamiento original (Después del intercambiador de calor, como se muestra en la figura 15). De esta forma si el aceite circula por debajo de la temperatura establecida, éste se hace pasar directamente al compresor y no por ningún sistema de enfriamiento. El aceite volverá a pasar por el sistema de recuperación de calor o por el sistema de enfriamiento únicamente hasta que la temperatura del aceite se haya elevado lo suficiente.

La temperatura establecida del elemento térmico colocado antes del intercambiador de calor (de la válvula termostática) es de 80°C cuando se desea obtener agua muy caliente, de no ser ese el caso son instalados elementos térmicos de 70 °C u 80 °C, dependiendo de la presión final.

Por otro lado si el requerimiento del agua caliente se reduce o si se tuviera algún inconveniente con el sistema de recuperación de calor, el aceite es automáticamente desviado (por la válvula termostática) hacia el sistema de enfriamiento por aire (Instalado de forma estándar). De esta forma se asegura un buen funcionamiento del compresor. En el anexo se muestra un diagrama de tuberías e instrumentos del sistema sin recuperación de calor y con el sistema de recuperación de calor integrado.

Figura 15. Esquema del compresor (1) sin sistema de recuperación de calor, (2) con sistema de recuperación de calor



Fuente: www.kaeser.com

El calor recuperado del aceite de lubricación se utilizará para calentar agua. El agua no debe usarse para consumo humano ya que si se presenta una fuga, el aceite puede contaminar el agua refrigerante. También se debe examinar el agua para comprobar que cumple con lo requerido para ser utilizada en el intercambiador de calor, ya que si no cumple con los requerimientos puede causar corrosión y daños al equipo. A continuación, se muestra una tabla con las especificaciones de la calidad del agua.

Tabla X. Especificaciones de la calidad del agua a utilizar en la recuperación térmica

Nivel de pH	7.5 a 9.0
Dureza [° dH]	4.0–8.5
Cloro (Cl)* [mg/l]	< 150
Gas libre de cloro (Cl ₂) [mg/l]	< 1
Sulfato (SO ₃) [mg/l]	< 1
Hierro disuelto (Fe) [mg/l]	< 0.2
Carbonato de Hidrogeno (HCO ₃) [mg/l]	70–300
Sulfato (SO ₄) [mg/l]	< 70
HCO ₃ / SO ₄	> 1
Conductividad eléctrica [μS/cm]	10–500
Amoniaco (NH ₃) [mg/l]	< 2
Magnesio disuelto (Mn) [mg/l]	< 0.1
Aluminio disuelto (Al) [mg/l]	< 0.2
Nitrato (NO ₃), disuelto [mg/l]	< 100
Sulfato de hidrógeno (SO ₂) [mg/l]	< 0.05
Dióxido libre de carbón agresivo (CO ₂) [mg/l]	< 5
Glicol [%]	< 50
Sólidos (tamaño de partículas) [mm]	< 0.1
Algas	no permitido

Fuente: Manual de servicio, Compresores de tornillo, Kaeser Compresores.

2.2.2 Intercambiadores de calor

Las distintas aplicaciones de la transferencia de calor requieren diferentes tipos de accesorios y configuraciones de equipo. Las diferentes necesidades de transferencia de calor han llevado al diseño de nuevos intercambiadores de calor.

Un intercambiador de calor es un dispositivo diseñado para transferir calor de un fluido a otro, sea que estos estén separados por una barrera o que se encuentren en contacto.

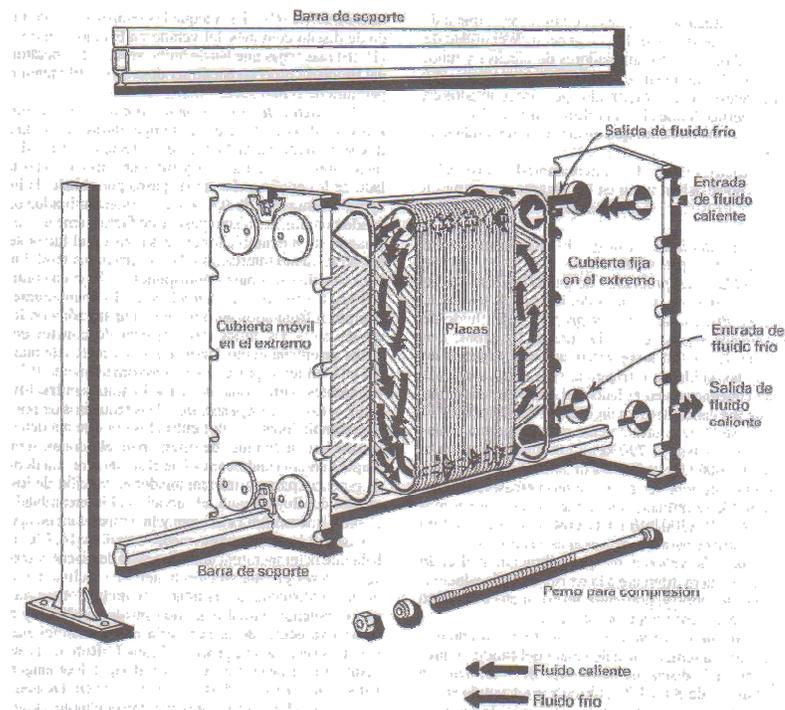
2.2.2.1 Intercambiador de calor de placas

Pertenecen a los tipos de intercambiador compactos. Consisten en un conjunto de placas preformadas con unos canales en disposición paralela por donde circulan los fluidos. Cada placa dispone de 4 bocas por donde circulan los fluidos en paralelo mientras que un fluido es conducido por las placas pares y el otro por las impares consiguiendo así el necesario intercambio de calor entre ambos³.

Existen dos tipos principales de unidades, las de placas empaquetadas y las de placas soldadas. Los intercambiadores de calor de placas empaquetadas son los más reconocidos entre los intercambiadores de calor compactos. Una serie de placas con canales corrugados de aleación, confinados por elementos empaquetadores de elastómero, se cuelgan y dirigen mediante lamas de soporte longitudinales y se compactan mediante tornillos o pernos de compresión, muy apretados entre dos placas de retención a presión del armazón (placas de cubierta).

El armazón y las placas acanaladas tienen orificios que permiten a los fluidos del proceso entrar al espacio entre dos placas adyacentes. El armazón alrededor del perímetro de la placa previene de fugas a la atmósfera y el contacto de los fluidos del proceso con las placas del armazón. No son posibles las fugas interfluidos en el área de los portillos debido a un doble sello. Las placas son típicamente de acero al carbono pintadas con epóxido. La expansión de la unidad inicial se lleva a cabo, con facilidad, sobre el propio terreno sin consideraciones especiales. El armazón original presenta, la posibilidad de ampliar su capacidad con un 15-20 por 100 más de placas acanaladas. Cuando se necesite la expansión, simplemente se desenroscan los pernos de compresión, se extrae hacia atrás la placa del armazón, se añaden las placas acanaladas adicionales y se vuelve a apretar la placa del armazón.

Figura 16. Intercambiador de calor de placas empaquetadas



Fuente: Manual del Ingeniero Químico

Los intercambiadores de calor de placa soldada se soldan parejas de placas junto con el otro lado del fluido empaquetado convencionalmente, soldar ambos lados pero empleando un apilamiento horizontal de las placas como método de ensamblaje, broncear o soldar con latón enteramente las placas junto con cobre o níquel bronceado, unir por difusión y presionar para formar las placas y grabar al agua fuerte la unión de paso de las placas. La mayoría de los métodos de fabricación de placas soldadas no permiten la inspección de las superficies de transmisión de calor, ni la limpieza mecánica de tal superficie, y presentan una facilidad limitada para reparar canales dañados, por lo que deben considerarse estas limitaciones cuando el fluido es muy ensuciante.

Figura 17. Intercambiadores de placa soldada



Fuente: Schmidt Brazed Plate Heat Exchangers

2.2.2.1.1 Características de los intercambiadores de calor de placas

- Compactos: tienen una gran superficie de intercambio y las placas en conjunto proporcionan una mayor eficiencia térmica requiriendo menor espacio de instalación.

- Alto rendimiento térmico: precisión de intercambio y mayor superficie de intercambio térmico, los circuitos funcionan a contracorriente y el resultado es una gran transferencia térmica.
- Seguridad: ausencia de contaminación entre circuitos debido al sellado independiente de ambos mediante las juntas de estanqueidad. El área intermedia ventea a la atmósfera en caso de rotura o desgaste de juntas, evitando así la no deseada contaminación interior.
- Livianos: su diseño proporciona una fácil manipulación en planta, embarque y seguridad de uso en la instalación.
- Ensuciamiento mínimo: debido a su diseño auto limpiante de las placas.
- Mínima corrosión y desgaste de materiales

2.2.2.1.2 Placas

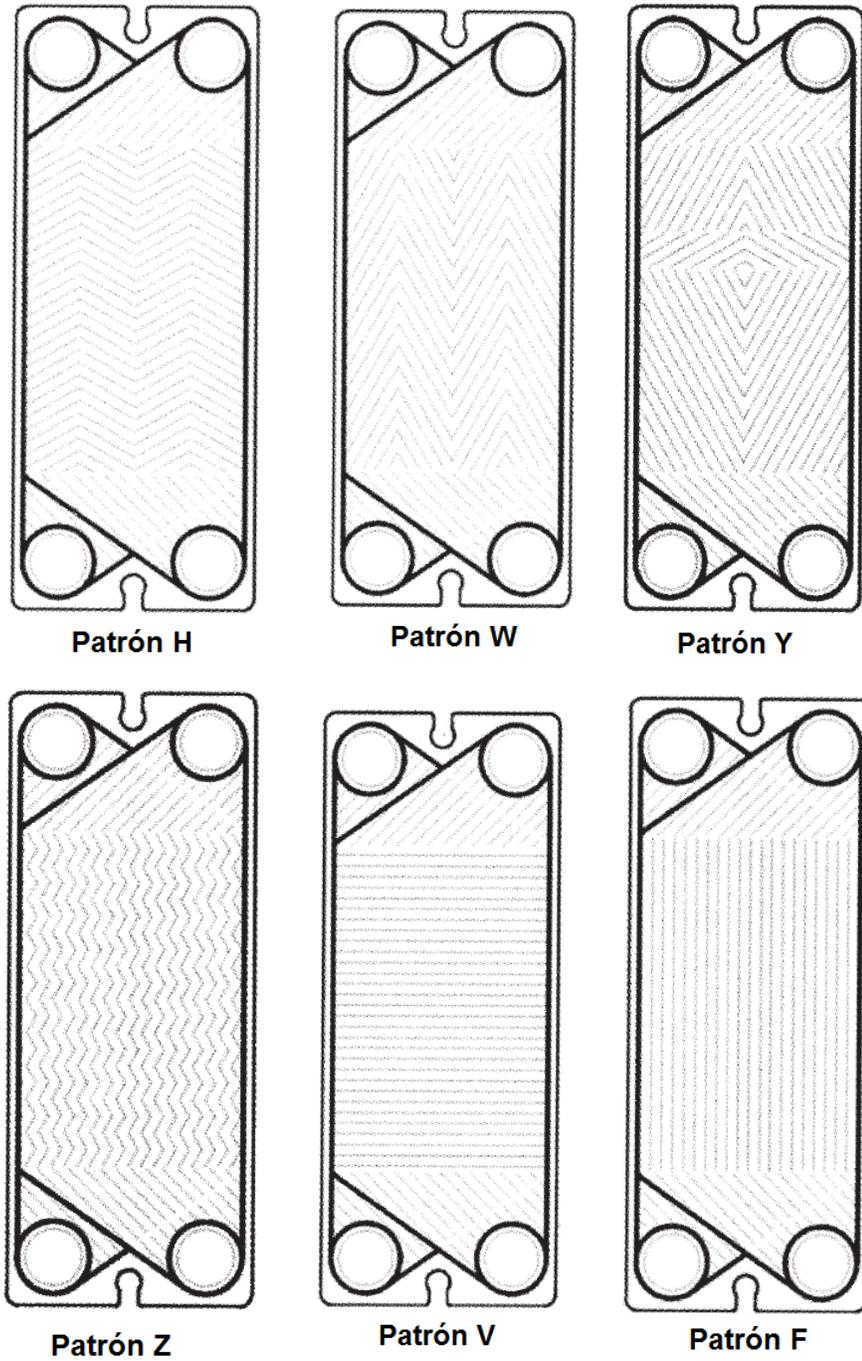
Dependiendo del requerimiento de transferencia de calor y los fluidos del proceso el corrugado de la placa o el patrón de la superficie y el espesor variarán. En la figura se muestran algunos diseños de corrugados de placas.

Figura 18. Diferentes diseños de placas



Fuente: Schmidt Gasketed Plate Heat Exchangers

Figura 19. Diferentes diseños de placas



Fuente: API Schmidt-Bretten Plate and Frame Heat Exchanger Installation and Maintenance Manual

2.2.3 Eficiencia de conversión de energía

Eficiencia es uno de los términos usados con más frecuencia en la termodinámica, e indica cuán bien se realiza un proceso de conversión o transferencia de energía¹. Eficiencia energética se refiere a que tanto de la energía introducida o aplicada a un sistema o equipo está siendo en realidad utilizada.

2.3 Calderas de vapor

Las calderas son equipos industriales que, aplicando el calor de un combustible sólido, líquido o gaseoso, vaporizan el agua para aplicaciones en la industria. Están formadas por un cilindro o carcasa en cuyo interior se encuentran una serie de tubos distribuidos en forma triangular y en cuyo centro se ubica el hogar de la caldera, su objetivo es la generación de vapor. Este vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión constante, en la cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia de estado. El vapor es usado generalmente como un medio para transferir calor a través de intercambiadores de calor, marmitas, tuberías, serpentines o directamente a la superficie a calentar.

2.3.1 Tipos de calderas

2.3.1.1 Acuotubulares:

Son aquellas en las cuales el agua circula en el interior de los tubos; y los gases de combustión circulan por la parte exterior de los mismos. Este tipo de calderas pueden abarcar todos los rangos de presión, pudiendo generar grandes cantidades de vapor.

Son las más utilizadas en las centrales termoeléctricas, ya que permiten altas presiones a su salida, y gran capacidad de generación.

2.3.1.2 Piro tubulares:

Son aquellas en las cuales los gases de combustión circulan en el interior de los tubos; con el agua siendo calentada y evaporada en las regiones externas de los tubos. Este tipo de calderas trabajan con bajas presiones y tasas de evaporación limitadas.

La caldera a analizar es una caldera piro tubular de 100 Hp. La eficiencia de la misma es de 94%, dato obtenido por estudios realizados con anterioridad por el encargado de mantenimiento de la caldera. Utiliza Bunker C como combustible el cual tiene un valor de poder calorífico de 145,000 Btu/gal (Dato obtenido del proveedor de combustible).

Se busca aumentar la eficiencia de la caldera, lo cual se ve reflejado en una disminución del consumo de combustible.

Algunas de las técnicas utilizadas para mejorar la eficiencia de una caldera son las siguientes:

- Reducción de exceso de aire.
- Disminución de la temperatura de los gases de chimenea.
- Incremento de la temperatura del combustible.
- Reducción de las purgas de la caldera.
- Eficiente tratamiento de agua.
- Incremento en la temperatura del aire de combustión.
- *Aumento de la temperatura del agua de alimentación.*
- Aislamiento adecuado de equipos.
- Recuperación y aprovechamiento del condensado.

El método a analizar para el mejoramiento de la eficiencia es el de aumentar la temperatura del agua de alimentación de la caldera.

2.4 Análisis financiero

La evaluación financiera de proyectos es el proceso mediante el cual una vez definida la inversión inicial, los beneficios futuros y los costos durante la etapa de operación, permite determinar la rentabilidad de un proyecto. Tiene como propósito principal determinar la conveniencia de emprender o no un proyecto de inversión.

2.4.1 Análisis de costos

Costo es la erogación necesaria para la obtención de un bien o servicio, los hay de diferentes tipos pues suceden en diferente período de tiempo.

2.4.1.1 Por su ciclo de vida

- **Costo inicial:** es aquel que se da al inicio o es la inversión de arranque para poner en marcha un proyecto que nos permita generar utilidad.
- **Costo operacional y mantenimiento:** son gastos periódicos necesarios para operar en forma eficiente de un determinado bien, es decir son gastos que se dan conforme el nivel de actividades que pueden tener en un proyecto.

- **Costo de recuperación:** es el gasto necesario que se realiza al final de una vida útil o de servicio de determinado activo, y permite a quien ha realizado la inversión recuperar parte del capital invertido.

2.4.1.2 Según el área donde se consume

- **Costos de producción:** son los costos que se generan en el proceso de transformar la materia prima en productos terminados: se clasifican en material directo, mano de obra directa, CIF y contratos de servicios.
- **Costos de distribución:** son los que se generan por llevar el producto o servicio hasta el consumidor final
- **Costos de administración:** son los generados en las áreas administrativas de la empresa. Se denominan gastos.
- **Costos de financiamiento:** son los que se generan por el uso de recursos de capital.

2.4.1.3 Según su identificación

- **Directos:** son los costos que pueden identificarse fácilmente con el producto, servicio, proceso o departamento. Son costos directos el material directo y la mano de obra directa.

- **Indirectos:** su monto global se conoce para toda la empresa o para un conjunto de productos. Es difícil asociarlos con un producto o servicio específico. Para su asignación se requieren base de distribución (metros cuadrados, número de personas, etc.)

2.4.1.4 Según su comportamiento

- **Costos fijos:** son aquellos costos que permanecen constantes durante un periodo de tiempo determinado, sin importar el volumen de producción.
- **Costos variables:** son aquellos que se modifican de acuerdo con el volumen de producción, es decir, si no hay producción no hay costos variables y si se producen muchas unidades el costo variable es alto.

2.4.2 Métodos de toma de decisiones

2.4.2.1 Rentabilidad

La rentabilidad de un proyecto se refiere a la estimación del rendimiento del capital a invertirse en el proyecto, o el provecho económico-financiero que inversionistas van a obtener de él.

Los resultados que se obtengan de cualquier método que se utilice para estimar resultados futuros, serán tan próximos a la realidad como realistas sean los parámetros empleados en los cálculos y apropiados, los métodos de estimación que se apliquen.

El primer paso para aplicar cualquier método es generar un estado pro forma de ingresos y egresos, a lo largo del ciclo de vida del proyecto, el cual debe haberse definido previamente. Esta pro forma, se basa en la estructura de costos ya definida y su aplicación, a cada año de operación.

2.4.2.2 Valor presente neto (VPN)

También llamado valor actual neto (VAN). Es una alternativa para toma de decisiones de inversión, lo cual permite determinar de antemano si una inversión vale la pena o no poder realizarla, y no hacer así malas inversiones que provoquen en un futuro pérdidas.

El valor presente neto puede dar tres respuestas, las cuales pueden ser:

$VPN < 0$: cuando el resultado es menor que cero y es un valor muy negativo indica que el proyecto no es rentable, ya que se estará estimando que habrán pocos ingresos y en el tiempo que se pretende recuperar la inversión no se lograra. Cuando el resultado es menor que cero pero cercano a cero, indica que la opción puede ser rentable que se pretende obtener una tasa de utilidad muy grande.

$VPN = 0$: indica que se está generando el porcentaje de utilidad que se desea.

$VPN > 0$: indica que la opción es rentable y que podría incrementarse el porcentaje de utilidad.

2.4.2.3 Tasa interna de retorno (TIR)

Es la tasa de interés que hace que el valor actual neto de los flujos de caja, VAN, sea igual a cero.

Esta técnica encuentra la tasa de interés neta generada por el proyecto. Por lo tanto, se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Los costos no deben incluir las depreciaciones.
- Los costos no deben incluir los gastos financieros (pago de intereses por el capital prestado)
- Para que la TIR sea atractiva debe estar varios puntos arriba (de 5 a 15) de la tasa de interés del sistema bancario, lo cual cubrirá el riesgo y el esfuerzo que la inversión implica.

2.4.2.4 Relación beneficio/costo

La relación costo beneficio toma los ingresos y egresos presentes netos del estado de resultado, para determinar cuáles son los beneficios por cada quetzal que se sacrifica en el proyecto.

Cuando se menciona los ingresos netos, se hace referencia a los ingresos que efectivamente se recibirán en los años proyectados. Al mencionar los egresos presente netos se toman aquellas partidas que efectivamente generarán salidas de efectivo durante los diferentes periodos, horizonte del proyecto. Como se puede apreciar el estado de flujo neto de efectivo es la herramienta que suministra los datos necesarios para el cálculo de este indicador. La relación beneficio/costo es un indicador que mide el grado de desarrollo y bienestar que un proyecto puede generar.

Para calcular la relación beneficio/costo se toma como tasa de descuento la tasa social en vez de la tasa interna de oportunidad. Se trae a valor presente los ingresos netos de efectivo asociados con el proyecto y los egresos netos de efectivo del proyecto. Se establece la relación entre el VPN de los Ingresos y el VPN de los egresos.

