



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

**DISEÑO DE UN SISTEMA EFICIENTE DE SUMINISTRO DE VAPOR PARA
ALIMENTAR UNA PLANTA FARMACÉUTICA**

Clara Sofia Motta Rodriguez

Asesorado por la Inga. Ana Lilí Batres Ruano

Guatemala, febrero de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN SISTEMA EFICIENTE DE SUMINISTRO DE VAPOR PARA
ALIMENTAR UNA PLANTA FARMACÉUTICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

CLARA SOFIA MOTTA RODRIGUEZ

ASESORADO POR LA INGA. ANA LILÍ BATRES RUANO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Mario José Mérida Mere
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortiz Castillo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DE UN SISTEMA EFICIENTE DE SUMINISTRO DE VAPOR PARA ALIMENTAR UNA PLANTA FARMACÉUTICA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 23 de mayo de 2018.

Clara Sofia Motta Rodriguez

Guatemala, marzo 2019

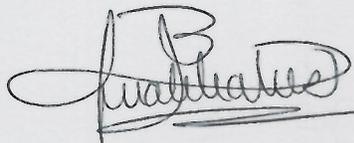
Ingeniero
Carlos Salvador Wong Daví
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad San Carlos de Guatemala
Presente

Estimado Ingeniero Wong:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y dado mi aprobación al informe final del Trabajo de Graduación titulado: **“DISEÑO DE UN SISTEMA EFICIENTE DE SUMINISTRO DE VAPOR PARA ALIMENTAR UNA PLANTA FARMACÉUTICA”**, del estudiante de Ingeniería Química Clara Sofía Motta Rodriguez quien se identifica con registro académico 2011-14509, y número de CUI: 2149-91393-0415.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,



Ana Lili Batres Ruano
Ingeniero Químico
Colegiado Activo 1841

Inga. Qco. Ana Lili del Rosario Batres Ruano
Gerente del departamento de control de calidad/ Vizcaíno
Colegiado activo No. 1841
Asesor

Guatemala, marzo 2019

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Daví
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad San Carlos de Guatemala
Presente

Estimado Ingeniero Wong:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y dado mi aprobación al informe final del Trabajo de Graduación titulado: **"DISEÑO DE UN SISTEMA EFICIENTE DE SUMINISTRO DE VAPOR PARA ALIMENTAR UNA PLANTA FARMACÉUTICA"**, del estudiante de Ingeniería Química Clara Sofía Motta Rodríguez quien se identifica con registro académico 2011-14509, y número de CUI: 2149-91393-0415.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,



Ing. Sergio Alejandro Recinos
Supervisor de EPS



Guatemala, 04 de abril de 2019.
Ref.EPS.D.128.04.19.

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Wong Davi.

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **"DISEÑO DE UN SISTEMA EFICIENTE DE SUMINISTRO DE VAPOR PARA ALIMENTAR UNA PLANTA FARMACÉUTICA"** que fue desarrollado por la estudiante universitaria Clara Sofia Motta Rodríguez, quien fue debidamente asesorada y supervisada por el Ingeniero Sergio Alejandro Recinos.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor - Supervisor de EPS, en mi calidad de Director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Oscar Argueta Hernández
Director Unidad de EPS

/ra





Guatemala, 30 de abril de 2019.
 Ref. EIQ.TG-IF.018.2019.

Ingeniero
 Carlos Salvador Wong Davi
 DIRECTOR
 Escuela de Ingeniería Química
 Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **044-2018** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad Ejercicio Profesional Supervisado con Seminario de Investigación-
-Tres meses-

Solicitado por la estudiante universitaria: **Clara Sofia Motta Rodriguez.**
 Identificada con número de carné: **2149913930415.**
 Identificada con registro académico: **201114509.**
 Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA.**

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

DISEÑO DE UN SISTEMA EFICIENTE DE SUMINISTRO DE VAPOR PARA
ALIMENTAR UNA PLANTA FARMACÉUTICA

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por la Ingeniera Química: **Ana Lilí del Rosario Batres Ruano.**

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Inga. Dina Lissette Estrada Moreira
 COORDINADORA DE TERNA
 Tribunal de Revisión
 Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.004.2020

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 Ejercicio Profesional Supervisado (**EPS final**) de la **carrera de Ingeniería Química** de la estudiante **CLARA SOFIA MOTTA RODRIGUEZ** titulado: **"DISEÑO DE UN SISTEMA EFICIENTE DE SUMINISTRO DE VAPOR PARA ALIMENTAR UNA PLANTA FARMACÉUTICA"** Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Williams G. Álvarez Mejía; M.I.Q., M.Z.I.Y.
Director
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, enero de 2020

Cc: Archivo
WGAM/ale

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 042.2020

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: **DISEÑO DE UN SISTEMA EFICIENTE DE SUMINISTRO DE VAPOR PARA ALIMENTAR UNA PLANTA FARMACÉUTICA**, presentado por la estudiante universitaria: **Clara Sofia Motta Rodriguez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, febrero de 2020

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Porque de él viene toda la sabiduría, porque en él encontré paz y prudencia en mi actuar, porque es mi inspiración para emprender y terminar lo que me propongo y porque ha puesto mis pies sobre peña y ha corregido mis pasos.

Mis padres

Cesar Motta y Ana María Rodriguez, gracias por el esfuerzo que hicieron para brindarme una buena educación, por encaminarme a Dios y porque sé que siempre han creído en mí, los amo.

Carmela Girón

Gracias por todo su apoyo, confianza, cariño y buenas intenciones, para ayudarme a lograr mis sueños; le estaré eternamente agradecida por cuidar de mí y por brindarme su amistad, la guardo con un afecto especial en mi corazón.

Mi mejor amigo

Wolfgang Alexis Barrientos Girón, por su cariño y apoyo incondicional, en esta aventura tan maravillosa que emprendimos juntos que fue la universidad, lo amo.

Mis hermanos

Paulo y Lucía Motta Rodriguez, gracias por motivarme a terminar este proceso y por todo su apoyo, amor y buenos deseos hacia mi persona, los amo.

Mis abuelos

Juan de Jesús Rodriguez Porras, María Herminia Figueroa, Cesar Augusto Motta y Alba Enriqueta Morales de Motta, por su amor, sus sabios consejos y por creer en mí; los llevaré siempre en mi corazón.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por permitirme terminar esta etapa de mí vida y empujarme a nuevos retos y a grandes oportunidades, en donde aplicare todos mis conocimientos y talentos.
- Universidad de San Carlos de Guatemala** Por ser mi casa de estudios, la institución que me dio la oportunidad de adquirir el conocimiento necesario para hacer de mi un profesional al servicio del pueblo de Guatemala.
- Mis padres** Les agradezco su apoyo en cada etapa de mi vida y por motivarme a seguir adelante aun en las dificultades de la vida.
- Mis hermanos** Por motivarme a ser mejor cada día y aprender a levantarme de las caídas.
- Mis primas** María Guadalupe Rodríguez, Gabriela Natalí Rodríguez, Michelle Motta, las quiero gracias por su cariño y bueno deseos.
- Mis tíos** Sheny Motta, Víctor Rodríguez, Juan José Rodríguez, por su apoyo y cariño.

Ing. Manuel Rivas

Gracias por compartir sus conocimientos conmigo, por apoyarme en este proyecto y por sus sabios consejos.

Estefany Montenegro

Gracias por tu amistad, paciencia y por motivarme a dar más de mí, en todo momento, te quiero amiga.

Laboratorios Vizcaíno

Por permitirme realizar los estudios y análisis necesarios para la realización del proyecto.

Mis asesores

Por el tiempo dedicado a la revisión de mi proyecto.

Mis amigas

Diana Godoy, Mirna Villatoro, María José Calvo, María Rodríguez, Angélica Chin, Kevin Isidro, Lourdes Recinos, Margarita Fuentes, Ana Ramos, Mireya García; gracias por su cariño y por alegrarme la vida.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	I
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. MARCO CONCEPTUAL.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación	3
1.3. Determinación del problema.....	4
1.3.1. Definición	4
1.3.2. Delimitación	4
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Termodinámica.....	5
2.2. Primera ley de la termodinámica	5
2.3. Entalpía	6
2.4. Segunda ley de la termodinámica	7
2.5. Balances de energía.....	8
2.6. Eficiencia térmica	9
2.7. Transferencia de calor	10
2.8. Mecanismos de transferencia de calor	11
2.9. Intercambiadores de calor	12
2.10. Economizadores.....	12
2.11. Comportamiento del agua y estados del vapor	14

2.12.	Diseño de un sistema de vapor	16
2.13.	Equipos que utilizan vapor en la industria farmacéutica.....	17
2.14.	Generadores de vapor	19
2.15.	Calderas.....	19
2.16.	Funcionamiento de las calderas.....	19
2.17.	Tipos de calderas.....	20
2.18.	Calderas pirotubulares	20
2.19.	Calderas acuotubulares	23
2.20.	Dimensionamiento de las calderas.....	24
2.21.	Combustión	24
2.22.	Análisis de eficiencia en calderas	25
	2.22.1. Monitorización continua de emisiones.....	27
2.23.	Tipos de combustibles.....	28
2.24.	Fundamentos de un circuito de vapor	30
2.25.	Vapor <i>flash</i>	33
2.26.	Golpe de ariete.....	33
2.27.	Elementos constitutivos de una red de distribución de vapor...34	
2.28.	Trampas de vapor	36
2.29.	Presión	38
2.30.	Pérdidas de carga	39
2.31.	Tipo de flujo.....	40
2.32.	Accesorios de tuberías.....	42
2.33.	Pérdidas energéticas.....	42
2.34.	Mantenimiento mecánico de un sistema de vapor	44
2.35.	Parámetros de control en el agua de alimentación a la caldera	45
2.36.	Tratamiento del agua	46
2.37.	Análisis económico.....	49
	2.37.1. Valor presente neto (VPN)	49

	2.37.2.	Tasa de retorno (TIR)	50
	2.37.3.	Relación beneficio costo (B/C).....	52
3.		DISEÑO METODOLÓGICO	53
	3.1.	Variables.....	53
	3.1.1.	Variables dependientes de dimensionamiento de la caldera	53
	3.1.2.	Variables del diseño de la red de distribución de vapor.....	53
	3.1.3.	Variables de control en el programa preventivo para el agua de alimentación a la caldera	54
	3.1.4.	Variables de diseño para el economizador	54
	3.1.5.	Análisis económico de la instalación del sistema de vapor.....	54
	3.2.	Delimitación del campo de estudio	55
	3.3.	Recursos humanos disponibles.....	55
	3.4.	Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería y reactivos).....	56
	3.5.	Instrumentos, cristalería y reactivos a utilizar:	56
	3.6.	Técnica cuantitativa	57
	3.7.	Recolección y ordenamiento de la información	58
	3.8.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	64
	3.9.	Análisis estadístico	78
4.		RESULTADOS	79
	4.1.	Dimensionamiento caldera	79
	4.2.	Programa preventivo para el sistema de vapor	81
	4.2.1.	Agua de alimentación caldera.....	81
	4.2.2.	Programa de mantenimiento preventivo mecánico de los distintos elementos del sistema de vapor.....	85

4.2.3.	Rediseño sistema de vapor	90
4.2.4.	Red de retorno de condensado	91
4.2.5.	Características de la red de condensado	92
4.2.6.	Propuesta e implementación de una solución al consumo de combustible actual	95
4.2.7.	Diseño e implementación del economizador	96
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	99
	CONCLUSIONES.....	103
	RECOMENDACIONES	105
	BIBLIOGRAFÍA.....	107
	APÉNDICES.....	109
	ANEXOS.....	111