Si el resultado es mayor que 1, significa que los ingresos netos son superiores a los egresos netos. En otras palabras, los beneficios (ingresos) son mayores a los sacrificios (egresos) y, en consecuencia, el proyecto generará ganancia. Si el resultado es igual a 1, los beneficios igualan a los sacrificios sin generar ninguna utilidad. Por tal razón sería indiferente ejecutar o no el proyecto.

2.4.2.5 Tiempo de recuperación del capital

Esta técnica no evalúa la rentabilidad en sí, sino la prontitud con que el capital invertido es recuperado por los inversionistas.

El tiempo de recuperación del capital, simple, utiliza los flujos de caja sin descuento y el año cuando la suma de estos es igual a la inversión inicial o la sumatoria es cero, corresponde al tiempo de retorno del capital (TR).

De la inversión inicial con signo negativo, se suman sucesivamente los flujos de caja, sin descuento o bien descontados, para cada año "t". Cuando el saldo correspondiente cambie de negativo a positivo, el periodo de tiempo que este entre los dos saldos negativo y positivo, ese será el tiempo de retorno del capital sin descuento o el tiempo de recuperación del capital descontado, si se está sumando flujos de caja descontados.

Por otra parte, si se aplica una tasa de descuento, como en el VPN, cuando los flujos de caja acumulados igualan la inversión inicial, se obtiene el tiempo de retorno descontado.

3 DISEÑO METODOLÓGICO

Se analizó cómo funciona el sistema actualmente y como funcionará este bajo las nuevas condiciones, es decir, al aprovechar el calor transferido por el aceite de lubricación del compresor de aire.

3.1 Variables

- **Potencia del compresor:** es el trabajo por unidad de tiempo que se le aplica al compresor para que éste comprima el aire.
- **Flujo de aceite:** es la cantidad de aceite de lubricación por unidad de tiempo que se recircula dentro del compresor.
- **Temperatura del aceite:** es la temperatura del aceite dentro del compresor.
- **Flujo de aire:** es la cantidad de aire que circula en la línea de compresión de aire.
- **Flujo de agua de alimentación:** es la cantidad de agua por unidad de tiempo que entra a la caldera.
- **Temperatura del agua de alimentación:** temperatura a la que entra el agua a la caldera.
- **Flujo de agua nueva:** es la cantidad de agua potable que se mezcla con el condensado para conformar el agua de alimentación de la caldera.
- **Flujo de condensado:** es la cantidad de condensado que se mezcla con el agua potable para conformar el agua de alimentación de la caldera.
- **Presión de la caldera:** presión a la cual la caldera está trabajando.

3.2 Delimitación del campo de estudio

- **Caldera**

Se midió cuánta agua entra y a que temperatura se encuentra la misma. Se midió la presión a la que trabaja la caldera.

- **Tanque de almacenamiento**

Se midió la cantidad de agua que entra al tanque de almacenamiento de agua de alimentación de la caldera.

- **Equipo de compresión**

Se midieron las temperaturas del aire y del aceite a la salida y entrada de la unidad de compresión, la presión del sistema y del aire comprimido y el caudal del aire.

3.3 Determinación del tiempo de análisis

Los datos se midieron diariamente durante un mes para tomar en cuenta las posibles variaciones del sistema y obtener datos de mayor confiabilidad.

3.4 Recursos

3.4.1 Recursos humanos

Se contó con el apoyo del jefe de ingeniería, del ingeniero encargado de la línea de producción y los operarios de la misma y del técnico encargado de los compresores.

3.4.2 Recursos económicos

Todos los gastos necesarios fueron cubiertos en su totalidad por la empresa.

3.4.3 Recursos físicos

- Instrumentos de medición:
 - Termómetros
 - Manómetros
 - Contadores de agua
 - Contadores de combustible
 - Balanza
 - Cronómetro
 - Medidor de aire

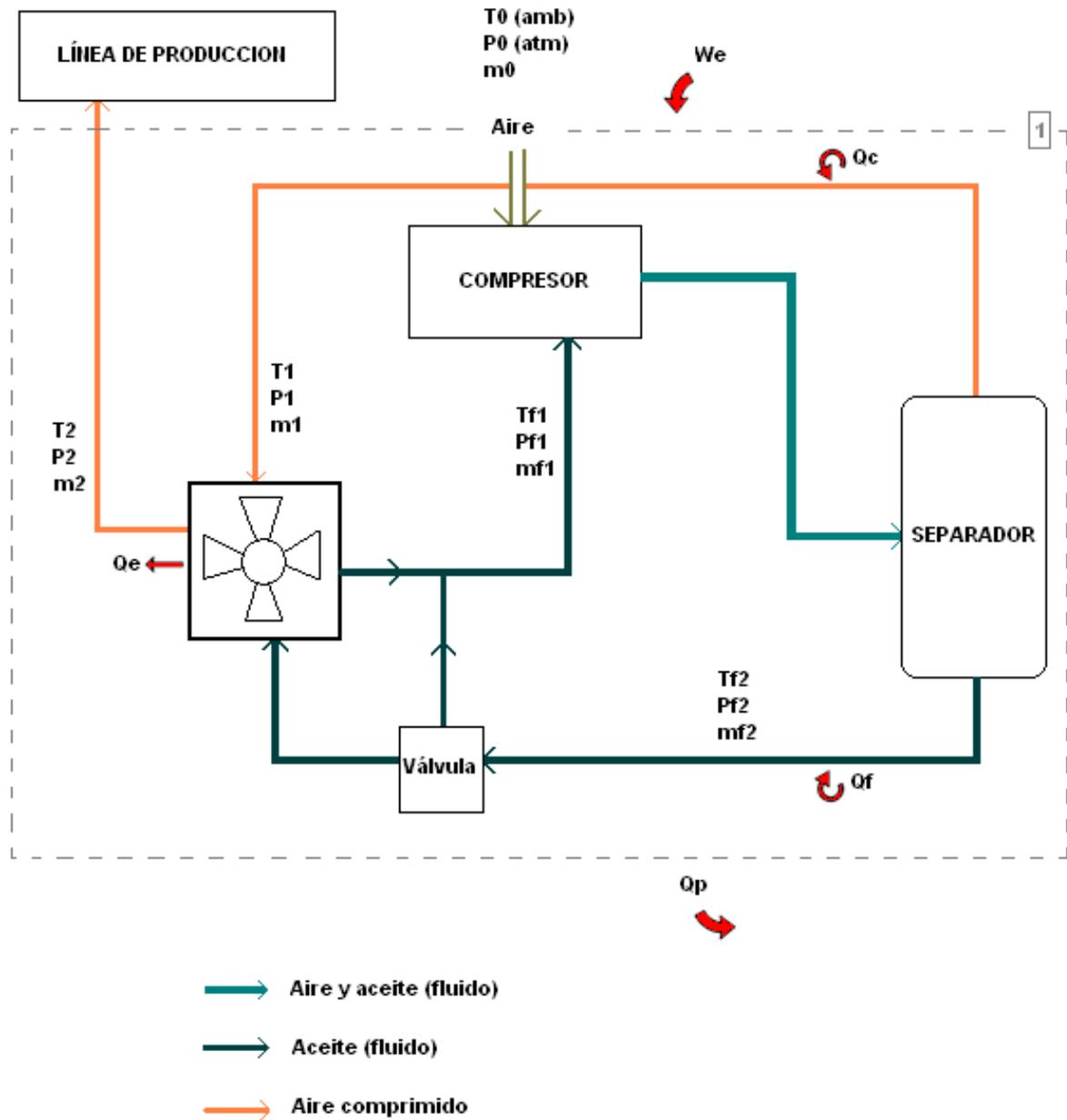
3.5 Procedimiento para la recolección, obtención, ordenamiento de datos y cálculo de los resultados

3.5.1 Análisis del sistema actual

Analizar cómo funciona actualmente el sistema, tanto de la caldera como del compresor.

3.5.1.1 Análisis del sistema de compresión

Figura 20. Sistema actual de compresión



Simbología correspondiente a la figura 20.

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	SÍMBOLO	SIGNIFICADO
\dot{W}_e	Trabajo que entra al compresor	P_1	Presión del aire comprimido al salir del separador
\dot{Q}_P	Calor total potencialmente recuperable	\dot{m}_2	Flujo de aire comprimido al salir del sistema de enfriamiento
Q_f	Calor recuperable del aceite de lubricación	T_2	Temperatura del aire al salir del sistema de enfriamiento
Q_C	Calor que permanece en el aire comprimido	p_2	Presión del aire al salir del sistema de enfriamiento
Q_e	Calor que se sale del sistema de enfriamiento	\dot{m}_{f1}	Flujo del aceite de lubricación al entrar a la unidad de compresión
\dot{m}_0	Flujo de entrada de aire al compresor	T_{f1}	Temperatura del aceite de lubricación al entrar a la unidad compresora
T_0	Temperatura del aire al entrar al compresor	p_{f1}	Presión del aceite de lubricación al entrar a la unidad compresora
P_0	Presión atmosférica	\dot{m}_{f2}	Flujo del aceite de lubricación al salir del separador
\dot{m}_1	Flujo de aire que sale del separador al sistema de enfriamiento	T_{f2}	Temperatura del aceite de lubricación al salir del separador
T_1	Temperatura del aire que sale del separador al sistema de enfriamiento	p_{f2}	Presión del aceite de lubricación al salir del separador

Fuente: Elaboración propia.

- Balance de energía para volumen de control 1.

Los balances de energía se hicieron con base en la figura 20, la cual describe el sistema de compresión de aire, muestra los flujos de aire y de aceite dentro del circuito.

El volumen de control 1 es todo aquello que está dentro de la línea punteada de la figura 20.

Energía entrada = Energía de salida

$$\dot{W}_e + \dot{m}_0 \hat{H}_0 = \dot{Q}_P + \dot{m}_2 \hat{H}_2 \quad \text{Ecuación 1.}$$

En donde:

\dot{W}_e = Trabajo que entra al compresor. (Potencia del compresor, en este caso 75HP).

\dot{m}_0 = Flujo de entrada de aire al compresor.

\hat{H}_0 = Entalpía del aire a la temperatura T_0 (temperatura del aire al entrar al compresor).

\dot{Q}_p = Calor potencialmente recuperable.

\dot{m}_2 = Flujo de salida de aire del compresor.

\hat{H}_2 = Entalpía del aire a la temperatura T_2 (temperatura del aire a la salida del compresor).

El calor transferido al aceite de lubricación debido a la compresión se calcula de la siguiente forma:

$$\dot{Q}_f = \dot{m}_f C_{p_{\text{aceite}}} (T_{f2} - T_{f1}) \quad \text{Ecuación 2.}$$

En donde:

\dot{Q}_f = Calor transferido al aceite de lubricación debido a la compresión.

\dot{m}_f = Flujo de aceite en la unidad de compresión.

$C_{p_{\text{aceite}}}$ = Capacidad calorífica del aceite.

T_{f1} = Temperatura del aceite antes de entrar al compresor.

T_{f2} = Temperatura del aceite al salir del separador.

- Calcular la eficiencia energética del sistema actual

La eficiencia energética mide cuanta energía de la que se introdujo al sistema es consumida. Por lo tanto, es la relación entre la energía utilizada por el sistema y la energía aplicada al sistema:

$$\eta = \frac{\text{Energía consumida por el sistema}}{\text{Energía aplicada al sistema}}$$

$$\eta = \frac{\text{Energía para comprimir el aire}}{\text{Potencia del compresor}}$$

$$\eta = \frac{m_2 H_2 - m_0 H_0}{W_e} \quad \text{Ecuación 3.}$$

- **Variables medidas**

Tabla XI. Variables medidas y forma de obtención de datos del sistema de compresión

Variable medida	Instrumento de medición/ Procedimiento de obtención de datos
Flujo de aire en el compresor	Medidor de aire
Temperatura ambiental	Termómetro
Temperatura del aire a la salida de la unidad de compresión	Termómetro integrado en el compresor
Temperatura del fluido al entrar al compresor	Termómetro

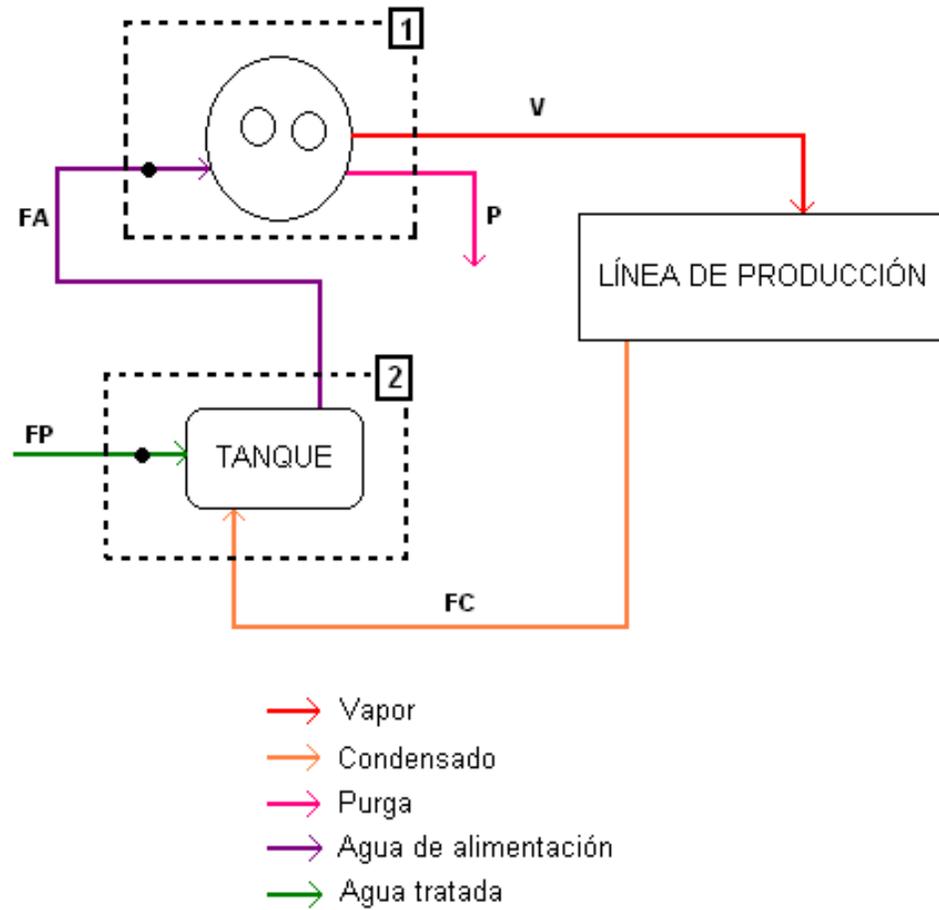
Flujo del fluido en el compresor	Especificación de diseño
Temperatura del fluido al salir del separador	Termómetro
Presión del separador	Manómetro del depósito del separador
Presión de aire en la línea	Manómetro de la línea

Tabla XII. Variables necesarias para el cálculo y obtención de datos del sistema de compresión

Variable	Obtención de datos
Potencia del compresor	Especificación del compresor
Eficiencia del compresor	Especificación del compresor
Capacidad calorífica del fluido (aceite de lubricación)	Ficha técnica del aceite
Capacidad calorífica del aire	Manual del Ingeniero Químico
Entalpías del aire en función de la temperatura	Manual del Ingeniero Químico

3.5.1.2 Análisis de la caldera y del sistema de suministro de vapor

Figura 21. Sistema de suministro de vapor



Simbología correspondiente a la figura 21

SÍMBOLOGÍA	SIGNIFICADO
FA	Flujo de agua de alimentación del tanque a la caldera
FP	Flujo de agua potable
FC	Flujo de retorno de condensados
V	Flujo de vapor
P	Purga de la caldera

- Hacer un balance de masa en el sistema de suministro de vapor para determinar qué cantidad de condensado se está mezclando con el agua nueva.

Balance de masa en volumen de control 2.

El volumen de control 2 muestra el tanque con las entradas de agua potable y retorno de condensados y la salida agua de alimentación hacia la caldera, tal y como lo muestra la figura 21.

$$F_P + F_C = F_A \quad \text{Ecuación 4.}$$

- Calcular cuánto calor se necesita para evaporar el agua.

Calor total = Calor sensible + Calor latente

Calor sensible: se refiere a cuanta energía se necesita para calentar el agua desde determinada temperatura T_1 hasta su punto de ebullición (T_2) a determinada presión. En este caso la presión sería la presión de la caldera.

$$\dot{Q}_S = \dot{m}C_p(T_2 - T_1) \quad \text{Ecuación 5.}$$

En donde:

\dot{Q}_S = Calor requerido para calentar el agua desde T_1 hasta T_2 .

\dot{m} = Masa o flujo másico que entra a la caldera.

C_p = Capacidad calorífica del agua.

T_1 = Temperatura de entrada del agua.

T_2 = Temperatura de ebullición del agua a la presión de la caldera.

Calor latente: se refiere al calor de vaporización. El calor necesario para evaporar cierta cantidad de agua.

$$\dot{Q}_L = \dot{m} \hat{H}_V \quad \text{Ecuación 6.}$$

En donde:

\dot{Q}_L = Calor requerido para evaporar cierta cantidad de agua en la caldera.

\dot{m} = Cantidad o flujo de agua que entra a la caldera.

\hat{H}_V = Entalpía de vaporización del agua a la presión de la caldera.

La entalpía de vaporización se calcula de la siguiente manera:

$$\hat{H}_V = \hat{H}_{V\text{sat}} - \hat{H}_{L\text{sat}} \quad \text{Ecuación 7.}$$

En donde:

\hat{H}_V = Entalpía de vaporización del agua.

$\hat{H}_{V\text{sat}}$ = Entalpía del vapor saturado a la presión de la caldera.

$\hat{H}_{L\text{sat}}$ = Entalpía del líquido saturado a la presión de la caldera.

Por lo tanto el calor para producir determinada cantidad de vapor se calcula sumando el calor latente y el calor sensible.

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_S + \dot{Q}_L \quad \text{Ecuación 8.}$$

- Calcular el costo de combustible para producir el vapor requerido.

Se calculan los galones de combustible necesarios para que le transfieran al agua la cantidad de calor requerida para evaporarla.

$$\text{Gal} = \frac{\dot{Q}_T}{\eta P_c} \quad \text{Ecuación 9.}$$

En donde:

Gal = Galones de combustible requeridos para transferirle al agua el calor necesario para evaporarla.

\dot{Q}_T = Calor necesario para evaporar el agua.

η = Eficiencia de la caldera.

P_c = Poder calorífico del combustible.