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Ejemplo de un economizador.....	13
2.	Curva de saturación líquido vapor (P-V)	15
3.	Diagrama de Mollier	16
4.	Esquema de una caldera elemental de vapor	20
5.	Caldera pirotubular de dos pasos de gases	22
6.	Detalle de caldera de triple paso de humos	22
7.	Detalle caldera acuotubular.....	23
8.	Circuito de vapor y condensado.....	32
9.	Equipos tratamiento de agua	48
10.	Esquema de cálculo VPN.....	50
11.	Interpolación TIR.....	51
12.	Esquema de cálculo VPN.....	51
13.	Nivel de diésel del tanque de almacenamiento	60
14.	Curva de calibración de la bomba (caldera 15HP).....	63
15.	Diagrama de flujo del sistema de vapor	77
16.	Evaluación del sistema actual.....	79
17.	Automatización del proceso de purga	83
18.	Diagrama de flujo procedimiento adición del químico al tanque de almacenamiento de agua de la caldera actual	84
19.	Diagrama de equipo red de retorno de condensado	91
20.	Diagrama de equipo del sistema de vapor con la caldera de 15 BHP.....	93
21.	Comparación consumo de combustible	95

TABLAS

I.	Equipos actuales en la planta farmacéutica que requieren vapor.....	3
II.	Mecanismos de transferencia de calor	11
III.	Equipos farmacéuticos con requerimiento de vapor	18
IV.	Tipos de combustibles	29
V.	Costos y capacidades caloríficas de algunos combustibles	30
VI.	Tipos de trampas de vapor	37
VII.	Longitud equivalente de algunos accesorios	41
VIII.	Parámetros de control agua de alimentación.....	46
IX.	Consumo energético por equipo	58
X.	Requerimiento total de energía.....	58
XI.	Resultados del análisis de agua para la caldera del sistema inicial.....	59
XII.	Calibración del nivel de Diésel en el tanque de almacenamiento	60
XIII.	Consumo de combustible diario del sistema inicial.....	61
XIV.	Consumo de diésel con el economizador instalado (sistema actual)....	62
XV.	Curva de calibración de la bomba (caldera 15HP).....	63
XVI.	Producción de vapor sistema actual, corrida 1 (todos los equipos trabajando).....	64
XVII.	Producción de vapor sistema actual, corrida 2 (todos los equipos trabajando).....	65
XVIII.	Producción de vapor sistema actual, corrida 1 (economizador)	66
XIX.	Producción de vapor sistema inicial, corrida 2 (economizador)	67
XX.	Cotización calderas pirotubulares	68
XXI.	Cotización calderas propuestas	69
XXII.	Proyección consumo de combustibles según las diferentes calderas propuestas	69
XXIII.	Diseño red de vapor diámetro mínimo	70
XXIV.	Propiedades fisicoquímicas del vapor saturado.....	70

XXV.	Número de <i>Reynolds</i> , rugosidad relativa y factor de <i>Darcy</i>	71
XXVI.	Caídas de presión de las diferentes líneas que conforman la red de vapor	72
XXVII.	Longitud equivalente según la cantidad de válvulas de globo y compuerta existentes en las diferentes líneas de la red de vapor	73
XXVIII.	Longitud equivalente según la cantidad de válvulas <i>check</i> existentes en las diferentes líneas de la red de vapor	73
XXIX.	Longitud equivalente según la cantidad de codos a 90° existentes en las diferentes líneas de la red de vapor	74
XXX.	Longitud equivalente según la cantidad de codos T estándar existentes en las diferentes líneas de la red de vapor	74
XXXI.	Longitud equivalente total de las diferentes líneas que conforman la red de vapor	75
XXXII.	Análisis de VPN de las calderas propuestas	75
XXXIII.	Análisis de TIR de las calderas propuestas	76
XXXIV.	Ecuación lineal curvas de calibración	78
XXXV.	Kilogramos de vapor producidos	78
XXXVI.	Requerimiento de vapor	79
XXXVII.	Análisis económico de las tres opciones diferentes de calderas propuestas	80
XXXVIII.	Características de la caldera a proponer según análisis económico, opción 3	80
XXXIX.	Análisis del agua de alimentación a la caldera de 15HP	82
XL.	Programa de mantenimiento preventivo de los equipos involucrados en el sistema de vapor	85
XLI.	Programa preventivo de los equipos que conforman la red de vapor ..	89
XLII.	Diámetros de las tuberías que conforman la red de vapor	90
XLIII.	Caídas de presión de las diferentes líneas del circuito de vapor	90
XLIV.	Diámetros de las tuberías que conforman la red de condensado	92

XLV.	Caídas de presión de las diferentes líneas del sistema de condensado	92
XLVI.	Códigos del diagrama de equipo del sistema de vapor	93
XLVII.	Visitas del economizador	96
XLVIII.	Dimensiones del economizador para caldera de 15 BHP	97

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Área de una figura
Q	Calor
Q_{cd}	Calor por conducción
Q_{cv}	Calor por convección
Q_{rd}	Calor por radiación
ΔE_K	Cambio en la energía cinética del sistema
ΔE_p	Cambio en la energía potencial del sistema
ΔT	Cambio de temperatura
C_p	Capacidad calorífica de un fluido
Q	Caudal
h	Constante de convección
σ	Constante de Stephan-Boltzman
k	Constante de conductividad
D	Diámetro
ρ	Densidad de un fluido
e	Eficiencia del sistema
ϵ	Emisividad
E_f	Energía final del sistema
E_o	Energía inicial del sistema
U	Energía interna
E_{neta}	Energía neta transferida al sistema
H	Entalpía
ha	Entalpía del agua

h_v	Entalpía del vapor a la presión de la caldera
L_e	Longitud equivalente
M_a	Masa de agua alimentada a la caldera
M_c	Masa de combustible utilizado
m	Masa de un fluido
Re	Número de Reynolds
C_{pc}	Poder calorífico del combustible
P	Presión
B/C	Relación beneficio costo
ε	Rugosidad de una tubería
TIR	Tasa de retorno
W	Trabajo
VPN	Valor presente neto
v	Velocidad
ϑ	Viscosidad cinemática de un fluido
μ	Viscosidad dinámica de un fluido
V	Volumen

GLOSARIO

Cabezal	Clase especial de tubería de distribución porque puede recibir vapor de una o varias calderas al mismo tiempo. Por lo general, es una tubería horizontal a la que se le alimenta de vapor por la parte superior y al mismo tiempo se alimentan las tuberías principales de distribución.
Caldera	Máquina de producción de vapor de agua por medio de transferencia de calor por conducción, la cual utiliza como medio de calentamiento gases de combustión.
Sistema eficiente	Medida de desempeño de los equipos, que busca utilizar los medios disponibles de manera racional, con el fin de obtener una optimización de los recursos y disminución de costos.
Potencia	Cantidad de trabajo que se realiza a determinado tiempo o puede definirse también como el cambio de energía que demora la concreción de un trabajo.

Sistema HVAC	Es un sistema de ventilación y climatización. Su finalidad es la de proporcionar al usuario un ambiente interior cuya temperatura, tasa de humedad relativa y purificación del aire sean confortables.
Rentabilidad	Relación existente entre los beneficios que proporciona una determinada operación y su inversión, expresado en porcentaje.
Temperatura	Es una magnitud escalar que mide la cantidad de energía térmica que tiene un cuerpo.
Trampas de vapor	Es una válvula automática que elimina el condensado, aire y otros gases no condensables de las tuberías de vapor y equipos que trabajan con el mismo, impidiendo simultáneamente la pérdida de vapor en el sistema de distribución.
Vapor <i>flash</i>	Se forma a partir del condensado de alta temperatura o presión, se expone a una gran caída de presión, tal como la descarga de una trampa de vapor.
PPG protective	Pintura utilizada para recubrir tuberías, con el fin de proteger y aumentar resistencia ante la corrosión.

RESUMEN

La finalidad del presente estudio es rediseñar un sistema de vapor eficiente para la nueva planta de producción de un laboratorio farmacéutico, actualmente se encuentra trabajando con una caldera pirotubular de 15HP, sin retorno de condensado; pero con la remodelación e instalación del sistema de acondicionamiento de aire HVAC el consumo de combustible por parte de la caldera ha aumentado, que incrementa costos de operación; razón por la que se requiere encontrar una solución rentable para disminuir el consumo de combustible; así mismo, se cuestiona la capacidad de la caldera con respecto al gasto energético actual.

Partiendo del objetivo principal, se dimensionará y seleccionará el generador de vapor conveniente tomando en cuenta todas las cargas energéticas por cada equipo, así como las pérdidas térmicas en todo el sistema de vapor, que cumple con todas las normas internacionales de diseño y seguridad; se realizará un análisis económico para determinar la opción más rentable para el proyecto. En el diseño e instalación de la red de vapor, se tomarán en cuenta el caudal de vapor para seleccionar el diámetro de tubería conveniente, que incluye las pérdidas de presión por fricción en la tubería. Se propondrá el diseño e instalación de un economizador en la chimenea de la caldera actual, como solución al ahorro de combustible y disminución de costos de operación. El análisis económico, se realizará a partir de un comparativo entre las diferentes marcas disponibles dentro del mercado nacional, en el cual se incluirá además de la eficiencia de los equipos, los costos de inversión y de mantenimiento.

OBJETIVOS

General

Proponer un diseño que aumente la eficiencia del sistema de vapor actual, mediante el dimensionamiento de una nueva caldera si es necesaria y el rediseño de la red de distribución.

Específicos

1. Dimensionar una caldera pirotubular que cumpla con el requerimiento energético y económico dentro de la nueva planta.
2. Proponer un programa preventivo que incluya el tratamiento químico del agua de alimentación a la caldera y el mantenimiento mecánico de los distintos elementos del sistema de vapor.
3. Diseñar una red eficiente de tubería de manera que permita la recuperación del condensado.
4. Proponer e implementar una solución para disminuir el consumo de diésel de la caldera en el sistema actual.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento y el crecimiento industrial se vieron estancados por años en la Edad Media, pero con el Renacimiento vino la evolución del pensamiento científico y con esto una serie de cambios como la llamada Revolución Industrial iniciada a mediados del siglo XVIII, en la cual ocurrió uno de los descubrimientos más importantes para la industria, la creación de las máquinas de vapor y con ello una nueva ciencia, la termodinámica.

Actualmente, el vapor de agua viene siendo el fluido térmico más ampliamente usado, gracias a un conjunto de características singulares que le convierten en prácticamente insustituible; entre ellas pueden mencionarse: materia prima barata y de elevada disponibilidad, amplio rango de temperaturas de empleo, fácilmente transportado por tuberías, sin olvidar su elevado calor latente y su baja densidad, hacen que el vapor de agua sea altamente efectivo en las operaciones de calentamiento.

Una de las aplicaciones de mayor demanda actual, es la instalación de sistemas de vapor en plantas de producción de productos alimenticios, farmacéuticos, entre otros, constituidos por generadores de vapor conocidos comúnmente como calderas y que además incluyen accesorios, tuberías, aislantes, bombas, tratamiento de agua, etc. De esta aplicación se partirá, para realizar el proyecto que se presentará a continuación, que busca diseñar una red de vapor eficiente que sea rentable para la empresa farmacéutica en cuestión.

1. MARCO CONCEPTUAL

1.1. Antecedentes

La industria alimenticia y la farmacéutica se encuentran actualmente reguladas a partir de normas y reglamentos con los cuales deben cumplir a cabalidad; de estas dos industrias la farmacéutica es la más estricta en el sentido de que se le exige mayores parámetros de control, por ejemplo: humedades y temperaturas específicas en áreas de producción.

Las regulaciones con las cuales una empresa farmacéutica debe cumplir son: el *Reglamento técnico centroamericano* (RTCA) y el informe 32; las Farmacopeas de Estados Unidos (USP) y la europea entre otras no son de carácter obligatorio dentro del país; en general, estos reglamentos velan tanto por la calidad del producto como por la seguridad del consumidor. La empresa inició la construcción de una planta de producción nueva con mayor capacidad, la ampliación de la planta permitió la compra de equipos nuevos; por tal razón, la demanda de vapor aumentó y se tiene la necesidad de diseñar un nuevo sistema más eficiente.

Con los años se han realizado diferentes estudios, investigaciones e inclusive manuales que buscan armar una instalación efectiva a nivel económico y energético.