El costo de combustible para producir vapor se calcula multiplicando el precio por galón del combustible por la cantidad de galones de combustible utilizados.

$$\text{Costo de producción de vapor} = \text{Gal} * \frac{\text{Precio del combustible}}{1 \text{ galon de combustible}}$$

$$\text{\$ vapor} = \text{Gal} * \frac{\text{\$ comb.}}{1 \text{ galon}} \quad \text{Ecuación 10.}$$

- **Variables medidas**

Tabla XIII. Variables medidas y forma de obtención de datos del sistema de suministro de vapor

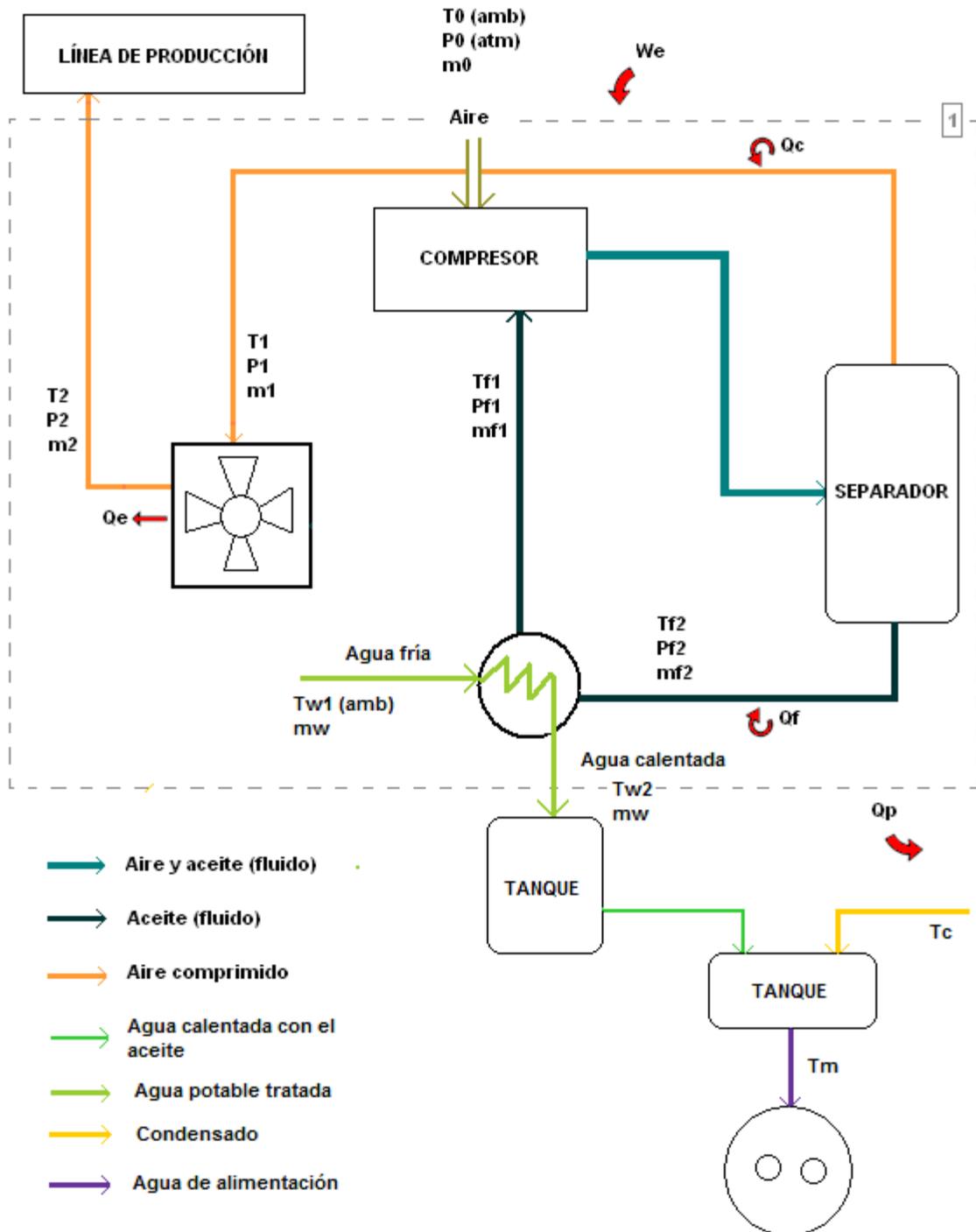
Variable medida	Instrumento de medición/ Obtención de datos
Presión de la caldera	Manómetro de la caldera
Flujo de agua de alimentación a la caldera	Contador de agua modelo 1815, tamaño 1 1/2", capacidad de flujo 0.7-87 gpm, 32-248 °F
Flujo de agua que entra al tanque de almacenamiento	Contador de agua modelo 1800, tamaño 3/4", capacidad de flujo 0.13-3.2gpm, 32-248 °F
Temperatura del condensado que entra al tanque de almacenamiento	Termómetro (Rango: 5-135 °C)
Temperatura del agua tratada que entra al tanque de almacenamiento	Termómetro (Rango: 5-135 °C)
Temperatura del agua que entra a la caldera	Termómetro (Rango: 5-135 °C)
Nivel de agua en el tanque	Medidor de nivel del tanque
Consumo real de combustible	Contador de combustible

Tabla XIV. Variables necesarias para el cálculo y obtención de datos del sistema de suministro de vapor.

Variable	Obtención de datos
Poder calorífico del combustible	Especificación de proveedor
Eficiencia de la caldera	Especificación de la caldera
Entalpías del vapor saturado y del líquido saturado	Tablas de vapor
Precio del combustible	Especificación del proveedor

3.5.2 Análisis del nuevo sistema

Figura 21. Sistema de suministro de vapor



Simbología correspondiente a la figura 22.

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	SÍMBOLO	SIGNIFICADO
\dot{W}_e	Trabajo que entra al compresor	P_1	Presión del aire comprimido al salir del separador
\dot{Q}_p	Calor total potencialmente recuperable	\dot{m}_2	Flujo de aire comprimido al salir del sistema de enfriamiento
Q_f	Calor recuperable del aceite de lubricación	T_2	Temperatura del aire al salir del sistema de enfriamiento
\dot{Q}_c	Calor que permanece en el aire comprimido	p_2	Presión del aire al salir del sistema de enfriamiento
\dot{Q}_e	Calor que se sale del sistema de enfriamiento	\dot{m}_{f1}	Flujo del aceite de lubricación al entrar a la unidad de compresión
\dot{m}_0	Flujo de entrada de aire al compresor	T_{f1}	Temperatura del aceite de lubricación al entrar a la unidad compresora
T_0	Temperatura del aire al entrar al compresor	p_{f1}	Presión del aceite de lubricación al entrar a la unidad compresora
P_0	Presión atmosférica	\dot{m}_{f2}	Flujo del aceite de lubricación al salir del separador
\dot{m}_1	Flujo de aire que sale del separador al sistema de enfriamiento	T_{f2}	Temperatura del aceite de lubricación al salir del separador
T_1	Temperatura del aire que sale del separador al sistema de enfriamiento	p_{f2}	Presión del aceite de lubricación al salir del separador
T_{w1}	Temperatura del agua que entra al intercambiador de calor (Agua fría)	\dot{m}_w	Flujo de agua dentro del intercambiador de calor de placas
T_{w2}	Temperatura del agua que sale del intercambiador de calor (Agua caliente)	\dot{m}_w	Flujo de agua dentro del intercambiador de calor de placas
T_m	Temperatura del agua que entra a la caldera (Mezcla de condensados con agua calentada por el aceite de lubricación)	T_c	Temperatura de los condensados

3.5.2.1 Descripción del nuevo sistema

El nuevo sistema consiste en integrar un intercambiador de calor en la salida del separador, en la parte inferior del mismo, por donde sale el aceite (Como se muestra en la figura 22). Por el intercambiador de calor se hará pasar agua a la temperatura ambiente y el aceite caliente, logrando así transferir el calor del aceite al agua.

3.5.2.2 Cálculo de las nuevas condiciones

- Calcular la temperatura a la cual el agua llegaría al hacerla pasar por el intercambiador de calor agua/aceite.

Las siguientes ecuaciones se obtuvieron basándose en el diagrama mostrado en la figura 22.

De la ecuación 2 se tiene el calor que el aceite ha ganado por efecto de la compresión. Si se designa \dot{Q}_i como la cantidad de calor que el aceite le transfiere al agua se tiene que \dot{Q}_i será igual a \dot{Q}_f si hay una transferencia del 100%.

Pero como en la vida real no se transfiere todo el calor, la cantidad de calor que el aceite cede en realidad es entonces $\dot{Q}_i = \eta \dot{Q}_f$, en donde η es la eficiencia del intercambiador de calor. Por definición se sabe que el calor cedido por el aceite será igual al calor ganado por el agua:

$$\dot{Q}_i = -\dot{Q}_w \quad \text{Ecuación 11.}$$

$$\dot{Q}_w = \dot{m}_w \text{Cp} (T_{w2} - T_{w1}) \quad \text{Ecuación 12.}$$

En donde:

\dot{Q}_w = Calor que se transfiere del aceite al agua.

\dot{m}_w = Flujo del agua que pasa por el intercambiador.

Cp = Capacidad calorífica del agua.

T_{w2} = Temperatura del agua al salir del intercambiador de calor.

T_{w1} = Temperatura del agua al entrar al intercambiador de calor.

La temperatura que alcanzará el agua al serle transferido el calor del aceite es T_{w2} , la cual se encuentra despejando de la ecuación 12:

$$T_{w2} = \frac{\dot{Q}_w}{\dot{m} Cp} + T_{w1} \quad \text{Ecuación 13.}$$

- Calcular la temperatura a la que llegaría el agua en el tanque de alimentación al mezclar el agua calentada por el aceite con el condensado (T_m).

Se tiene que el calor que cede el condensado es igual al calor que gana el agua:

$$\dot{Q}_{co} = -\dot{Q}_{WT} \quad \text{Ecuación 14.}$$

$$\dot{m}_{co} Cp (T_m - T_{co}) = \dot{m}_{wT} Cp (T_{w2} - T_m) \quad \text{Ecuación 15.}$$

Despejando T_m de la ecuación:

$$T_m = \frac{\dot{m}_{wT} T_{w2} + \dot{m}_{co} T_{co}}{\dot{m}_{co} + \dot{m}_{wT}} \quad \text{Ecuación 16.}$$

En donde:

\dot{m}_{co} = Flujo del condensado que entra al tanque de almacenamiento de agua.

Cp = Capacidad calorífica del agua.

T_m = Temperatura final de la mezcla.

T_{co} = Temperatura del condensado.

\dot{m}_{wT} = Flujo de agua que entra al tanque de almacenamiento.

T_{w2} = Temperatura del agua al entrar al tanque de almacenamiento.

- Cálculo del costo de combustible para la producción de vapor

Se realiza el balance de calor de la caldera como se hizo anteriormente, con la diferencia de que ahora la temperatura del agua al entrar a la caldera será T_m .

Calcular el calor total necesario para evaporar el agua:

$$\dot{Q}_S = \dot{m}C_p(T_2 - T_m) \quad \text{Ecuación 17.}$$

$$\dot{Q}_L = \dot{m}\hat{H}_v \quad \text{Ecuación 18.}$$

$$\hat{H}_v = \hat{H}_{v\text{ sat}} - \hat{H}_{L\text{ sat}} \quad \text{Ecuación 19.}$$

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_S + \dot{Q}_L \quad \text{Ecuación 20.}$$

Calcular los galones de combustible necesarios para que le transfieran al agua la cantidad de calor requerida para evaporarla.

$$\text{Gal} = \frac{\dot{Q}_T}{\eta P_c} \quad \text{Ecuación 21.}$$

El costo de combustible para producir vapor se calcula multiplicando el precio por galón del combustible por la cantidad de galones de combustible utilizados.

$$\text{Costo de producción de vapor} = \text{Gal} * \frac{\text{Precio del combustible}}{1 \text{ galon de combustible}}$$

$$\text{\$ vapor} = \text{Gal} * \frac{\text{\$ comb.}}{1 \text{ galon}} \quad \text{Ecuación 22.}$$

- Calcular la eficiencia energética del nuevo sistema

La eficiencia energética mide cuanta energía de la que se introdujo al sistema es consumida. Por lo tanto es la relación entre la energía utilizada por el sistema y la energía aplicada al sistema:

$$\eta = \frac{\text{Energía utilizada}}{\text{Energía aplicada al sistema}}$$

$$\eta = \frac{(m_2 H_2 - m_0 H_0) + Q_f}{W_e} \quad \text{Ecuación 23.}$$

- **Variables medidas**

Tabla XV. Variables medidas para la obtención de los datos del sistema nuevo

Variable	Obtención de datos
Flujo másico del agua en el intercambiador de calor	Especificación de diseño del nuevo sistema
Temperatura del agua al entrar al intercambiador	Termómetro
Temperatura del agua a la salida del intercambiador	Calculo obtenido de la Ecuación 13.
Flujo del condensado que entra al tanque de almacenamiento	Balance de masa
Flujo de agua que entra al tanque de almacenamiento	Contador de agua modelo 1800, tamaño $\frac{3}{4}$ ", capacidad de flujo 0.13-3.2gpm, 32-248°F

Tabla XVI. Variables necesarias para el cálculo y obtención de datos del sistema nuevo

Variable	Obtención de datos
Poder calorífico del combustible	Libros de texto, especificación de proveedor
Eficiencia de la caldera	Especificación de la caldera
Entalpías del vapor saturado y del líquido saturado	Tablas de vapor
Precio del combustible	Especificación del proveedor

3.5.3 Análisis financiero

- Calcular el total de la inversión (costo de equipo, tuberías, instalación, etc.).
- Calcular el ahorro anual que se obtiene al instalar el sistema de recuperación de calor
- Con la inversión inicial y el ahorro anual se calculará el Valor Presente Neto, la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el tiempo de recuperación de la inversión, para identificar si el proyecto de recuperación de calor es rentable o no.

3.6 Tabulación y ordenamiento de la información

Para la recolección de datos se utilizará la siguiente tabla de datos.

Tabla XVII. Variables a medir semanalmente en el sistema de suministro de vapor

FECHA	HORA	CONTADOR TANQUE	CONTADOR CALDERA	GASOLINA			TEMPERATURA (°C)	PRESIÓN (psi)
				INGRESO	RETORNO	GASTADO		

Tabla XVIII. Variables a medir en el compresor

Presión del Separador	Presión de aire en la línea	Temperatura de descarga	Temperatura del aceite al entrar al compresor	Temperatura del aceite al salir del compresor	Caudal de aire

4 RESULTADOS

Tabla XIX. Calor recuperable del compresor

Calor total recuperable del compresor de tornillo rotatorio de 75 HP	41.4457 KW
Calor recuperable del aceite de lubricación del compresor de tornillo rotatorio de 75 HP	27.8271 KW

Fuente: Apéndice, Muestra de cálculo.

Tabla XX. Eficiencia energética del compresor

Eficiencia energética del compresor sin recuperación de calor	27%
Eficiencia energética del compresor con recuperación de calor	74,17%

Fuente: Apéndice, Muestra de cálculo.

Tabla XXI. Costo de combustible para la producción de vapor

Costo de combustible para la producción de vapor sin recuperación de calor	Q865,121.70 al año
Costo de combustible para la producción de vapor con recuperación de calor	Q804,338.30 al año
Ahorro en combustible	Q60,783.42 al año

Fuente: Apéndice, Muestra de cálculo.

Tabla XXII. Resultados del análisis financiero

VPN	Q167,240.56
TIR	57%
B/C	4.7971
Tiempo de recuperación de la inversión	13 meses

Fuente: Apéndice, Muestra de cálculo.

Caracterización del sistema de recuperación de calor

Especificaciones del sistema de recuperación de calor

Se utilizará un intercambiador de calor de lámina soldada como recuperador térmico. Se empleará agua como medio de transferencia térmica. El agua no debe usarse para consumo humano ya que si se presenta una fuga el aceite puede contaminar el agua refrigerante. El intercambiador de calor de placas soldado se fabrica con un acero especial resistente a los ácidos. Cada dos placas se incorpora una girada a 180. De esta manera, resulta que habrá un gran número de puntos de contacto entre las placas. Por lo tanto, esta construcción del intercambiador de calor es muy robusta y resistente a una alta presión de trabajo. Casi todo el material empleado participa en el intercambio de calor. La perfilación de las placas produce altas turbulencias de flujo en los canales, garantizando de esta manera una buena transmisión de calor.

Cantidad de aceite refrigerante

Se deberá adicionar un volumen de aceite de 0.8 galones al instalar el sistema de recuperación de calor.

Especificaciones del intercambiador de calor

- Modelo del intercambiador: PTG 102-55
- Área de intercambio de calor: 3.65 m²
- Número de placas: 60
- Peso en vacío por máquina: 17 kg
- Soldadura: cobre
- Bastidor: acero

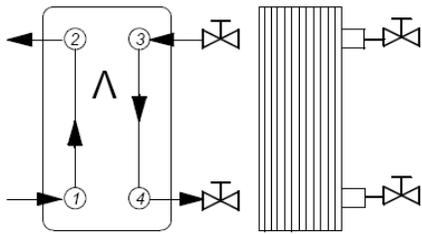
Condiciones de servicio máximas admitidas

- Presión de servicio máxima admitida: 232 psi (16 bar)
- Temperatura de servicio máxima admitida: 120 °C Aceite/ 100 °C Agua
- Caída de presión por el lado del agua: < 1.45 psi (0.1 bar)
- Pérdida de presión por el lado de aceite < 8.70 psi (0.6 bar)

Tabla XXIII. Especificaciones de la calidad del agua a utilizar en el intercambio de calor

Nivel de pH	7.5 a 9.0
Dureza [° dH]	4.0–8.5
Cloro (Cl)* [mg/l]	< 150
Gas libre de cloro (Cl ₂) [mg/l]	< 1
Sulfato (SO ₃) [mg/l]	< 1
Hierro disuelto (Fe) [mg/l]	< 0.2
Carbonato de Hidrogeno (HCO ₃) [mg/l]	70–300
Sulfato (SO ₄) [mg/l]	< 70
HCO ₃ / SO ₄	> 1
Conductividad eléctrica [μS/cm]	10–500
Amoniaco (NH ₃) [mg/l]	< 2
Magnesio disuelto (Mn) [mg/l]	< 0.1
Aluminio disuelto (Al) [mg/l]	< 0.2
Nitrato (NO ₃), disuelto [mg/l]	< 100
Sulfato de hidrógeno (SO ₂) [mg/l]	< 0.05
Dióxido libre de carbón agresivo (CO ₂) [mg/l]	< 5
Glicol [%]	< 50
Sólidos (tamaño de partículas) [mm]	< 0.1
Algas	no permitido

Fuente: Manual de servicio Compresor de Tornillo CSD 75, Kaeser Compresores.



- | | | | |
|---|----------------------------------|---|----------------------------|
| 1 | Agente caliente (aceite) ENTRADA | 3 | Agente frío (agua) ENTRADA |
| 2 | Agente caliente (aceite) SALIDA | 4 | Agente frío (agua) SALIDA |

Figura 23.
Localización de los flujos de agua y aceite en el intercambiador de placas
Fuente: Instrucciones de servicio. Intercambiador de calor de placas. Modelo Kaeser PTG interno

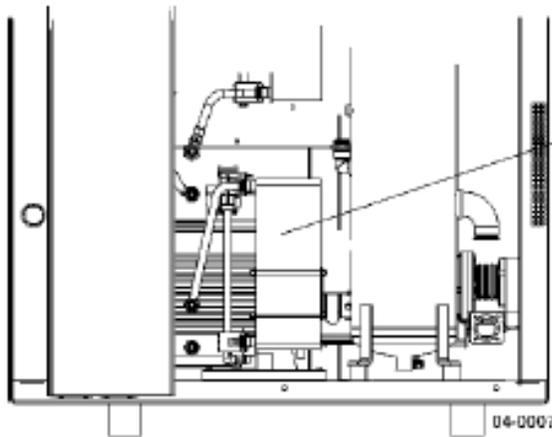


Figura 24.
Recuperador de calor interno integrado en el compresor
Fuente: Instrucciones de servicio. Intercambiador de calor de placas. Modelo Kaeser PTG interno

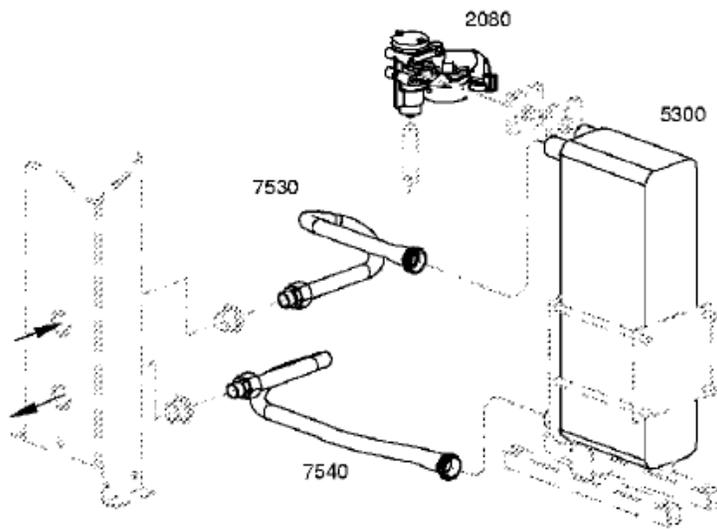


Figura 25.
5300: Intercambiador de calor interno; 2080: Válvula termostática; 7530: Entrada de agua; 7540: Salida de agua
Fuente: Instrucciones de servicio. Intercambiador de calor de placas. Modelo Kaeser PTG interno

5 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En la compresión de aire siempre se obtiene un aumento en la temperatura y esto ocasiona una expansión del mismo. Al comprimir grandes cantidades de aire, a nivel industrial, esa situación no es deseable porque el rendimiento del compresor disminuye, teniendo que consumir mayor energía para que opere. Por lo tanto se debe enfriar el aire comprimido, y al hacerlo se pierde hacia el ambiente grandes cantidades de energía en forma de calor.

El aceite de lubricación al estar en contacto directo con el aire comprimido caliente absorbe una gran cantidad de calor. Pero para que el compresor funcione adecuadamente se debe enfriar también el aceite. Para que esto ocurra el compresor tiene un sistema de enfriamiento para el aire y para el aceite, el compresor analizado tiene un sistema de enfriamiento por aire. En el nuevo diseño el aceite se enfriará con agua tratada que entrará a la caldera.

El calor total recuperable es 41.44 KW, este calor incluye el calor removido del aire y del aceite, el calor irradiado por el motor, las pérdidas de calor por radiación del compresor y el calor que permanece en el aire comprimido. El calor que se podría recuperar del aceite para calentar agua es de 27.83 KW que corresponde al 67% del calor total recuperable. Este calor es suficiente para llevar el agua tratada de una temperatura de aproximadamente 28 °C hasta 70 °C con un flujo másico de agua de 0.14 kg/s.

El calor se transfiere del aceite de lubricación caliente hacia el agua tratada por conducción a través de las placas del intercambiador de calor y por convección en el seno de cada fluido.

Las placas del intercambiador de calor están fabricadas de acero cuyo valor de conductividad térmica es de 52.5 W/m K. Es debido a este valor, a la gran área de contacto entre los fluidos y el diseño que poseen las placas del intercambiador, el cual genera turbulencia en los fluidos, que se obtiene una gran transferencia de calor.

La eficiencia energética mide cuánta de la energía suministrada está siendo utilizada por el equipo. La eficiencia energética del compresor de tornillo analizado es de 27%, esto quiere decir que si se estuvieran suministrando 100 KW de energía solo 27 KW se estarían utilizando para llevar a cabo el trabajo requerido. Con el sistema de recuperación de calor la eficiencia energética del compresor será de 74.17%. Este aumento se deberá a que parte de la energía en forma de calor que se perdía hacia los alrededores será ahora utilizada para calentar el agua de la caldera.

El costo de producir el vapor requerido por la planta es de Q865, 121.70 al año, para evaporar 83,600 galones de agua al mes (5225 gal de agua evaporados al día, trabajando 16 días al mes) si no se hace un precalentamiento del agua de alimentación de la caldera, entrando el agua a 28 °C. Si el agua entra a 70 °C aproximadamente el costo de la producción de vapor es de Q804,338.30 al año, lo cual conduce a un ahorro de Q60,783.42 al año, que equivale a Q 0.0606 ahorrados por galón de agua evaporado, bajo las condiciones en las que se midieron los datos. Este ahorro se logra porque ya no se utilizará combustible para calentar el agua desde 28 °C hasta 70 °C, sino que se utilizará el calor del aceite de lubricación del compresor. El punto de ebullición del agua a 100 Psi de presión es de 164 °C, por lo tanto mientras más cercano a la temperatura de ebullición esté el agua, se necesitará menor cantidad de calor para evaporarla y por ende menor cantidad de combustible.

Del análisis financiero se obtuvo un valor presente neto de Q167,240.41 para un período de 10 años, con una tasa de interés de 7.88%. Esta cantidad indica que en 10 años el proyecto habrá generado esa cantidad de dinero. Este valor es una cantidad grande y positiva por lo que según este parámetro el proyecto es rentable.

El valor de la tasa Interna de retorno obtenido es de 57% lo cual es mayor al valor de 50% de utilidad propuesto, por lo que indica que el proyecto es muy rentable ya que al obtener el 57% de utilidad no se tienen ni pérdidas ni ganancias.

El valor de la relación beneficio/costo calculado es de 4.7971. Para que un proyecto sea rentable el valor de la relación B/C debe ser mayor que 1, ya que este sería el punto de equilibrio en donde no se obtendrá ni pérdidas ni ganancias. Es decir por cada quetzal invertido ganaremos otro. El 4.7971 indica que por cada quetzal invertido se ganarán aproximadamente otros 5. Esto es válido para el proyecto presentado ya que la inversión se hará únicamente durante la instalación del nuevo sistema.

El tiempo de recuperación de la inversión calculado es de 13 meses tanto para el cálculo simple como para el compuesto que toma en cuenta la tasa de interés. Esto indica que en los primeros 13 meses a partir del día en que se instale el sistema de recuperación de calor el ahorro generado cubrirá todos los gastos realizados para la instalación. A partir del mes 14 el ahorro obtenido al consumir menor cantidad de combustible se utilizará para pagar el mantenimiento y el resto será la utilidad obtenida.

CONCLUSIONES

1. Con un valor presente neto de Q167, 240.56 para un período de 10 años, una TIR de 57% y una relación entre beneficio/costo de 4.7971 se concluye que la implementación de un sistema de recuperación de calor en un compresor de tornillo de 75 HP es rentable.
2. El sistema de recuperación de calor se clasifica como rentable y autosostenible al obtener un tiempo de recuperación de la inversión de 13 meses.
3. Con el sistema de recuperación de calor se obtiene un aumento en la eficiencia energética del compresor del 47.4% siempre que la caldera esté operando.
4. Con el sistema de recuperación de calor se logra una disminución en el consumo de combustible y en los costos de producción de vapor siempre que haya producción de pastas alimenticias.
5. El intercambiador de calor de placas soldadas resulta muy conveniente a utilizar como sistema de recuperación de calor, debido a que se logra una gran transferencia de calor en un espacio pequeño y limitado como es el espacio disponible del compresor de tornillo.

6. Según el balance de energía el calor del aceite es suficiente para elevar la temperatura del agua en aproximadamente 40 °C.
7. El ahorro de combustible depende directamente de la producción de pastas alimenticias. A mayor producción se obtiene un mayor ahorro.

RECOMENDACIONES

1. Hacer un precalentamiento del agua de alimentación de la caldera para reducir el consumo de combustible y el costo del mismo.
2. Instalar el sistema de recuperación de calor en el compresor de tornillo, ya que se obtendrá un gran beneficio económico para la empresa.
3. Medir el consumo de combustible después de la instalación del sistema de recuperación de calor para llevar un historial que permita detectar las desviaciones que el sistema podría tener.
4. Hacer una correlación entre el consumo de combustible y la producción de pasta, y entre la producción de pasta y el ahorro obtenido para adquirir el ahorro en función de la producción.
5. Considerar la posibilidad de recuperar el calor del aire que se utiliza para el enfriamiento del aire comprimido.
6. Hacer un estudio para determinar cuáles son los beneficios ambientales que se obtienen al reducir el consumo de combustible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Yunus Cengel. **Termodinámica**. 5ª ed. México: McGraw Hill, 2004 pp.164-200.
2. Yunus Cengel. **Transferencia de Calor**. 2ª ed. México: McGraw Hill, 2004 pp. 11-35, 419-452, 667-705.
3. Robert Perry. **Manual del Ingeniero Químico**. 7ª ed. Estados Unidos: McGraw Hill, 1997 pp. 5-9 – 5-29, 11-5 – 11-14, 11-67 – 11-71.

BIBLIOGRAFÍA

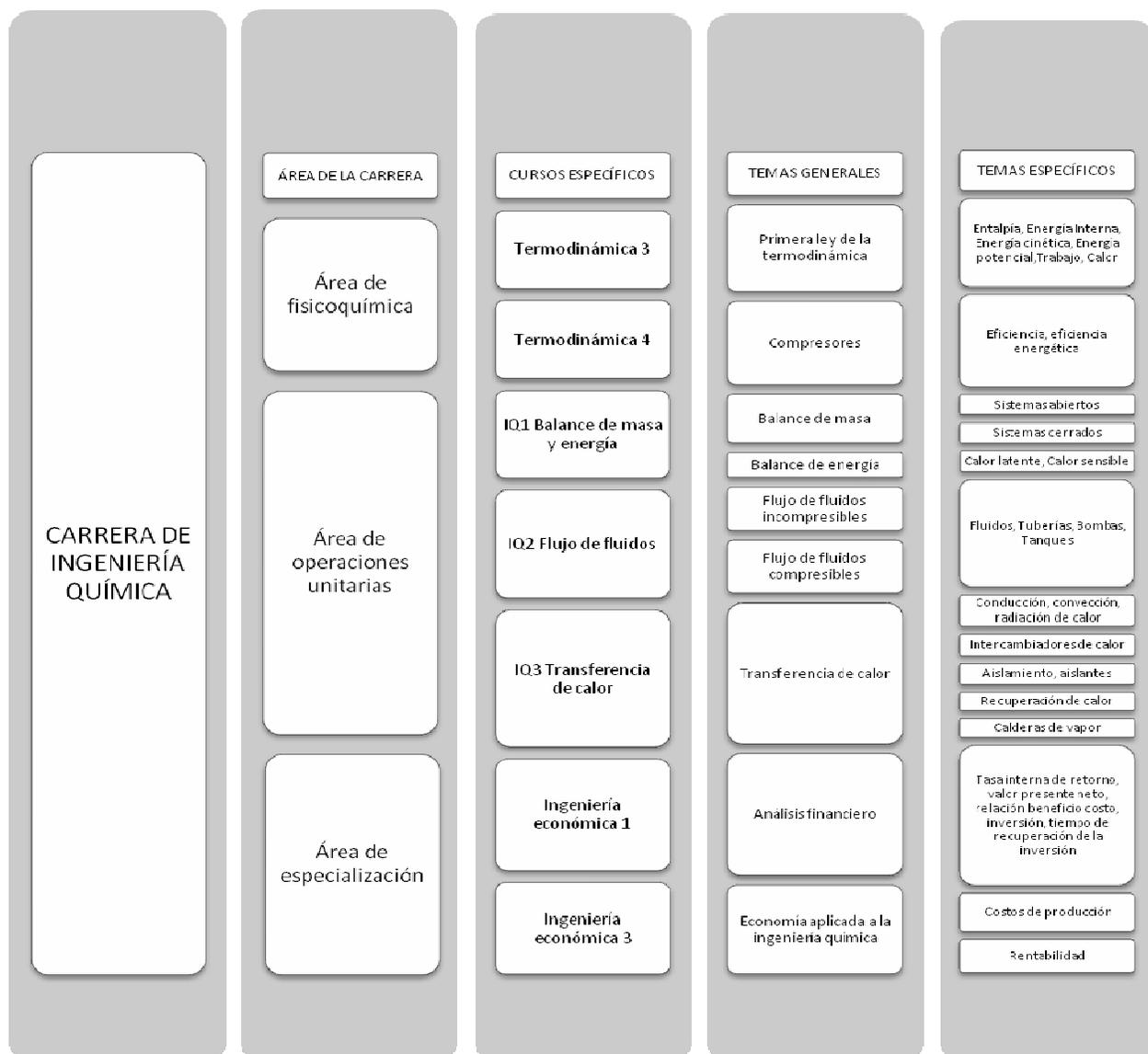
1. Cengel, Yunus. **Termodinámica**. Quinta edición. México: McGraw Hill, 2004. 988pp.
2. Cengel, Yunus. **Transferencia de Calor**. Segunda edición. México: McGraw Hill, 2004. 786pp.
3. Felder, Richard y Ronald Rousseau. **Principios elementales de los procesos químicos**. Segunda edición. Estados Unidos: Addison-Wesley Iberoamericana, 1991. 729 pp.
4. Holman, J.P. **Transferencia de calor**. Segunda edición en español. México: CECSA, 1996. 621pp.
5. Kay, J. **Introducción al estudio de la mecánica de fluidos y transferencia de calor, con aplicaciones a los procesos mecánicos y de la ingeniería química**. Segunda edición. España: Marcombo, 1964.
6. Kays, W.M. y A.L. London. **Compact Heat Exchangers**. Segunda edición en inglés. Estados Unidos: Mc Graw- Hill, 1964.
7. Kern, Donald. **Procesos de transferencia de calor**. Onceava edición. México: Compañía Editorial, 1977. 980pp.
8. Levenspiel, O. **Flujo de fluidos e intercambio de calor**. Tercera edición. España: Reverté, 1996.
9. Mao, James. **Análisis Financiero**. México: Centro Regional de Ayuda Técnica, 1974. 558pp.

10. McCabe, W.L. y J.P. Smith. **Operaciones Básicas de Ingeniería Química**. Cuarta edición. México: McGraw-Hill, 1985. 1112 pp.
11. Perry, Robert. **Manual del Ingeniero Químico**. Séptima edición. Estados Unidos: McGraw Hill, 1997.
12. Rodriguez, G. **Operación de calderas industriales**. Colombia: Reus, 2000.
13. Shield, C. **Calderas, tipos, características y funciones**. España: Continental S.A, 1976.
14. Smith, J y H. Van Ness, M. Abbot. **Introducción a la termodinámica en ingeniería química**. Séptima Edición. México: McGraw-Hill, 2007. 816pp.
15. Soto, J. **Fundamentos de ahorro de energía**. México: Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán.
16. Viscione, Jerry A. **Análisis Financiero: Principios y métodos**. México: Limusa, 1979. 320pp.

ANEXOS

ANEXO 1. TABLA DE REQUISITOS ACADÉMICOS

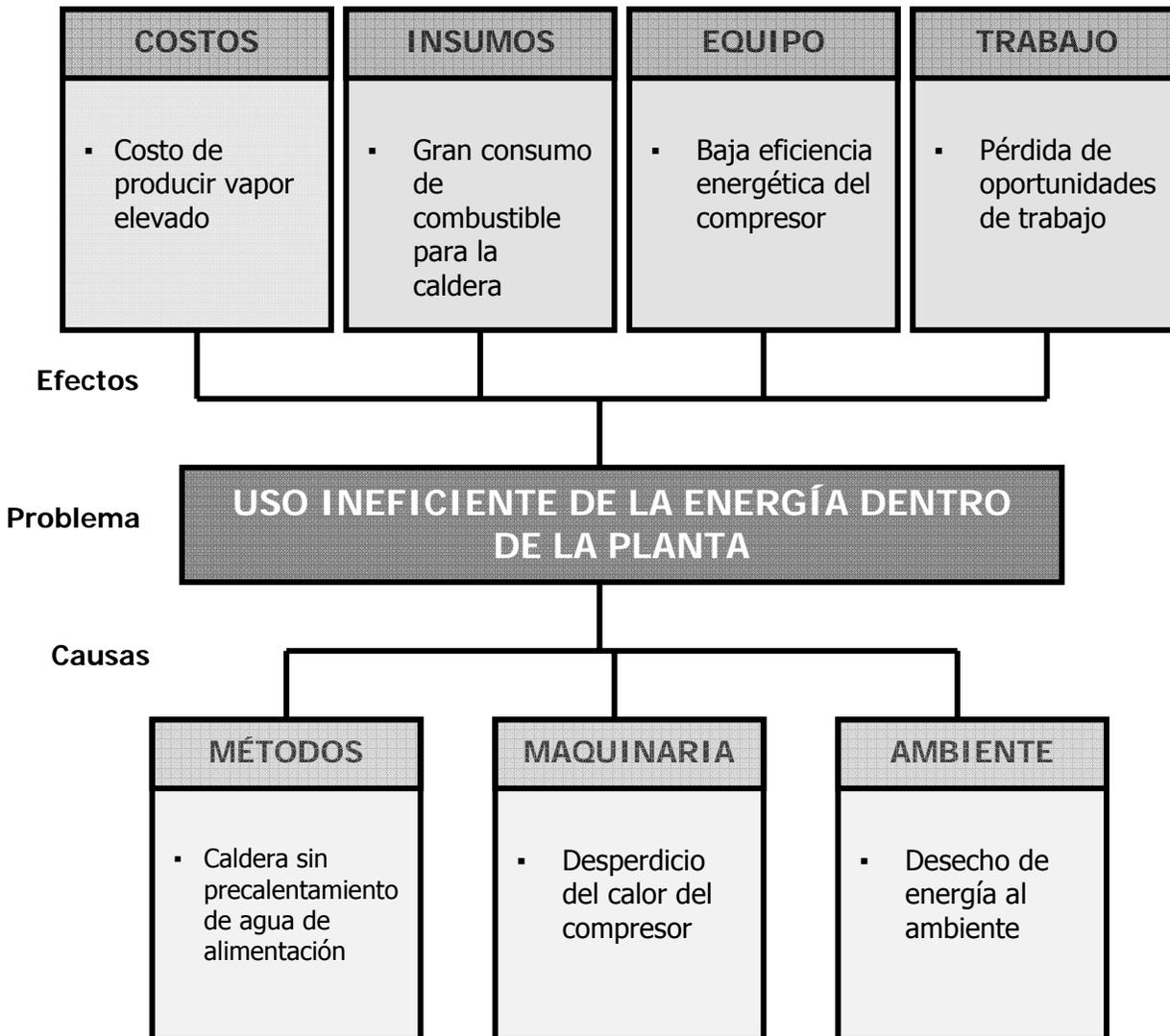
Tabla XXIV



* Los cursos mencionados corresponden al pensum de ingeniería química vigente en el período 2005 – 2008.

ANEXO 2. ÁRBOL DE PROBLEMAS

Figura 26. Árbol de problemas

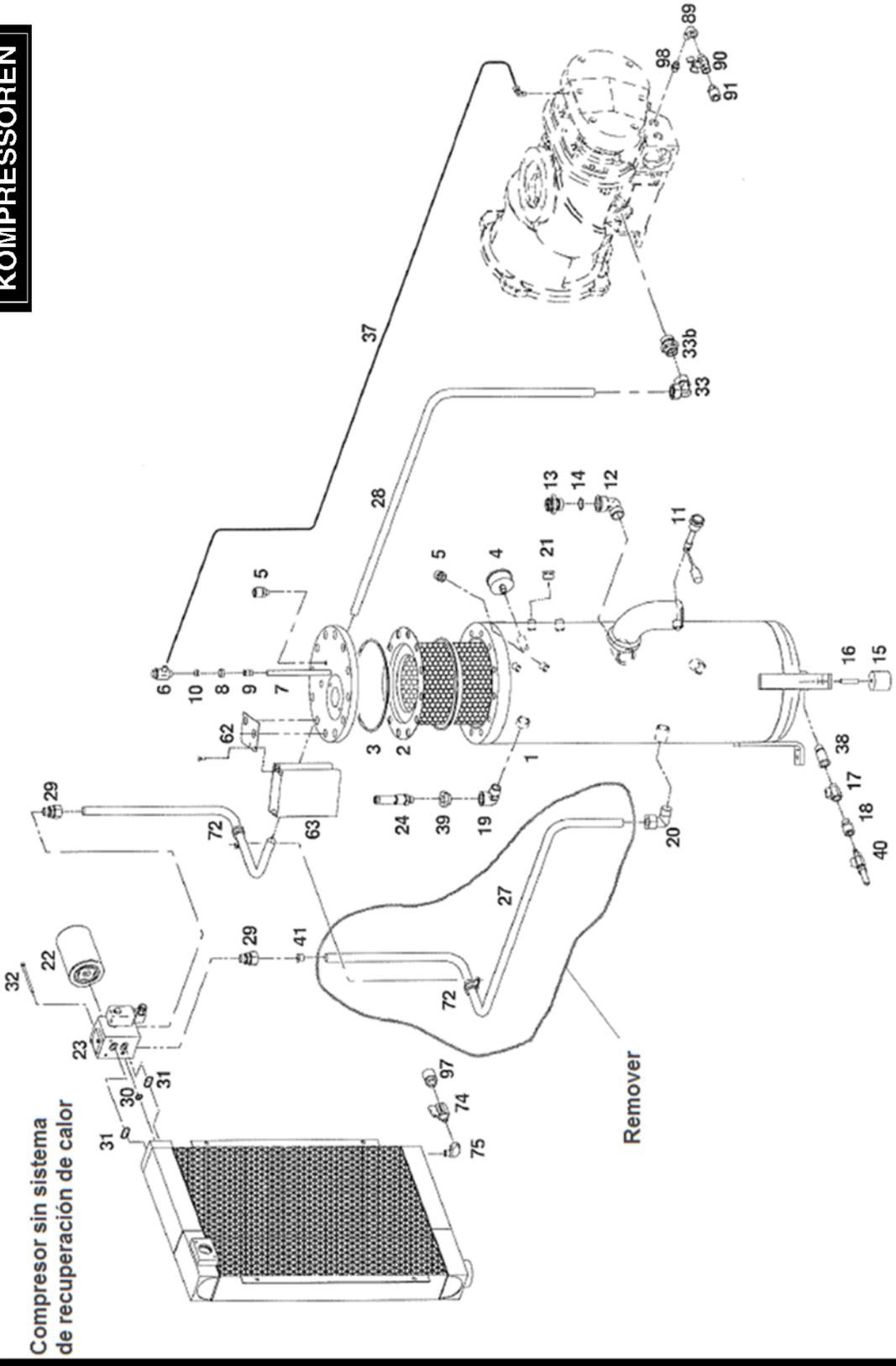


ANEXO 3. DIAGRAMAS PARA LA INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CALOR

Figura 27. Diagrama de tuberías a remover e instalar en el sistema sin recuperación de calor y con el sistema de recuperación integrado

Los diagramas presentados pertenecen a Kaeser Compresores y se muestran únicamente con fines ilustrativos y educativos. Se prohíbe el uso de los mismos para fines no conocidos.