Pueden considerarse como ejemplo a lo descrito anteriormente los siguientes estudios de investigación:

En febrero de 2012, la estudiante de la Escuela de Ingeniería Química, Heidi Andrea Lara Molina, presentó el siguiente estudio: *Propuesta para incrementar la eficiencia del sistema de vapor en una planta de fabricación de productos cosméticos*. Por medio de este estudio se desarrolló una línea de retorno de condensado, con el objetivo de mejorar la eficiencia del sistema de vapor.

En el año 2011, Pedro José Fonseca Maldonado, estudiante de ingeniería mecánica industrial de la Universidad San Carlos de Guatemala, presentó el trabajo de graduación titulado: *Diseño de la red de distribución de vapor para una lavandería industrial*; se realizó un análisis del sistema de vapor que poseía la planta y se determinó la necesidad de una nueva caldera, junto con un análisis acerca de la selección del combustible basado en la confiabilidad de la calidad, limpieza, disponibilidad y facilidad de control.

En 2007, el estudiante de ingeniería mecánica industrial, de la universidad San Carlos de Guatemala, Pedro Luis Godoy Gálvez, presentó el estudio de investigación titulado: *Ahorro energético en sistemas de vapor, ventilación y aire acondicionado en una empresa productora de cigarrillos*; a partir de dicho estudio se determinaron: las formas adecuadas para una buena utilización del vapor, comenzando por un análisis del tamaño que deben tener las tuberías que conducen el mismo y se establecieron procedimientos que conducen a la buena utilización de la energía, entre ellas rutinas de mantenimiento de los equipos, programas de capacitación, entre otras.

1.2. Justificación

Actualmente, el laboratorio farmacéutico cuenta con una caldera marca Fulton de 15 Hp, la cual es la encargada de suministrar vapor a la planta, con la reciente remodelación y la adquisición de los nuevos equipos, la necesidad energética que debe suplir la caldera es la siguiente:

Tabla I. **Equipos actuales en la planta farmacéutica que requieren vapor**

Equipo	Capacidad	Cantidad	Descripción
Autoclave	500L	1	<ul style="list-style-type: none">• Presión de trabajo = 0.45 bar• Consumo de vapor (para alcanzar la ebullición), es de: 100 Kg vapor / h y para mantener la ebullición es de 20 Kg/h.• Fabricante: Zanussi.• Medidas externas: 1,3m x 1,43m x 0,950m
Marmita	500 L	1	<ul style="list-style-type: none">• Consumo de vapor: 90 Kg vap / h• Dimensiones exteriores: 1,4x1,2x910 (mm).• Recipiente interior: 1,5 x 950 x 700 (mm)• Presión máxima: 1.5 Kg/cm²
Marmita	1000 L	1	<ul style="list-style-type: none">• Consumo de vapor: 170 Kg vap / h• Dimensiones exteriores: 1,7 x 1,43x 965 (mm)• Recipiente interior: 1,25 x 700 x 600 (mm)
Sistema HVAC	-	4	<ul style="list-style-type: none">• Cada unidad, se conoce como manejadora, en total hay 4, con una carga térmica total de: 50,4 KW.

Fuente: elaboración propia.

1.3. Determinación del problema

A continuación, se determinan las principales razones para el desarrollo de un nuevo sistema de vapor en una planta farmacéutica.

1.3.1. Definición

La cantidad de vapor producida por la caldera pirotubular actual de 15 hp, no es suficiente para la cantidad de equipos instalados y el sistema de acondicionamiento de aire (HVAC) en la nueva planta, para que la planta trabaje correctamente es necesario que a cada equipo se le suministre la cantidad de vapor con la que fue diseñado y para esto se necesita aumentar la generación de vapor. Actualmente, se estima que la planta tiene una necesidad de suplir 43 HP de energía, tomando en cuenta los equipos mencionados en la tabla 1. Se diseñará e implementará un economizador en la chimenea de gases de combustión con la intención de disminuir la cantidad de combustible que utiliza la caldera actual de 15 hp.

1.3.2. Delimitación

El presente proyecto involucra la realización de varios diseños e implementaciones para el nuevo sistema de vapor que presenta la nueva planta farmacéutica, que buscará cumplir con la calidad de aire dentro de las áreas de procesos según estipulan los reglamentos nacionales e internacionales, cabe mencionar: el diseño de un nuevo sistema para la distribución de vapor, la implementación de un programa preventivo para el nuevo sistema de vapor, el diseño de una red de condensados, que permita el aprovechamiento del calor recuperado después de su utilización y el diseño e implementación de un economizador en la chimenea de gases de combustión de la caldera actual.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Termodinámica

Proviene de las palabras griegas *therme* (calor) y *dynamis* (fuerza), es una rama de la física que hace foco en el estudio de los vínculos existentes entre el calor y las demás variedades de energía. Analiza, por lo tanto, los efectos que poseen a nivel macroscópicos las modificaciones de temperatura, presión, densidad, masa y volumen en cada sistema.

2.2. Primera ley de la termodinámica

Su definición se deriva de la expresión del principio de conservación de la energía, este expresa que durante una interacción la energía puede cambiar de una forma a otra, pero su cantidad total permanece constante. La primera ley de la termodinámica relaciona el trabajo y el calor transferido intercambiado en un sistema a través de una nueva variable termodinámica, la energía interna. Dicha energía ni se crea ni se destruye, sólo se transforma.

La ecuación 1 establece que el cambio de la energía interna de un sistema, es la suma del intercambio de calor entre el sistema y los alrededores, y el trabajo realizado sobre (o por) los alrededores.

$$\Delta U = Q - W \quad [Ecuación No. 1]$$

Donde:

- ΔU = cambio de energía interna (J)
- Q = calor absorbido o cedido según sea el caso (J)
- W = trabajo (J)

Durante un ciclo, la trayectoria por la cual pasa el sistema atraviesa una serie de procesos y vuelve finalmente a su estado inicial. Debido a que los estados iniciales y el final del sistema representan la misma posición, los valores de sus propiedades no cambian. El valor del cambio de energía en el sistema es cero.

2.3. Entalpía

La entalpía también se conoce como entalpía absoluta o cantidad de calor; la variación de la entalpía de un sistema termodinámico permite expresar la cantidad de calor intercambiado durante una transformación isobárica, es decir, a presión constante.