KAESER KOMPRESSOREN



KAESER KOMPRESSOREN

Compresor con sistema de
recuperación integrado

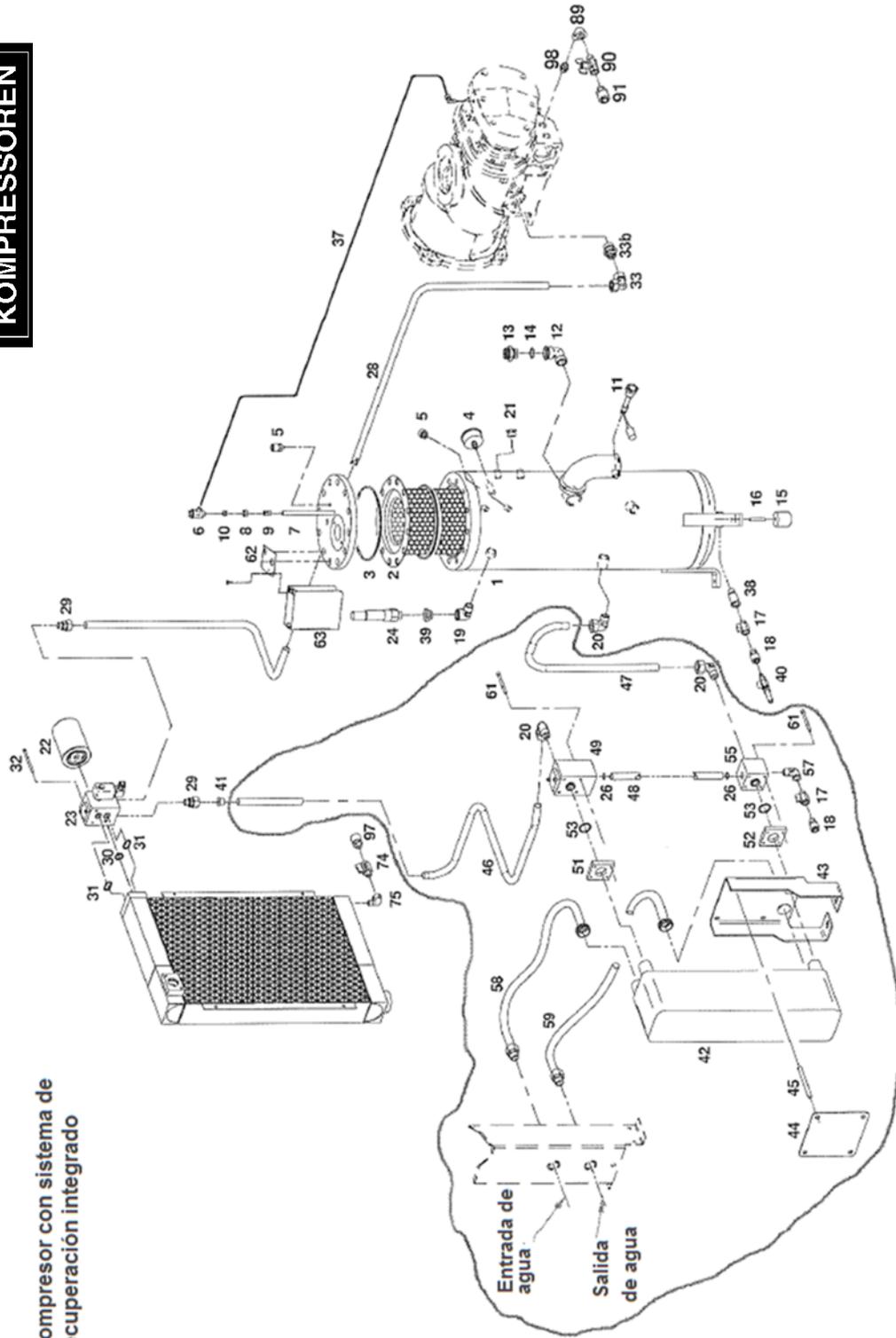
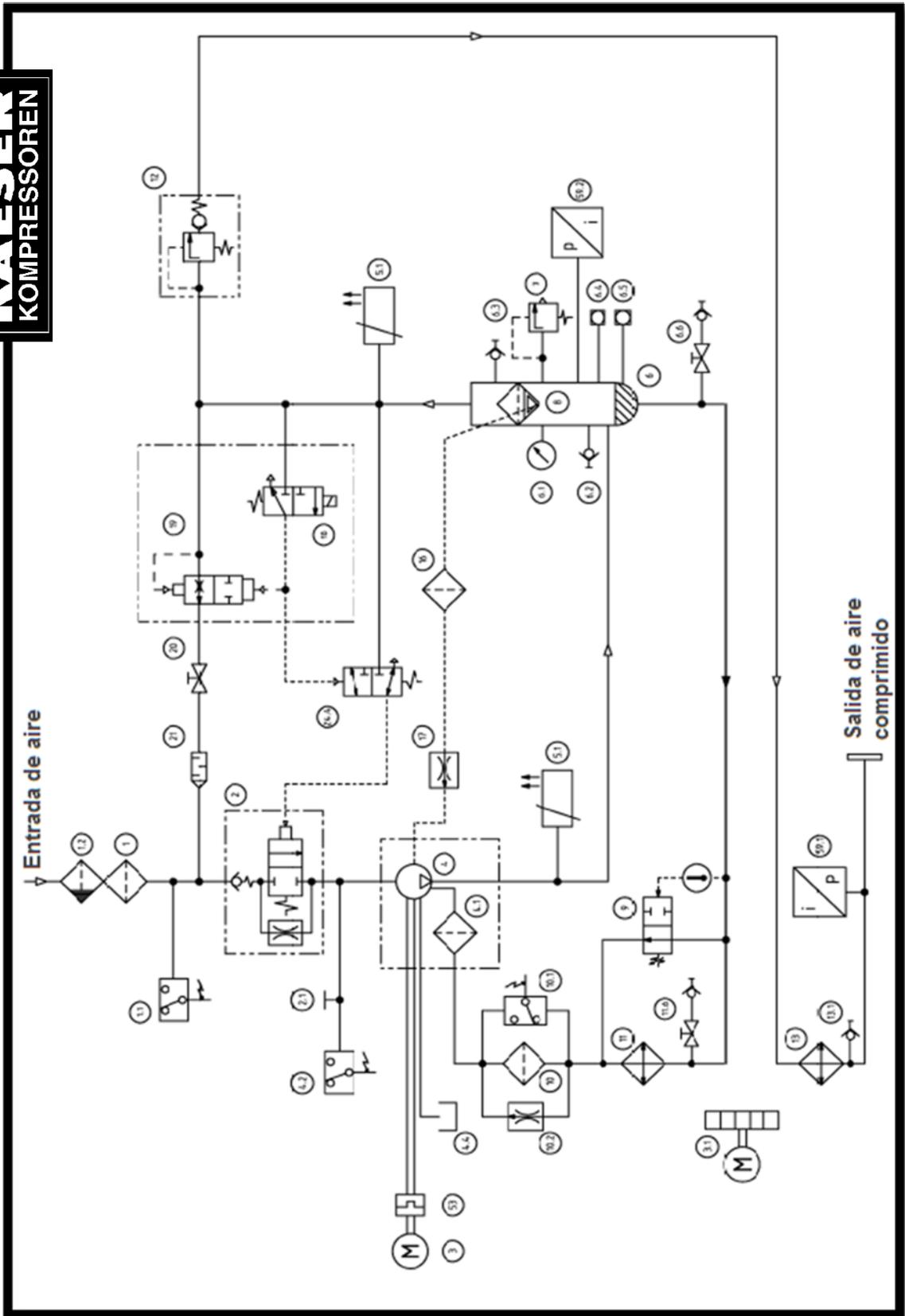


Figura 28. Diagrama de tuberías e instrumentos del sistema sin recuperación de calor y con el sistema de recuperación integrado.

Los diagramas presentados pertenecen a Kaeser Compresores y se muestran únicamente con fines ilustrativos y educativos. Se prohíbe el uso de los mismos para fines no conocidos.

KAESER KOMPRESSOREN



KAESER KOMPRESSOREN

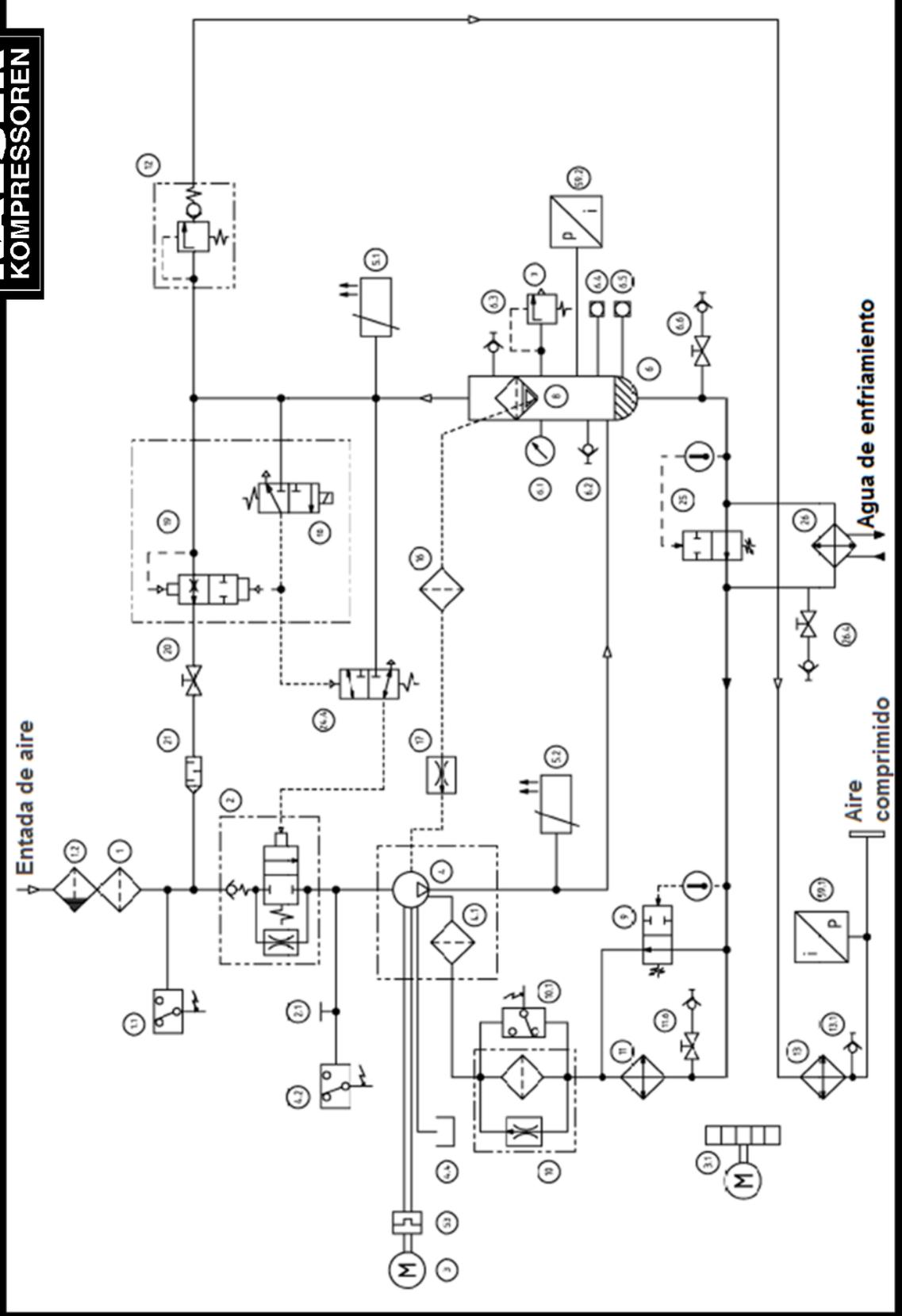
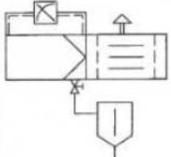
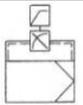
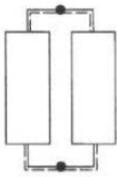
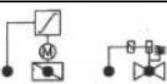


Tabla XXV. Simbología para los diagramas de tuberías e instrumentos

1	Filtro de aire	9	Controlador de la temperatura de aceite
1.1	Interruptor de vacío – Filtro de aire	10	Filtro de aceite
1.2	Colector de polvo	10.1	Interruptor de apagado presión diferencial – Filtro de aceite
2	Válvula de admisión	11	Enfriador de aceite
2.1	Llenador de aceite	11.6	Interruptor de apagado
3	Motor	12	Válvula de cheque de presión mínima
3.1	Motor del ventilador	13	Enfriador de aire
4	Unidad compresora	13.1	Acoplamiento de manguera
4.1	Filtro	16	Trampa de suciedad
4.2	Interruptor de presión – Dirección inversa de rotación	17	Boquilla
4.4	Tanque colector de aceite	18	Válvula de control
5.1	PTC Sensor	19	Válvula de venteo
5.2	PT100 Sensor	20	Interruptor de apagado – Línea de venteo
6	Tanque separador de aceite	21	Silenciador
6.1	Manómetro	24.4	3/2-Válvula de control direccional (amplifica el control de volumen para la válvula de admisión)
6.2	Acoplamiento de manguera (aceite)	25	Termostato de temperatura del aceite para el sistema de recuperación de calor
6.3	Acoplamiento manguera (aire)	26	Sistema de recuperación de calor
6.4	Ventana de aceite: nivel máximo de aceite	26.4	Interruptor de apagado
6.5	Ventana de aceite: nivel mínimo de aceite	53	Acoplamiento
6.6	Válvula de apagado	59.1	Transductor de presión – Presión principal del aire
7	Válvula de presión de alivio	59.2	Transductor de presión – Presión interna
8	Cartucho del separador de aceite		

Tabla XXVI. Simbología para los diagramas de tuberías e instrumentos

Símbolo	Significado
	Secador refrigerativo
	Drenaje de condensados
	Compresor de pistón
	Compensador axial
	Válvula de mariposa
	Separador de agua y aceite
	Intercambiador de calor
	Medidor de flujo
	Línea eléctrica
	Compresor de tornillo
	Manguera
	Separador de ciclón
	Válvula de globo
	Drenaje de condensado
	Secador de membranas
	Microfiltro eléctrico

	Microfiltro
	Filtro estéril
	Filtro de carbón activado
	Secador desecante
	Tanque de aire
	Válvula de seguridad
	Brida de pruebas
	Interruptor de presión
	Manómetro
	Sistema principal de cargado de aire
	Controlador

ANEXO 4. HOJA DE ESPECIFICACIONES DEL COMPRESOR



HOJA DE ESPECIFICACIONES DEL COMPRESOR

Compresor de tornillo rotatorio

DATOS DEL MODELO - PARA AIRE COMPRIMIDO			
1	Fabricante: Kaeser Compressors, Inc.	Fecha: 1/31/2007	
2	Número de modelo: CSD 75 - 125 psig / 460V/3ph/60Hz	Número de etapas: 1	
	<input checked="" type="checkbox"/> Enfriado por aire <input type="checkbox"/> Enfriado por agua <input checked="" type="checkbox"/> Inyección de aceite <input type="checkbox"/> Sin inyección de aceite	VALOR	UNIDAD
3	Capacidad a la presión de operación a carga completa ^{a,f}	345	acfm ^{a,f}
4	Presión de operación a carga completa ^b	115	psig ^b
5	Presión de operación máxima a flujo completo ^c	125	psig ^c
6	Potencia nominal del motor	75	hp
7	Eficiencia nominal del motor	93.0	percent
8	Potencia nominal del motor del ventilador (si aplica)	1.50	hp
9	Eficiencia nominal del motor del ventilador	75	percent
10	Potencia tota de entrada a vacío ^e	16.2	kW ^e
11	Potencia total de entrada a la presión de ^d operación a carga completa	65.00	kW ^d
12	Energía específica a plena capacidad y a la ^e presión de operación a carga completa	18.84	kW/100 cfm ^e

NOTES:

- Medido en el punto terminal de descarga del compresor de acuerdo con la CAGI/PNEURO P N2CPTC2 Código de prueba (Anexo C a ISO 1217); acfm es actualmente pies cúbicos por minuto en las condiciones de entrada.
- La presión de operación a la cual la Capacidad (item 3) y el Consumo Eléctrico (item 11) fueron medidos para esta hoja de datos
- Presión máxima obtenida a pleno flujo, usualmente el control de ajuste de la presión de descarga para carga/descarga o la presión máxima obtenida antes de que comience el control de capacidad. Puede requerir potencia adicional.
- Total de potencia a otros puntos reportados cambiará con el control estratégico.
- La tolerancia está especificada en la CAGI/PNEURO P N2CPTC2 Código de prueba (Anexo C a ISO 1217).
- , g. La tolerancia está especificada en la CAGI/PNEURO P N2CPTC2 Código de prueba (Anexo C a ISO 1217) como sigue:

Miembro:

Tasa de flujo volumétrico a las condiciones especificadas		Tasa de flujo volumétrico	Consumo de energía específica
m ³ /min	ft ³ /min	%	%
Debajo de 0.5	Debajo de 15	+/- 7	+/- 8
0.5 to 1.5	15 to 50	+/- 6	+/- 7
1.5 to 15	50 to 500	+/- 5	+/- 6
Encima de 15	Encima de 00	+/- 4	+/- 5



Esta hoja fue desarrollada por el Instituto de gas y aire comprimido para el uso de sus miembros.
CAGI no ha verificado los datos reportados de forma independiente.

Form Number ROT 030 Rev 4 1-05

APÉNDICE

A.1. MUESTRA DE CÁLCULO

A.1.1. Calor recuperable del compresor

A.1.1.1. Cálculo del calor total recuperable del compresor de tornillo rotatorio

Para determinar el calor total recuperable se realizó un balance de energía. Se utilizó la ecuación 1 y despejando el calor de la misma con las variables correspondientes se tiene:

Variables:

$\dot{W}_e = 56.5946$ KW. Dato promedio medido directamente del compresor.

$m_0 = 1.0600$ kg/s. Dato promedio medido directamente del compresor.

$m_2 = 1.0530$ kg/s. Dato promedio medido directamente del compresor.

$T_0 = 28^\circ\text{C} = 301.15\text{K}$

$\hat{H}_0 = 301.3469$ KJ/kg. Dato obtenido de las tablas de propiedades del aire como gas ideal. Tabla 2.230, página 2-219 del Manual del Ingeniero Químico, Séptima Edición.

$T_2 = 81^\circ\text{C} = 354.15\text{K}$. Dato medido directamente del compresor.

$\hat{H}_2 = 317.7508$ KJ/kg. Dato obtenido de las tablas de propiedades termofísicas del aire comprimido. Tabla 2.229, página 2-216 del Manual del Ingeniero Químico, séptima edición.

Sustituyendo,

$$\dot{Q}_p = \dot{W}_e + m_0 \hat{H}_0 - m_2 \hat{H}_2$$
$$\dot{Q}_p = 56.5946 + 1.06(301.3469) - 1.0530(317.7508)$$
$$\dot{Q}_p = 41.4457 \text{ KW}$$

A.1.1.2. Cálculo del calor recuperable del aceite de lubricación del compresor de tornillo rotatorio

Se calculó primero el flujo másico del aceite utilizando la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_f = \rho(A) v \quad \text{Ecuación 24.}$$

En donde:

\dot{m}_f = Flujo másico del aceite de lubricación (kg/s)

$\rho = 851.1224 \text{ kg/m}^3$. Densidad del aceite de lubricación Obtenida de la ficha técnica del aceite de lubricación.

$A = 0.0005 \text{ m}^2$. Área de la sección transversal del tubo por donde pasa el aceite de lubricación.

$v = 321.3331 \text{ m/s}$. Velocidad del aceite de lubricación.

$$\dot{m}_f = 851.1224(0.0005)321.3331$$

$$\dot{m}_f = 138.5814 \text{ kg/s}$$

Para calcular el calor recuperable del aceite se utilizó la ecuación 2 sustituyendo las variables correspondientes.

Variables:

$$\dot{m}_f = 138.5814 \text{ kg/s}$$

Cp aceite = 0.008 KJ/kg K. Dato obtenido de la ficha técnica del aceite de lubricación del compresor.

Tf2 = 84 °C = 332.05 K. Valor medido directamente de la tubería utilizando un termómetro de contacto.

Tf1 = 58.9 °C = 357.15 K. Valor medido directamente de la tubería utilizando un termómetro de contacto.

$$\dot{Q}_f = \dot{m}_f C_{p_{\text{aceite}}} (T_{f2} - T_{f1})$$

$$\dot{Q}_f = 138.5814(0.008)(357.15 - 332.05)$$

$$\dot{Q}_f = 27.8271 \text{ KW}$$

A.1.1.3. Cálculo de la eficiencia energética del compresor

Se utilizó la ecuación 3. Sustituyendo los valores correspondientes se tiene:

$$\eta = \frac{m_2 \hat{H}_2 - m_0 \hat{H}_0}{\dot{W}_e}$$

$$\eta = \frac{1.0530(317.75) - 1.06(301.3469)}{56.5946} * 100$$

$$\eta = 26.7675\%$$

A.1.2. Costo de combustible para la producción de vapor sin recuperación de calor

A.1.2.1. Cálculo del flujo de condensado que entra al tanque de almacenamiento de agua

Se utiliza la ecuación 4. Si se tiene un flujo de agua potable de 3300 galones y un flujo total de agua tratada que entra a la caldera de 6450 galones, sustituyendo en la ecuación se tiene:

$$\begin{aligned}F_P + F_C &= F_A \\3300 + F_C &= 6450 \\F_C &= 3150 \text{ galones al día}\end{aligned}$$

Para pasar los galones a libras se multiplicó con la densidad del agua a 68 °C. Dato obtenido del Manual del Ingeniero Químico.

$$\begin{aligned}mc &= 3,150 \text{ gal}(8.1688 \text{ lb/gal}) \\mc &= 25, 731.72 \text{ lb al día}\end{aligned}$$

A.1.2.2. Cálculo de calor necesario para evaporar el agua en la caldera

Para calcular el calor sensible se utilizó la ecuación 5 sustituyendo las variables correspondientes.