La entalpía se define como el contenido de energía interna de una sustancia más la energía resultante del trabajo que ha actuado sobre la misma. En un proceso de flujo, esta energía de trabajo se debe a la fuerza que ha hecho fluir la sustancia, producto de la presión por el volumen. Por lo tanto, se tienen las siguientes relaciones:

$$H = U + PV \qquad \qquad \qquad [Ecuación No. 2]$$

Donde:

- H = entalpía (J)
- P = presión (Pa)
- V = volumen (m^3)

2.4. Segunda ley de la termodinámica

Representa los siguientes enunciados:

- Todo proceso reversible requiere una compensación de energía, la cual fue perdida por el sistema.
- Ningún equipo puede funcionar de tal modo que su único efecto sea convertir todo el calor absorbido por el sistema en trabajo hecho por el sistema.
- El calor jamás fluye espontáneamente de un objeto frío a un objeto caliente.

Cuando dos sistemas se encuentran en diferentes estados, existe un potencial de generar trabajo al pasar estos de sus estados iniciales a un estado de equilibrio mutuo. La segunda ley de la termodinámica permite determinar el trabajo máximo teóricamente obtenible de dicho proceso y evaluar los factores que reducen este valor.

“Una máquina térmica, cuya operación es en ciclos, intercambia energía por transferencia de calor con otros sistemas y genera trabajo.

En una máquina térmica no toda la energía que le es transferida por calor puede ser convertida a trabajo: parte de esta energía es transferida fuera del sistema a una temperatura inferior. La eficiencia térmica de una máquina térmica se define como la proporción entre el trabajo neto generado y la energía total transferida hacia el sistema.

$$n = \frac{W_{ciclo}}{Q_e} = 1 - \frac{Q_s}{Q_e} \quad [\text{Ecuación No.3}]$$

Donde:

- Q_e = calor de entrada en el ciclo
- W_{ciclo} = trabajo realizado por el ciclo
- Q_s = calor de salida en el ciclo

La eficiencia térmica de un ciclo termodinámico de potencia irreversible siempre es menor que la de un ciclo termodinámico de potencia reversible operando ambos entre las mismas temperaturas.

Todos los ciclos termodinámicos de potencia reversibles operando entre las mismas temperaturas tienen la misma eficiencia térmica¹.

2.5. Balances de energía

Un balance de energía es un análisis energético de un sistema ya sea cerrado o abierto, que permite determinar la transferencia neta de energía:

$$E_{Neta} = E_f - E_0 \quad [\text{Ecuación No. 4}]$$

¹ RODOREDA A. *Análisis exergético de una central termoeléctrica de ciclo de vapor*, de: http://catarina.udlap.mx_dl.com.

Donde:

- E_{neta} = energía neta transferida al sistema
- E_f = energía final del sistema
- E_o = energía inicial del sistema

Por lo tanto, tomando en cuenta todas las formas de energía y la primera ley de la termodinámica se tiene la siguiente ecuación:

$$\Delta U + \Delta E_K + \Delta E_P = Q - W \quad [\text{Ecuación No. 5}]$$

Donde:

- ΔE_K = cambio en la energía cinética (J)
- ΔE_P = cambio en la energía potencial (J)

Para un sistema cerrado, el balance de energía queda constituido por la siguiente relación:

$$\Delta U = Q \quad [\text{Ecuación No. 6}]$$

Para un sistema abierto el balance de energía queda determinado por:

$$\Delta H = Q \quad [\text{Ecuación No. 7}]$$

2.6. Eficiencia térmica

Se refiere a la cantidad de energía contenida en el vapor generado respecto a la cantidad de energía suministrada en forma de combustible a la caldera.

Es una medida del aprovechamiento del combustible para generar una cierta cantidad de vapor. A partir de la segunda ley de la termodinámica se determinó que no es factible una máquina de vapor que trabaje sin pérdidas de calor, por lo que se concluye que la eficiencia de una caldera será menor al 100 %; pero con las prácticas adecuadas de operación y mantenimiento pueden reducirse las pérdidas.

La eficiencia de una caldera puede determinarse a partir de la siguiente expresión:

$$e = \frac{Ma*(h_v-h_a)}{Mc*Cpc} * 100\% \quad [Ecuación No.8]$$

Donde:

- e = eficiencia caldera (%)
- Ma = masa de agua alimentados a la caldera (Kg)
- h_v = entalpía del vapor a la presión de la caldera (KJ/Kg)
- h_a = entalpía del agua (KJ/Kg)
- Mc = masa de combustible utilizado (Kg)
- Cpc = poder calorífico del combustible (KJ/Kg)

2.7. Transferencia de calor

El calor es una forma de energía transitoria que es consecuencia del movimiento relativo de las moléculas en un cuerpo o sustancia.

Entre las aplicaciones industriales se tienen los intercambiadores de calor, equipos generalmente metálicos por medio del cual dos fluidos pasan a través del mismo sin mezclarse entre sí; hay una pared que los separa y permite la transferencia de calor por convección y conducción entre ambos fluidos. Estos equipos deben cumplir las leyes de conservación y transferencia de energía:

$$Q = m * Cp * \Delta T \quad [Ecuación No. 9]$$

2.8. Mecanismos de transferencia de calor

La transferencia de calor puede ocurrir por medio de tres mecanismos diferentes, los cuales se describen resumidamente en la siguiente tabla:

Tabla II. Mecanismos de transferencia de calor

Mecanismo	Descripción	Ecuación que lo describe
Convección	Es un mecanismo constituido por el movimiento de las partículas de un fluido como consecuencia de la diferencia de densidad entre moléculas al haber una diferencia de temperaturas.	Ley de Newton $Q_{cv} = h * A * (Tc - Tf)$ [Ecuación No. 10]
Conducción	Mecanismo de transferencia de calor que se da en el seno de un sólido, ocurre por medio de dos submecanismos que son la vibración reticular que constituye cerca del 90 % y la migración electrónica que constituye el restante 10 %.	Ley de Forier $Q_{cd} = k * A * \frac{dT}{dX}$ [Ecuación No. 11]
Radiación	Mecanismo de transferencia de calor que no requiere la intervención de un medio y el calor puede ser transmitido a través del vacío absoluto, pero puede ocurrir en los tres estados de la materia. Se basa en la energía emitida por los cuerpos con temperaturas mayores al cero absoluto a determinada longitud de onda.	Estefan-Boltzman $Q_{rd} = A_s * \sigma * \epsilon * (T_{cc}^4 - T_{cf}^4)$ [Ecuación No. 12]

Fuente: elaboración propia.