Variables:

$\dot{m} = 52688.82513$ Lb/día. Valor medido con un contador de agua.

$C_p = 0.9994$ Btu/lb°F. Valor obtenido del Manual del Ingeniero Químico, Tabla 2.356 Calor específico y otras propiedades termodinámicas del agua. Séptima edición.

$T_1 = 118.0193$ °F. Valor medido con un termómetro.

$T_2 =$ a una presión de 100 psi (6.8966 bar) la temperatura de ebullición del agua es de 327.3069 °F. Valor obtenido del Manual del Ingeniero Químico, Séptima edición.

$$\dot{Q}_s = (52,688.82513)(0.9994)(327.3069 - 118.0193)$$

$$\dot{Q}_s = 11,020,388.5545 \text{ Btu/día}$$

El calor latente se calculó utilizando la ecuación 6 sustituyendo las variables correspondientes.

Variables:

$\dot{m} = 52688.82513$ Lb/día. Valor medido con un contador de agua.

$\hat{H}_{v \text{ sat}} = 1,186.9902$ Btu/lb. Entalpía del vapor saturado a la presión de la caldera tomada del Manual del Ingeniero Químico. Tabla 2.351. Vapor de agua saturado. Séptima edición.

$\hat{H}_{L \text{ sat}} = 298.0356$ Btu/lb. Entalpía del líquido saturado a la presión de la caldera tomada del Manual del Ingeniero Químico. Tabla 2.351. Vapor de agua saturado. Séptima edición.

$$\dot{Q}_L = (52,688.8251)(1,186.9902 - 298.0356)$$

$$\dot{Q}_L = 46,837,971.88 \text{ Btu/día}$$

El calor total se calculó utilizando la ecuación 8, sustituyendo las variables correspondientes.

$$\dot{Q}_T = 11,020,3885545 + 46,837,971.88$$

$$\dot{Q}_T = 57,858,3604378 \text{ Btu/día}$$

Los valores calculados corresponden a los datos obtenidos para un lote de producción. Para los demás lotes se realizó el mismo procedimiento.

A.1.2.3. Cálculo del costo de combustible para producir el vapor requerido

Primero se obtuvo la cantidad de combustible utilizado para evaporar el agua y luego se utilizó la ecuación 10 sustituyendo las variables correspondientes.

Variables:

Gal = 440.7498 galones de combustible gastados. Dato medido con el contador de combustible.

\$ comb = Q12.6199 . Dato proporcionado por el proveedor, correspondiente al segundo semestre del año 2009.

$$\text{\$ vapor} = 440.7498 \text{ gal} * \frac{\text{Q12.6199}}{1 \text{ galon}}$$

$$\text{\$ vapor} = \text{Q } 5,562.2358 \text{ por día}$$

Este valor se calculó utilizando los valores promedios obtenidos para un lote. Para los demás lotes se calculó de la misma forma.

Para calcular el costo anual se obtuvo el promedio de consumo diario de combustible de todos los lotes, se calculó el consumo mensual multiplicando por 16 días que se opera al mes y luego se multiplicó por 12 meses que tiene el año.

Costo de combustible mensual: Q72,093.47

Costo de combustible anual: Q865,121.05

A.1.3. Costo de producción de vapor con recuperación de calor

A.1.3.1. Cálculo del calor que se transfiere del aceite de lubricación del compresor de tornillo rotatorio al agua

Con la eficiencia del intercambiador de calor se calculó el calor que se transfirió del aceite al agua al multiplicar la eficiencia del intercambiador por el calor del aceite.

$$\dot{Q}_i = 0.9(27.8271)$$

$$\dot{Q}_i = 25.0444 \text{ KW}$$

A.1.3.2. Cálculo de la temperatura que alcanzaría el agua al serle transferido el calor del aceite de lubricación del compresor de tornillo rotatorio

Se utilizó la ecuación 13 sustituyendo las variables correspondientes.

Variables:

$$\dot{Q}_w = 25.0444 \text{ KW.}$$

$\dot{m}_w = 0.1425 \text{ kg/s.}$ Flujo del agua que pasa por el intercambiador. Dato especificado.

$C_p = 4.1840 \text{ KJ/kg K.}$ Dato obtenido del Manual del Ingeniero Químico. Séptima Edición.

$T_{w1} = 28 \text{ }^\circ\text{C} = 301.15\text{K.}$ Dato medido con un termómetro.

$$T_{w2} = \frac{25.0444}{(0.14)(4.1840)} + 301.5$$

$$T_{w2} = 70.75 \text{ }^\circ\text{C}$$

A.1.3.3. Cálculo de la temperatura que alcanzaría el agua de alimentación al mezclar el agua calentada por el aceite de lubricación y los condensados

Se utilizó la ecuación 16 sustituyendo las variables correspondientes.

Variables:

$$\dot{m}_{co} = 25,731.72 \text{ libras por día.}$$

$T_{co} = 68 \text{ }^\circ\text{C.}$ Dato medido con un termómetro.

$m_{wT} = 27,434.3356 \text{ lb}$ de agua precalentada con el aceite de lubricación.

$$T_{w2} = 70 \text{ }^\circ\text{C.}$$

$$T_m = \frac{(27,434.3356)(70) + (25,731.72)(68)}{27,434.3356 + 25,731.72}$$

$$T_m = 69.032 \text{ }^\circ\text{C}$$

A.1.3.4. Cálculo del calor necesario para evaporar el agua en la caldera

Se utilizó la ecuación 17 para calcular el calor sensible sustituyendo las variables correspondientes.

Variables:

$\dot{m} = 52688.82513$ Lb/día. Valor medido con un contador de agua.

$C_p = 1.0004$ Btu/lb °F. Valor obtenido del Manual del Ingeniero Químico, Tabla 2.356 Calor específico y otras propiedades termodinámicas del agua. Séptima edición.

$T_1 = 156.2576$ °F.

$T_2 =$ a una presión de 100 psi (6.8966 bar) la temperatura de ebullición del agua es de 327.3069 °F. Valor obtenido del Manual del Ingeniero Químico, Séptima edición.

$$\dot{Q}_s = (52,688.82513)(1.0004)(327.3069 - 156.2576)$$

$$\dot{Q}_s = 9,015,701.9771 \text{ Btu/día}$$

El calor latente se calculó utilizando la ecuación 18 sustituyendo las variables correspondientes.

Variables:

$\dot{m} = 52688.82513$ Lb/día. Valor medido con un contador de agua.

$\hat{H}_{v \text{ sat}} = 1,186.9902$ Btu/lb. Entalpía del vapor saturado a la presión de la caldera tomada del Manual del Ingeniero Químico. Tabla 2.351. Vapor de agua saturado. Séptima edición.

$\hat{H}_{L_{sat}} = 298.0356$ Btu/lb. Entalpía del líquido saturado a la presión de la caldera tomada del Manual del Ingeniero Químico. Tabla 2.351. Vapor de agua saturado. Séptima edición.

$$\dot{Q}_L = (52,688.8251)(1,186,9902 - 298.0356)$$

$$\dot{Q}_L = 46,837,971.88 \text{ Btu/día}$$

El calor total se calculó utilizando la ecuación 8, sustituyendo las variables correspondientes.

$$\dot{Q}_T = 9,015,701,977.1 + 46,837,971.88$$

$$\dot{Q}_T = 55,853,673.8605 \text{ Btu/día}$$

Los valores calculados corresponden a los datos obtenidos para un lote de producción. Para los demás lotes se realizó el mismo procedimiento.

A.1.3.5. Cálculo del costo de combustible para producir el vapor requerido

Primero se obtuvo la cantidad de combustible utilizado para evaporar el agua utilizando la ecuación 21 y luego se utilizó la ecuación 10 sustituyendo las variables correspondientes.

Variables:

$$\dot{Q}_T = 55,853,673.8605 \text{ Btu/día}$$

$\eta = 0.94$. Eficiencia de la caldera tomada de los resultados obtenidos por las personas encargadas de la caldera.

$$P_c = 145,000.00 \text{ Btu /gal}$$

$$\text{Gal} = \frac{55,853,673.8605}{0.94(145,000)}$$

Gal=409.7848 galones de combustible

Variables:

Gal = 409.7848 galones de combustible gastados con la recuperación de calor.

\$ comb = Q12.6199 . Dato proporcionado por el proveedor, correspondiente al segundo semestre del año 2009.

$$\text{\$ vapor} = 409.7848 \text{ gal} * \frac{\text{Q12.6199}}{1 \text{ galon}}$$

$$\text{\$ vapor} = \text{Q } 5,171.4601 \text{ por día}$$

Este valor se calculó utilizando los valores promedios obtenidos para un lote. Para los demás lotes se calculó de la misma forma.

Para calcular el costo anual se obtuvo el promedio de consumo diario de combustible de todos los lotes, se calculó el consumo mensual multiplicando por 16 días que se opera al mes y luego se multiplico por 12 meses que tiene el año.

Costo combustible mensual al recuperar calor del aceite: Q69,573.73

Costo combustible anual al recuperar calor del aceite: Q804,363.7248

A.1.3.6. Cálculo de la eficiencia energética al integrar el sistema de recuperación de calor

Se utilizó la ecuación 23 sustituyendo las variables correspondientes.

$$\eta = \frac{(m_2 H_2 - m_0 H_0) + Q_f}{W_e}$$
$$\eta = \frac{(1.0530(317.75) - 1.06(301.3469)) + 27.8271}{56.5946 + 1.3471} * 100$$
$$\eta = 74.1675\%$$

A.1.4. Ahorro obtenido de la recuperación de calor

A.1.4.1. Ahorro obtenido del combustible

El ahorro económico se obtuvo restando el costo anual de combustible gastado sin la recuperación de calor del costo anual de combustible con la recuperación de calor.

$$Q\ 865,121.7049 - Q\ 804,338.2885 = Q60,783.42$$

$$\text{Ahorro económico anual} = Q60,783.42$$

A.1.4.2. Consumo extra de energía

Para vencer una caída de presión en algún equipo o dispositivo se necesita realizar un trabajo extra. La caída de presión existente en el enfriador de aire es de 7.5 psi como máximo, y la del intercambiador de calor de placas es de 8.7 psi como máximo. Como ahora el aceite de lubricación no pasará por el enfriador de aire sino únicamente por el intercambiador de calor (a menos que el intercambiador de calor no funcione), la caída de presión que se tendrá será la del intercambiador de calor. El trabajo adicional será entonces el necesario para vencer la caída de presión extra añadida por el intercambiador de calor. En este caso sería $8.7 - 7.5 = 1.2$ Psi (8.2737 KPa).

Para calcular el trabajo necesario para vencer ese trabajo se realizó un balance de energía en función de la presión, en el cual se desprecia la energía cinética, energía potencial y las pérdidas de calor por fricción y/o radiación, la ecuación simplificada queda de la siguiente manera:

$$W_{\text{extra}} = \frac{\Delta P}{\rho} \times \dot{m}$$

Sustituyendo los valores de la caída de presión y densidad del aceite:

$$W_{\text{extra}} = \frac{8.2737 \text{ KPa}}{851.1224 \text{ kg/m}^3} \times 138.5814 \text{ kg/s}$$

$$W_{\text{extra}} = 0.0097209 \text{ KJ/kg} \times 138.5814 \text{ kg/s}$$

$$W_{\text{extra}} = 1.3471 \text{ KJ/s (KW)}$$

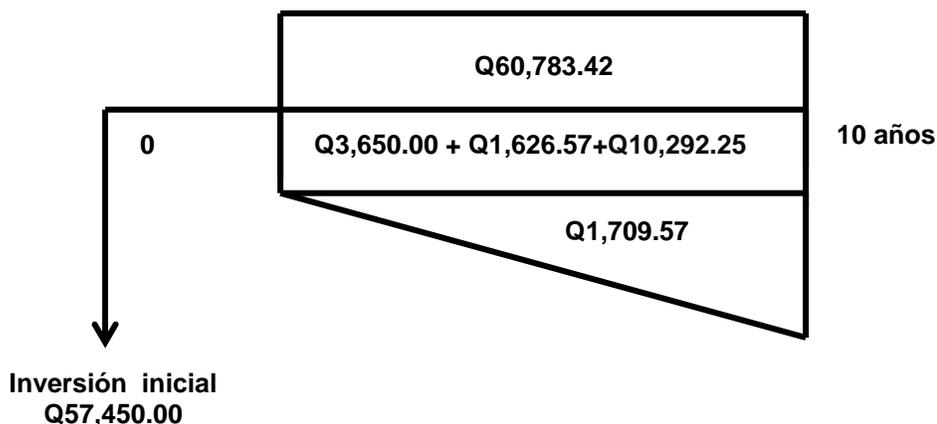
Para calcular el costo del trabajo extra se multiplica el trabajo extra por las 24 horas que trabaja el equipo y luego por Q1.65, que es el precio del KWh dado por la empresa eléctrica.

$$\begin{aligned} \$_{\text{extra}} &= 1.3471 \text{ KW} \times 24\text{h} \times \text{Q}1.658/\text{KWh} \\ \$_{\text{extra}} &= \text{Q}53.6038/\text{día} \times 16 \text{ días/mes} \times 12 \text{ meses/año} \\ \$_{\text{extra}} &= \text{Q}10,291.93 \text{ al año} \end{aligned}$$

Esta cantidad corresponde a parte de los egresos en el flujo de efectivo.

A.1.5. Análisis financiero

Para realizar el análisis financiero primero se hizo el diagrama de flujo de efectivo para 10 años, la vida útil del equipo. En el año cero se colocó la inversión total. Del año 1 al 10 se colocó como ingresos el ahorro anual obtenido de la recuperación de calor y como egresos los costos de mantenimiento del equipo, los gastos extras por la bomba agregada y el incremento anual en el costo de combustible, presentado como gradiente, obtenido de la tendencia y comportamiento del precio del combustible durante el último año. El flujo de efectivo se muestra a continuación.



A.1.5.1. Cálculo del costo total de la inversión

La inversión total incluye los costos de las tuberías y accesorios, aislamiento, materiales utilizados, el costo del intercambiador de calor y el costo de la instalación. A continuación se muestra una tabla detallada con todos los costos.

Tabla XXVII. Materiales y precios a utilizar en la instalación del sistema de recuperación de calor

Material	Precio unitario	Cantidad	PRECIO TOTAL
Tubería HG 1" (46m)	Q175.00	10	Q 1,750.00
Codo 90°	Q12.00	13	Q 156.00
Valvula de bola para vapor cedula 80	Q165.00	4	Q 660.00
Manguera para agua caliente	Q35.42	4	Q 141.68
Conector npt macho	Q57.50	4	Q 230.00
Union universal 1"	Q32.71	8	Q 261.68
Sección Riel Unistrut 1"	Q187.00	3	Q 561.00
Abrazader Unistrut 1"	Q15.00	30	Q 450.00
Varilla Roscada 3/8 " (6m)	Q12.00	10	Q 120.00
Tuercas 3/8	Q0.20	60	Q 12.00
			Q 4,342.36

Fuente: Valores obtenidos en distintas distribuidoras y ferreterías, cotizados en el mes de diciembre de 2009.

Tabla XXVIII. Inversión total

COSTO MATERIALES Y EQUIPO	Q	5,000.00
AISLAMIENTO	Q	6,000.00
COSTO INTERCAMBIADOR DE CALOR	Q	41,450.00
COSTO DE INSTALACIÓN	Q	5,000.00
TOTAL INVERSIÓN	Q	57,450.00

Fuente: Valores obtenidos en distintas distribuidoras y ferreterías, cotizados en el mes de diciembre de 2009.

A.1.5.2. Cálculo del valor presente neto

Se utilizó el software Microsoft Excel. La función utilizada es la siguiente:

$$=VNA(\text{tasa de interés; rango de VPN beneficios}) + \text{VPN costos}$$

La tasa de interés que se utilizó es la de la depreciación del dinero con el tiempo. El dato utilizado es de 7.88% que es la tasa máxima alcanzada en el año 2009.

Los valores de VPN beneficios se obtuvieron del flujo de efectivo, restando los egresos de los ingresos para todos los años del 1 al 10.

El valor de VPN costos es el valor de la inversión inicial, ésta debe colocarse con signo negativo en la fórmula.

Con el procedimiento descrito el VPN obtenido es Q167, 240.56.

A.1.5.3. Cálculo de la tasa interna de retorno

Se utilizó el software Microsoft Excel. La función utilizada es la siguiente:

=TIR(rango)

En el rango se debe incluir la inversión con signo negativo, y los valores correspondientes de VPN beneficios para cada año.

El valor obtenido de la TIR con el procedimiento descrito es de 57%.

A.1.5.4. Cálculo de la relación beneficio/costo

Se dividió el total de VPN beneficios entre el VPN costos. El total de VPN beneficios es la suma de todos los VPN beneficios correspondiente a cada año. El total de VPN costos es la inversión total. El valor obtenido es de 4.7971.

A.1.5.5. Cálculo del tiempo de recuperación de la inversión

Simple: no se utilizó tasa de descuento.

Se empezó con la inversión total con signo negativo. Luego en cada año se sumó la inversión más el VPN de beneficios de los años que han pasado. Se hizo lo mismo para los cuatro años y el signo cambió entre el año 1 y 2. Para ser más exactos la inversión se recupera en 13 meses.

Año 0	-Q57,450.00	
Año 1	-Q24,145.50	TR
Año 2	Q9,159.00	
Año 3	Q42,463.50	
Año 4	Q75,768.01	
Año 5	Q109,072.51	
Año 6	Q142,377.01	
Año 7	Q175,681.51	
Año 8	Q208,986.01	
Año 9	Q242,290.51	
Año 10	Q275,595.01	

Compuesto: Se utilizó tasa de descuento.

Se calculó el VPN para cada año utilizando la siguiente ecuación:

$$VPN(n) = \frac{1}{1(1+i)^n} (VPN(n)_{\text{Beneficio}})$$

Luego en cada año se sumó la inversión con signo negativo más el VPN de beneficios descontado de todos los años que han pasado.

Año 0	-Q57,450.00		
Año 1	Q30,871.80	-Q26,578.20	TR
Año 2	Q28,616.80	Q2,038.60	
Año 3	Q26,526.51	Q28,565.11	
Año 4	Q24,588.90	Q53,154.02	
Año 5	Q22,792.83	Q75,946.85	
Año 6	Q21,127.95	Q97,074.79	
Año 7	Q19,584.68	Q116,659.47	
Año 8	Q18,154.13	Q134,813.60	
Año 9	Q16,828.08	Q151,641.68	
Año 10	Q15,598.89	Q167,240.56	

El tiempo de recuperación de la inversión tomando en cuenta el descuento se encuentra entre el primero y segundo año. Exactamente en 13 meses.

A.2. TABLAS DE DATOS

Tabla XXIX. Cantidad de agua y combustible consumido

DÍA	GALONES DE AGUA QUE ENTRA AL TANQUE	LIBRAS DE AGUA QUE ENTRA AL TANQUE	GALONES DE AGUA QUE ENTRAN A LA CALDERA	LIBRAS DE AGUA QUE ENTRA A LA CALDERA	GALONES DIARIOS DE CONDENSADO	GALONES DE COMBUSTIBLE GASTADO
1	3400	28265.67914	6700	54731.02765	3300	435.00
2	3400	28265.67914	6500	53097.26563	3100	419.00
3	3300	27434.33564	6500	53097.26563	3200	403.00
4	3100	25771.64863	6100	49829.74159	3000	382.00
	3300.0000	27434.33564	6450.0000	52688.82513	3150.0000	409.7500
5	1200	9976.12205	2300	18788.26322	1100	156.00
6	2500	20783.5876	5000	40844.05049	2500	321.00
7	3000	24940.30513	5700	46562.21755	2700	359.00
8	3000	24940.30513	6100	49829.74159	3100	385.00
	2425.0000	20160.07998	4775.0000	39006.06821	2766.6666	293.6000
9	2900	24108.96162	5400	44111.57452	2500	343.00
10	3000	24940.30513	5900	48195.97957	2900	373.00
11	3000	24940.30513	6100	49829.74159	3100	388.00
12	2500	20783.5876	4900	40027.16948	2400	313.00
	2850.0000	23693.28987	5575.0000	45541.11629	2725.0000	354.2500
13	2300	19120.9006	4300	35125.88342	2000	277.00
14	2900	24108.96162	5300	43294.69351	2400	367.00
15	3100	25771.64863	6000	49012.86058	2900	372.00
16	300	2494.030513	800	6535.048078	500	49.00
	2150.0000	17873.88534	4100.0000	33492.1214	1950.0000	266.2500

Tabla XXX. Calor necesario para evaporar el agua y cantidad de combustible consumido y costo del mismo sin recuperación de calor. Entrando el agua potable a 28 °C y el condensado a 68 °C

Temperatura °F	Calor sensible (Btu/día)	Calor latente (Btu/día)	Calor total (Btu/día)	Combustible consumido (gal/día)	Costo (Q/día)
118.3155	11431372.8833	48653397.1502	60084770.0335	457.8331	5777.8264
117.2052	11149018.7344	47201056.9367	58350075.6711	444.1665	5605.3539
118.2992	11090967.6442	47201056.9367	58292024.5810	444.1665	5605.3539
118.2633	10410232.7458	44296376.5099	54706609.2557	416.8331	5260.4091
118.0193	11020388.5545	46837971.8834	57858360.4378	440.7498	5562.2358
117.3003	3944410.2298	16701912.4545	20646322.6844	157.1666	1983.4329
118.8462	8511655.4003	36308505.3360	44820160.7362	341.6665	4311.8107
116.9749	9790389.0593	41391696.0830	51182085.1422	389.4998	4915.4642
119.4290	10355185.6207	44296376.5099	54651562.1306	416.8331	5260.4091
128.9683	7733930.3830	34674622.5958	42408552.9789	326.2915	4117.7792
116.2125	9308723.7029	39213185.7628	48521909.4657	368.9998	4656.7556
118.2435	10072787.3400	42844036.2964	52916823.6364	403.1665	5087.9367
119.4290	10355185.6207	44296376.5099	54651562.1306	416.8331	5260.4091
118.1206	8370456.2599	35582335.2292	43952791.4892	334.8332	4225.5745
118.0490	9526788.2309	40483983.4496	50010771.6805	380.9581	4807.6690
116.3657	7404820.7573	31225314.5889	38630135.3462	293.8332	3708.1572
115.4920	9164681.7202	38487015.6561	47651697.3763	362.1665	4570.5194
117.6610	10268869.0595	43570206.4031	53839075.4626	409.9998	5174.1729
127.7346	1303392.6223	5809360.8538	7112753.4761	54.6666	689.8897
117.1118	7035443.0013	29772974.3755	36808417.3768	280.1665	3535.6848

Tabla XXXI. Calor necesario para evaporar el agua y cantidad de combustible consumido y costo del mismo con recuperación de calor.

Entrando el agua precalentada con el aceite a 70 °C y el condensado a 68 °C

Temperatura de la mezcla °F	Calor sensible (Btu/día)	Calor latente (Btu/día)	Calor total (Btu/día)	Combustible teórico (gal)	Costo (Q/día)	Ahorro (Q/día)
156.2427	9365968.4347	48653397.1502	58019365.5849	425.6740	5371.9803	405.8461
156.2988	9083403.3537	47201056.9367	56284460.2904	412.9454	5211.3464	394.0076
156.2435	9086343.3942	47201056.9367	56287400.3309	412.9670	5211.6186	393.7354
156.2453	8527093.3143	44296376.5099	52823469.8241	387.5530	4890.8952	369.5139
156.2576	9015701.9771	46837971.8834	55853673.8605	409.7848	5171.4601	390.7757
156.2940	3214217.7810	16701912.4545	19916130.2356	146.1198	1844.0232	139.4097
156.2158	6990626.1613	36308505.3360	43299131.4973	317.6752	4009.0421	302.7686
156.3105	7964903.4185	41391696.0830	49356599.5015	362.1174	4569.8997	345.5646
156.1863	8530034.9425	44296376.5099	52826411.4524	387.5746	4891.1676	369.2415
156.0973	6680672.6230	34674622.5958	41355295.2188	303.4138	3829.0634	288.7158
156.3490	7543996.8193	39213185.7628	46757182.5822	343.0461	4329.2211	327.5345
156.2463	8247468.2750	42844036.2964	51091504.5714	374.8460	4730.5335	357.4031
156.1863	8530034.9425	44296376.5099	52826411.4524	387.5746	4891.1676	369.2415
156.2525	6849343.0874	35582335.2292	42431678.3166	311.3109	3928.7251	296.8494
156.2561	7792710.0139	40483983.4496	48276693.4635	354.1944	4469.9118	337.7572
156.3413	6007528.7560	31225314.5889	37232843.3450	273.1683	3447.3679	260.7893
156.3855	7402715.7432	38487015.6561	45889731.3993	336.6818	4248.9043	321.6151
156.2758	8385810.6256	43570206.4031	51956017.0287	381.1887	4810.5783	363.5946
155.7648	1121448.2811	5809360.8538	6930809.1348	50.8497	641.7197	48.1700
156.3036	5729373.0827	29772974.3755	35502347.4582	260.4721	3287.1423	248.5425

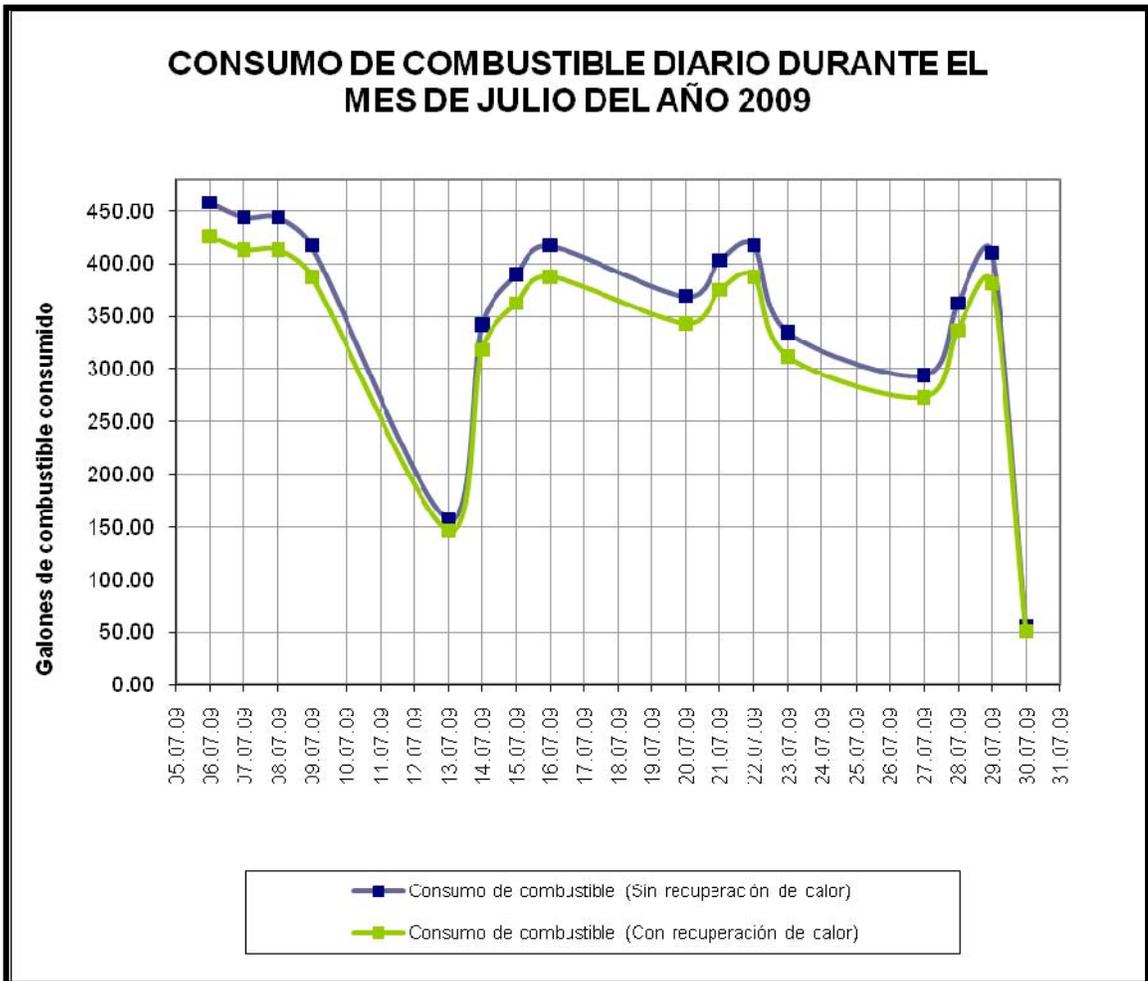
Tabla XXXII. Cantidad de agua y de combustible consumido promedio, diario, mensual y anual.

	Agua que entra al tanque (gal/día)	Agua que entra a la caldera (gal/día)	Sin precalentamiento del agua		Con precalentamiento del agua	
			Consumo de combustible (gal/día)	Costo de combustible (Q/día)	Consumo de combustible (gal/día)	Costo de combustible (Q/día)
Semana 1	3300	6450	440.75	5562.24	409.78	5171.46
Semana 2	2425	4775	326.29	4117.78	303.41	3829.06
Semana 3	2850	5575	380.96	4807.67	354.19	4469.91
Semana 4	2150	4100	280.17	3535.68	260.47	3287.14
Promedio	2681.25	5225	357.04	4505.84	331.97	4189.39
Mensual	42900	83600	5712.66	72093.48	5311.29	69573.73
Anual	514800	1003200	68551.96	865121.70	63735.50	834884.75

Tabla XXXIII. Cantidad de combustible y dinero que se ahorra al instalar el sistema de recuperación de calor, diario, mensual y anual.

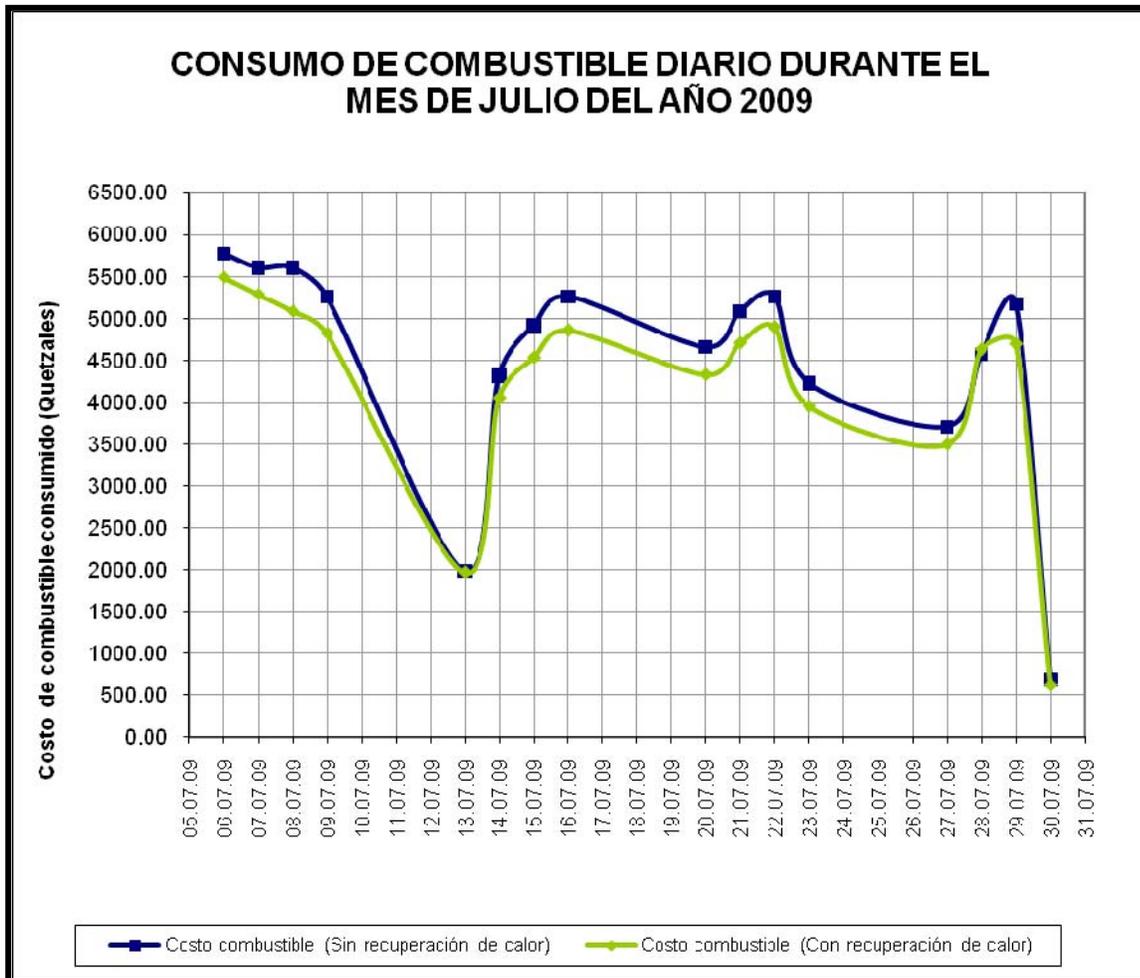
	Diferencia (gal/día)	Ahorro (Q/día)
Semana 1	30.96	390.78
Semana 2	22.88	288.72
Semana 3	26.76	337.76
Semana 4	19.69	248.54
Promedio	25.08	316.45
Mensual	401.37	5065.28
Anual	4816.45	60783.41

Gráfica 1. Consumo de combustible diario durante un mes, con y sin recuperación de calor



Fuente: Datos calculados

Gráfica 2. Costo de combustible diario durante un mes, con y sin recuperación de calor



Fuente: Datos calculados.

Tabla XXXIV. Flujo de efectivo y valores utilizados en el análisis financiero

	INGRESOS	EGRESOS				VPN BENEFICIOS	VPN COSTOS
		Aceite y mantenimiento	Bomba extra	Energía extra por caída de presión	Gradiente pasado a anualidad		
año 0						-57450	57450
año 1	60783.42	3650.00	1626.57	10,292.25	11910.10	33304.50	
año 2	60783.42	3650.00	1626.57	10,292.25	11910.10	33304.50	
año 3	60783.42	3650.00	1626.57	10,292.25	11910.10	33304.50	
año 4	60783.42	3650.00	1626.57	10,292.25	11910.10	33304.50	
año 5	60783.42	3650.00	1626.57	10,292.25	11910.10	33304.50	
año 6	60783.42	3650.00	1626.57	10,292.25	11910.10	33304.50	
año 7	60783.42	3650.00	1626.57	10,292.25	11910.10	33304.50	
año 8	60783.42	3650.00	1626.57	10,292.25	11910.10	33304.50	
año 9	60783.42	3650.00	1626.57	10,292.25	11910.10	33304.50	
año 10	60783.42	3650.00	1626.57	10,292.25	11910.10	33304.50	
						275595.01	

Tabla XXXV. Resultados del análisis financiero

TIR	57%
VAN	Q167,240.56
B/C	4.7971
TR	13 meses

A.3. DESCRIPCIÓN Y DISEÑO DEL NUEVO SISTEMA CON RECUPERADOR DE CALOR INTEGRADO

El sistema de recuperación de calor consiste en integrar un intercambiador de placas en el compresor. La salida y la entrada de agua se conectarán a la tubería por medio de mangueras para agua caliente. Las tuberías de entrada y salida se conectarán a los tanques donde se almacena el agua que irá directo a la caldera.

Actualmente, se cuenta con un tanque de almacenamiento de agua que mide aproximadamente 1 metro de largo y 60 cm de diámetro. En el nuevo diseño se colocará un tanque pequeño encima del ya existente. Aproximadamente de 40cm de diámetro por 75 cm de largo.

El agua fría tratada entrará al tanque pequeño de arriba y bajará por medio de una tubería y, será transportada hacia el intercambiador de calor de placas, colocado en el compresor, por medio de una bomba de 0.25 HP. El agua pasará por el intercambiador de calor y se calentará e ingresará de nuevo al tanque pequeño por la parte superior. El agua se hará recircular hasta que se alcance la temperatura deseada.

El agua calentada por el aceite de lubricación del compresor, bajará por gravedad hacia el segundo tanque cuando el nivel de agua de este baje, donde se mezclará con los condensados. Esta mezcla que dará agua de aproximadamente 70 °C se transportará directo a la caldera, cuando esta lo requiera, por medio de una bomba de 5 HP. Las tuberías y los tanques se aislarán para evitar pérdidas de calor.

A continuación se muestra un diagrama de flujo y un esquema de cómo quedará el nuevo sistema.

Tabla XXXVI. Nomenclatura del diagrama de flujo del nuevo sistema

NOMENCLATURA	EQUIPO
G-110	Compresor de tornillo rotatorio
E-111	Intercambiador de calor de placas
V-112	Válvula de compuerta
F-113	Tanque de almacenamiento de aire
E-114	Secador frigorífico
P-210	Caldera
L-211	Bomba centrífuga
V-212	Válvula de compuerta
A	Aire comprimido
HRW	Retorno de condensados
S	Vapor
WP	Agua tratada

Figura 29. Diagrama de flujo del nuevo sistema

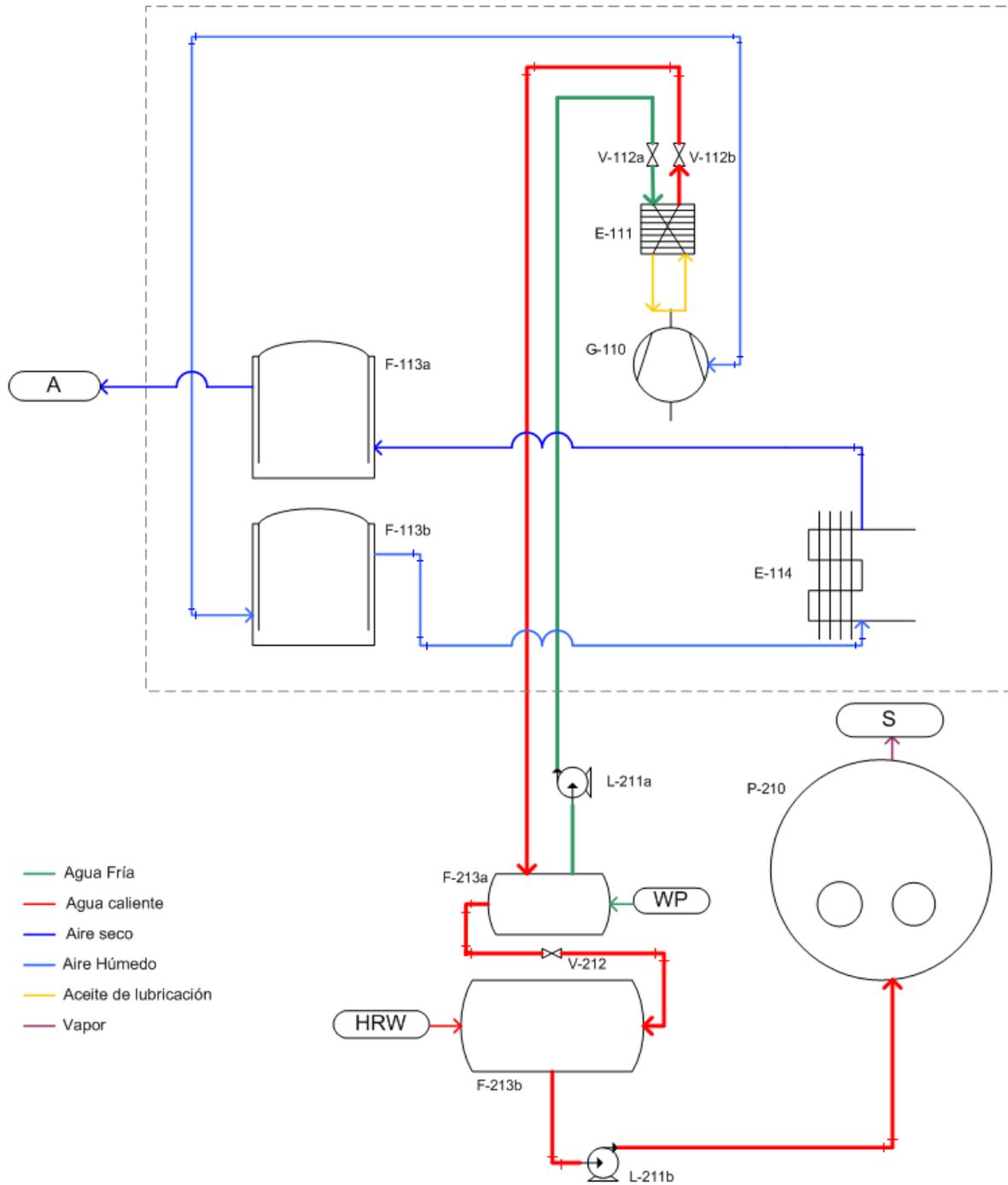


Figura 30. Diagrama tridimensional del nuevo diseño. Vista frontal con perspectiva