2.9. Intercambiadores de calor

Es un dispositivo construido generalmente de metal y por medio del cual dos fluidos pasan a través del mismo sin mezclarse entre sí, tiene una pared que los separa, permite la transferencia de calor entre ambos fluidos a su paso por el dispositivo. Los intercambiadores de calor hacen que un fluido se caliente mientras que el otro se enfría y se construyen bajo el principio de idealidad, de que el intercambiador como sistema, es adiabático (no pierde calor a los alrededores).

2.10. Economizadores

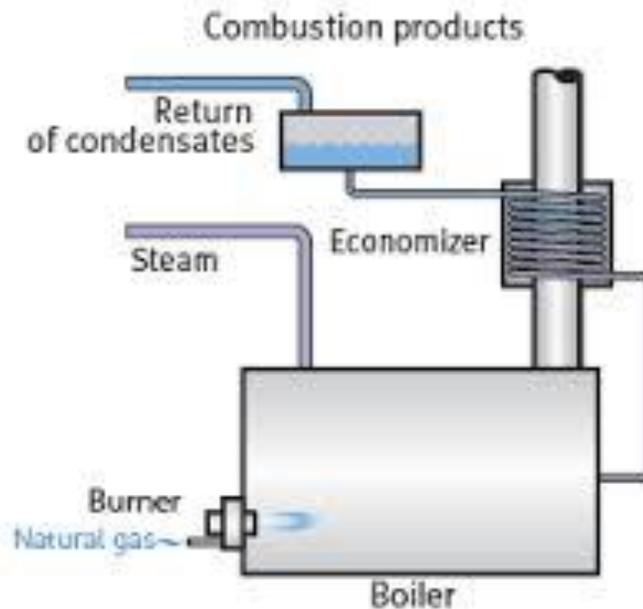
Es básicamente un intercambiador de calor que se coloca en la chimenea de una caldera para transferir el calor contenido en los gases de combustión al agua de alimentación a la caldera, permite teóricamente ahorros de combustible de alrededor del 5 %. El agua de alimentación para calderas de vapor se somete a un tratamiento químico y térmico y se acondiciona conforme a la normativa legal vigente, canalizándose hacia el economizador a 103 °C (totalmente desgasificada) o a 90 °C (parcialmente desgasificada).

El agua enfría el flujo de gases de combustión, calentándose a consecuencia de ello. Una reducción de la temperatura de gases de combustión de 260 °C a 120 °C reduce las pérdidas a través de los gases de combustión en un 6 %. Una caldera de vapor con este economizador necesita en el punto de carga hipotético un 6 % menos de combustible para el caudal de vapor generado. El calor extraído del flujo de gases de combustión se alimenta en la caldera a través del agua de alimentación calentada.

Los economizadores poseen las siguientes características:

- Se incrementa la eficiencia térmica de la caldera lo que redondea en un ahorro de combustible entre un 4 % – 7 %.
- Se reduce en un 5 % la emisión de gases efecto invernadero.
- Los cambios en la demanda pueden alcanzarse más rápidamente gracias a la mayor temperatura del agua de alimentación.
- Fácil de instalar.

Figura 1. **Ejemplo de un economizador**



Fuente: Martínez J. (2012). *Calderas industriales eficientes*. P65

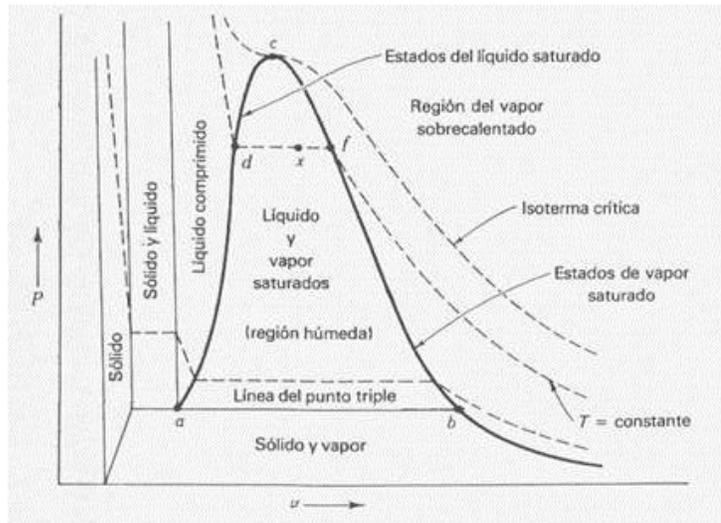
2.11. Comportamiento del agua y estados del vapor

En una instalación de vapor, es importante conocer los diferentes estados que puede presentar el agua confinada en una red de generación y distribución de vapor, así como las características que definen a cada uno de estos estados.

Inicialmente se pueden definir dos estados básicos: líquido o vapor, el estado líquido se puede subdividir en dos situaciones: la primera ocurre cuando el agua líquida se encuentra por debajo de la temperatura de ebullición, en este caso se le denomina líquido subenfriado y cuando se encuentra por arriba del punto de ebullición se habla de líquido saturado. A su vez el estado de vapor puede subdividirse en dos situaciones: cuando el vapor se encuentra a la temperatura de ebullición se le conoce como vapor saturado y cuando se encuentra por encima del punto de ebullición se le denomina vapor sobre saturado, para poder ver mejor las características del vapor y su comportamiento con variables como la presión, el volumen, la temperatura; existen gráficos que permiten su mayor comprensión. Las características del vapor son de suma importancia, en el momento de diseñar una red de distribución de vapor, dependiendo de que tipo de vapor se este utilizando así tendrá que ser el calibre de la tubería, el material, se deberá calcular la presión máxima que la tubería soportará.