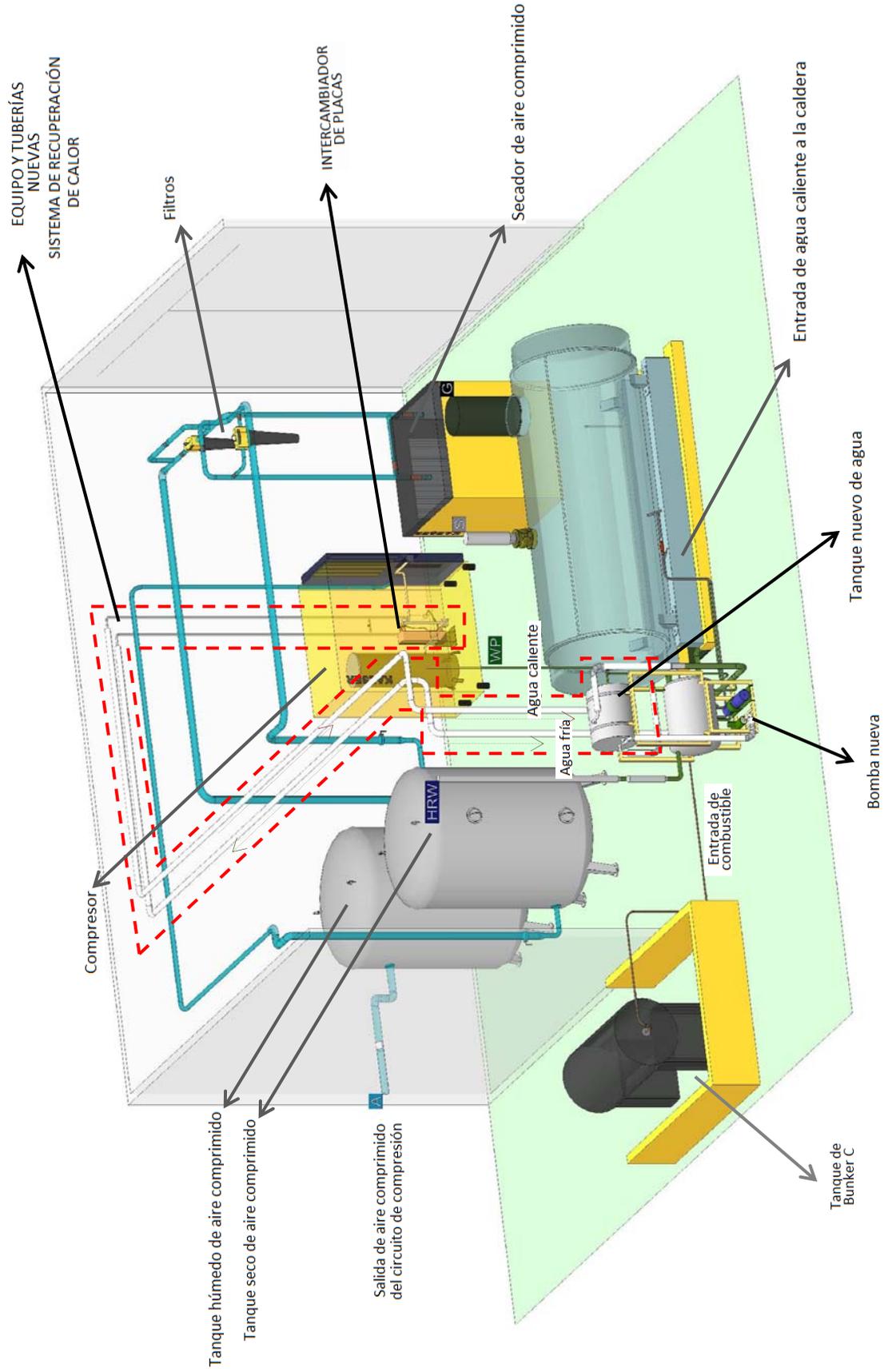


Figura 31. Diagrama tridimensional del nuevo diseño. Vista trasera con perspectiva

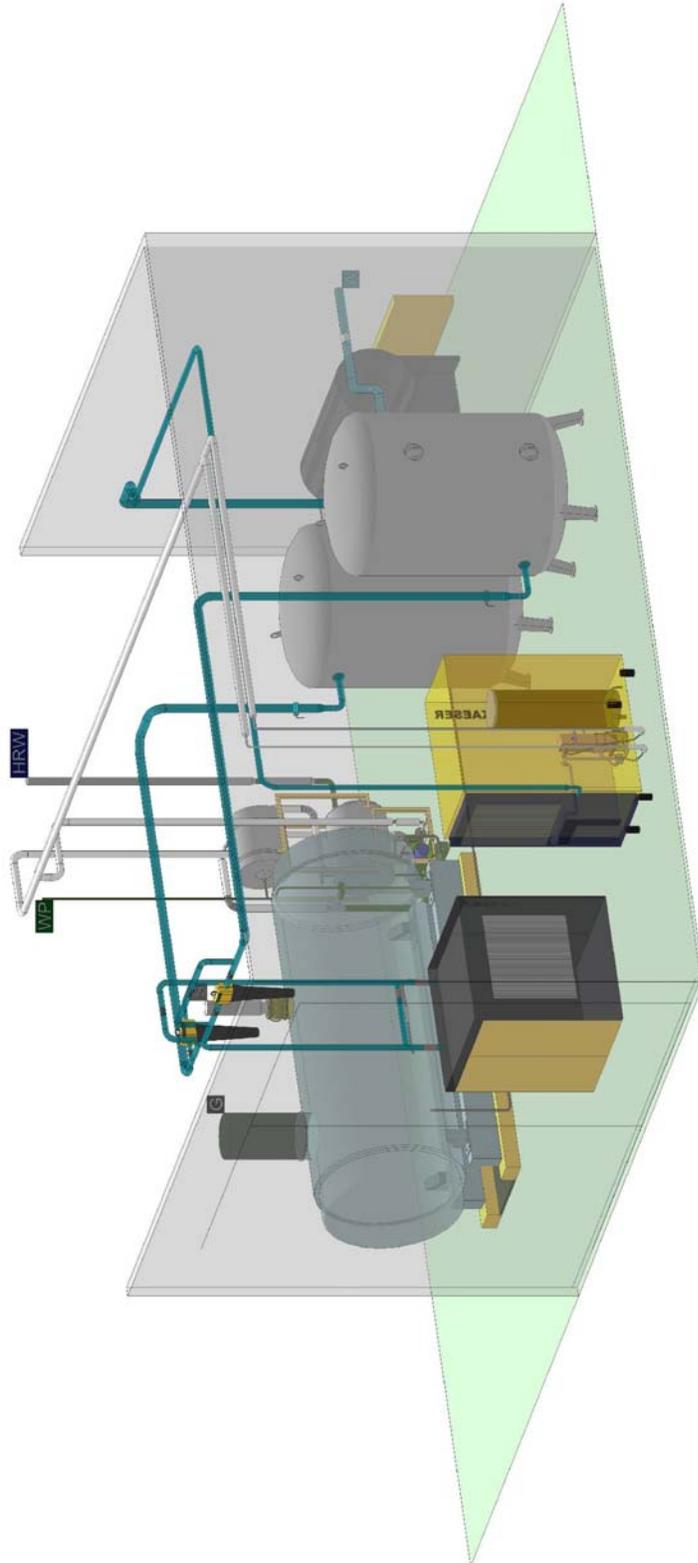


Figura 32. Diagrama tridimensional del nuevo diseño. Vista frontal

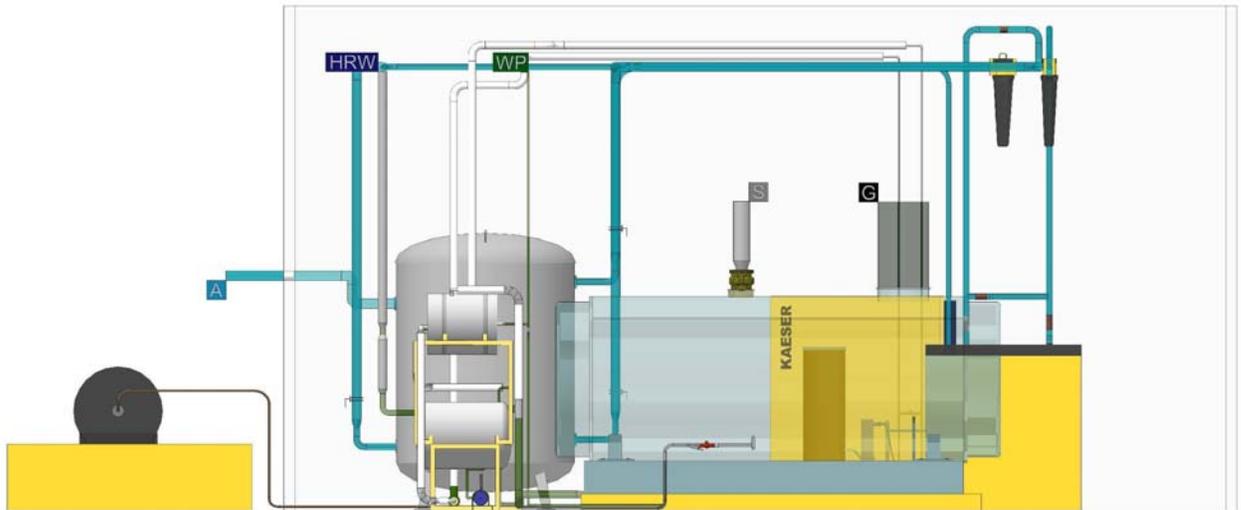


Figura 33. Diagrama tridimensional del nuevo diseño. Vista trasera



Figura 34. Diagrama tridimensional del nuevo diseño. Vista lateral derecha

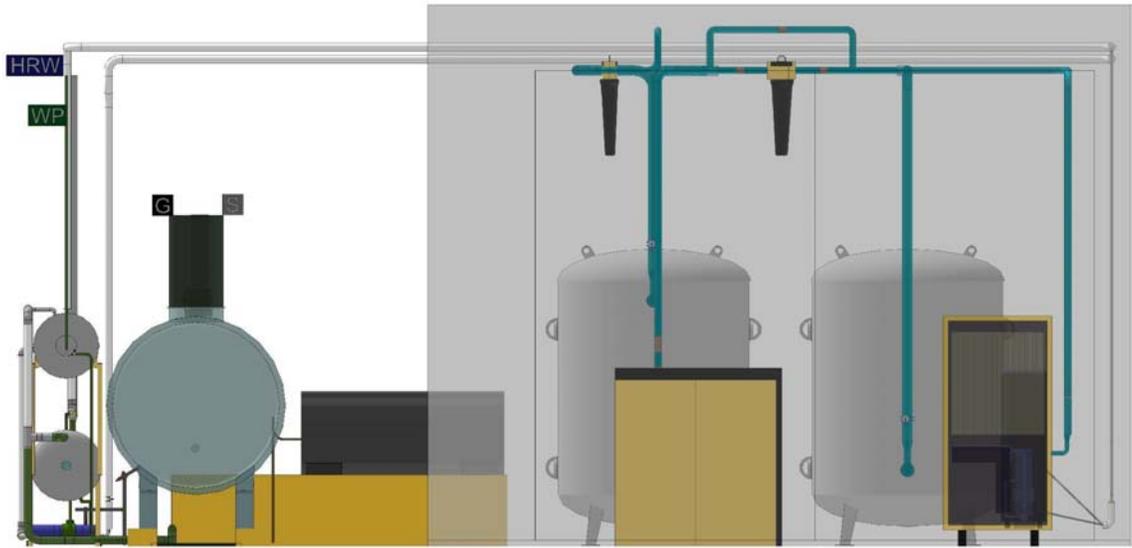


Figura 35. Diagrama tridimensional del nuevo diseño. Vista lateral izquierda

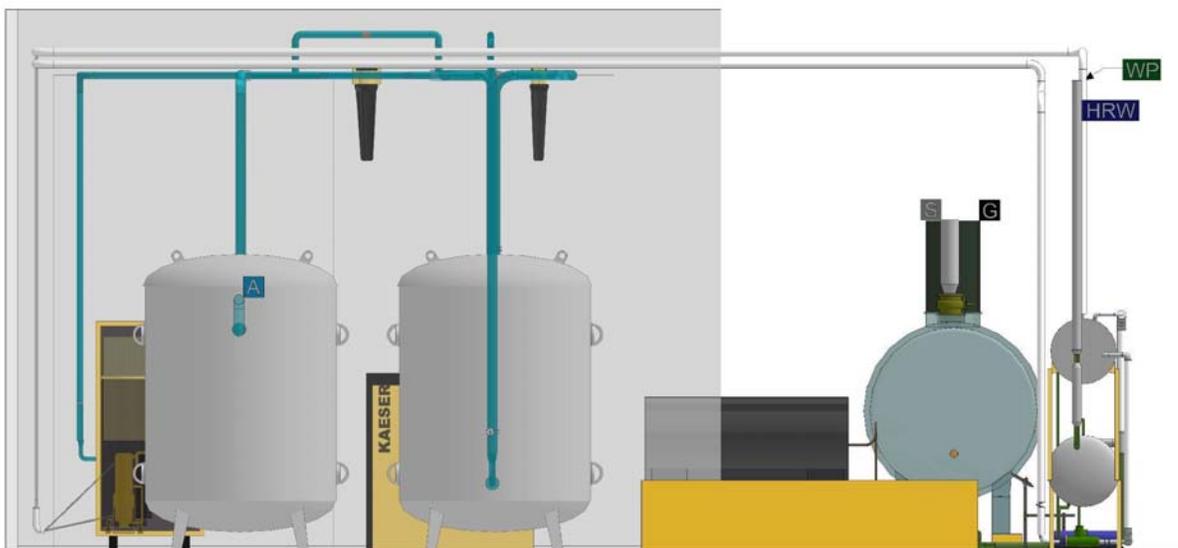


Figura 36. Diagrama tridimensional del nuevo diseño. Vista desde arriba

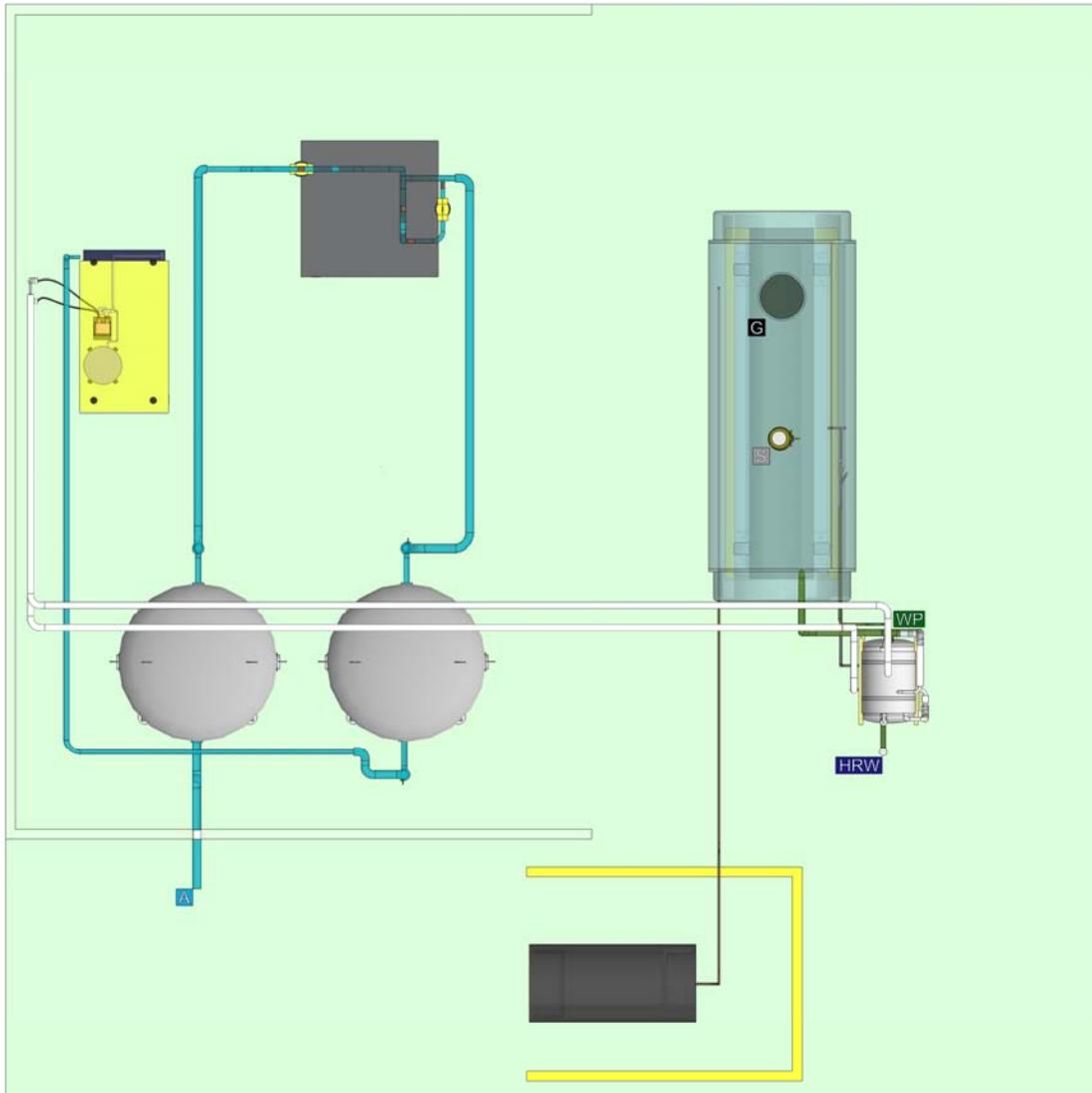


Figura 37. Diagrama tridimensional de los tanques de agua

1.Perspectiva, 2. Perspectiva, 3.Vista Elevación frontal, 4. Vista Elevación posterior.

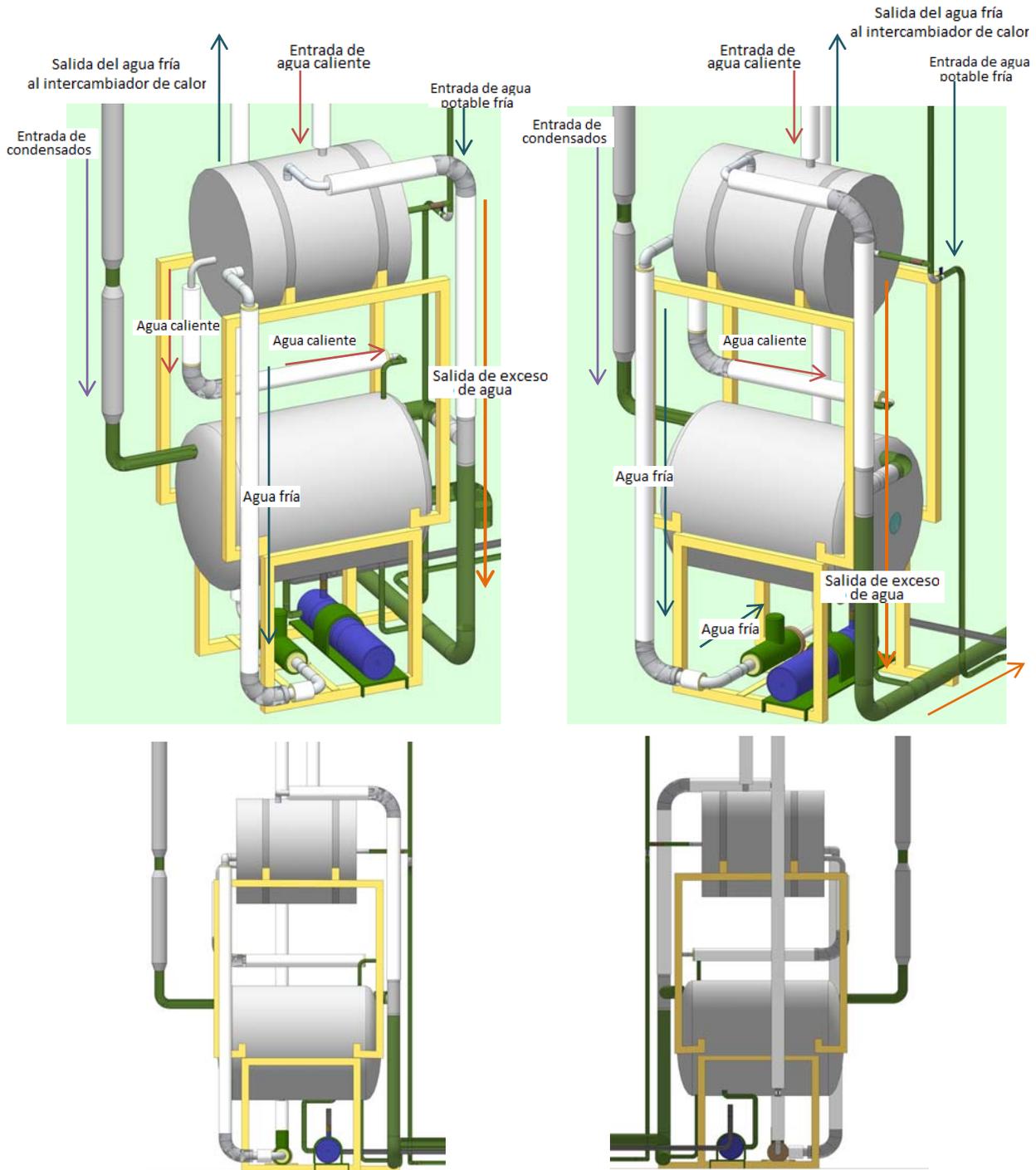


Figura 38. Diagrama tridimensional del intercambiador de calor a instalar

1. Perspectiva posterior, 2. Perspectiva frontal, 3. Vista Elevación frontal, 4. Vista Elevación posterior