El tipo de vapor que se esté manejando dependerá específicamente de dos variables la temperatura (T) y la presión (P) a la cual se esté trabajando. A continuación, se muestra el diagrama P-V del agua.

Figura 2. Curva de saturación líquido vapor (P-V)

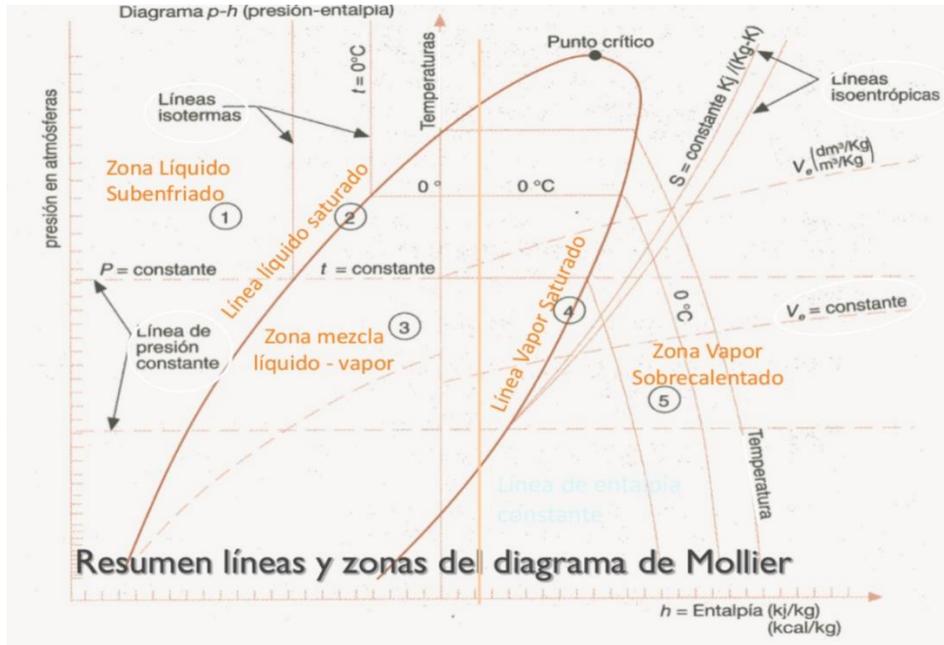


Fuente: Cengel Yunus A. Diagramas de propiedades para procesos de cambio de fase. P118

A partir de la figura 1 es posible observar el punto crítico, en el cual, por encima de la temperatura de este punto, no es posible obtener el cambio de fase mediante la variación de presión a temperatura constante. Se localiza aproximadamente a 374 °C y 221 bar de presión absoluta. Cada punto del diagrama está caracterizado por un contenido energético en términos de entalpía específica y que se encuentra en función de la temperatura y presión.

Existe una serie de diagramas termodinámicos a parte del diagrama P-V, descrito anteriormente que permiten obtener propiedades termodinámicas del agua, como el diagrama de Mollier; este diagrama representa a la entalpía frente a la entropía como se observa a continuación:

Figura 3. Diagrama de Mollier



Fuente: Juana de Castilla y León. *Diagrama de Mollier*. P. 99.

2.12. Diseño de un sistema de vapor

El empleo del vapor como fluido térmico lleva implícito un esquema básico que consiste en un punto de generación, un punto de utilización y entre ellos debe disponerse de una red de tuberías que los enlazan y son el medio de transporte de un punto al otro.

Para la instalación de una red de vapor, debe tomarse en cuenta:

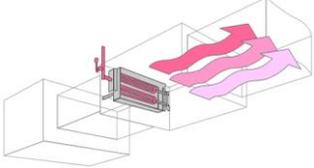
- El tipo de caldera a utilizar.

- Selección de la presión de trabajo: la caldera debe operar a una presión superior a la deseada al final de cada una de las líneas de vapor, para que se pueda absorber una caída de presión a lo largo de la tubería.
- Diámetro de las tuberías.
- Accesorios.
- Drenaje de condensado y trampeo.
- Expansión térmica de la tubería.
- Pérdida de calor en la red.
- Pérdidas de carga.

2.13. Equipos que utilizan vapor en la industria farmacéutica

Existen dos tipos de vapor: industrial y farmacéutico; el primero es el vapor producido en calderas, utilizado como servicio y que no va a estar en contacto directo con el producto; y el segundo es vapor producido a partir de agua tratada, libre de aditivos volátiles, usada básicamente para procesos de esterilización de productos, material de acondicionamiento o equipos de proceso con los que entra en contacto.

Tabla III. Equipos farmacéuticos con requerimiento de vapor

Nombre	Equipo	Descripción
Autoclaves		<p>Sirve para esterilizar material de laboratorio, utilizando vapor de agua de alta presión y temperatura; de tal manera que coagula las proteínas de los microorganismos.</p>
Marmitas		<p>Es un equipo cilíndrico que posee un enchaqueta miento de vapor y un agitador, permite el calentamiento de mezclas.</p>
Humidificador de vapor		<p>Los humidificadores de vapor aportan humedad en las áreas si el ambiente lo necesita.</p>
Equipos de limpieza		<p>Se utilizan para limpieza de las líneas de embotellado, incluyendo áreas de trabajo.</p>
Secador de tambor rotatorio de intercambio indirecto	 <p>Los Secadores Rotatorios en la Industria Química</p>	<p>Son secadores que calientan el flujo de aire a partir de un intercambiador de calor; el vapor no tiene contacto directo con el producto.</p>

Fuente: elaboración propia.

2.14. Generadores de vapor

Para generar vapor a escala mayor, es necesario armar un sistema capaz de almacenar agua que se ha transformado en vapor, una fuente de calor que pueda elevar su temperatura a ebullición, una superficie metálica que permita la transferencia de calor y una zona destinada al almacenamiento del vapor generado. Entre sus aplicaciones a nivel industrial se encuentran las calderas.

2.15. Calderas

Es un aparato que trabaja a presión en donde el calor procedente de cualquier tipo de energía se transforma en utilizable, a través de un medio de transporte, en este caso, vapor de agua.

2.16. Funcionamiento de las calderas

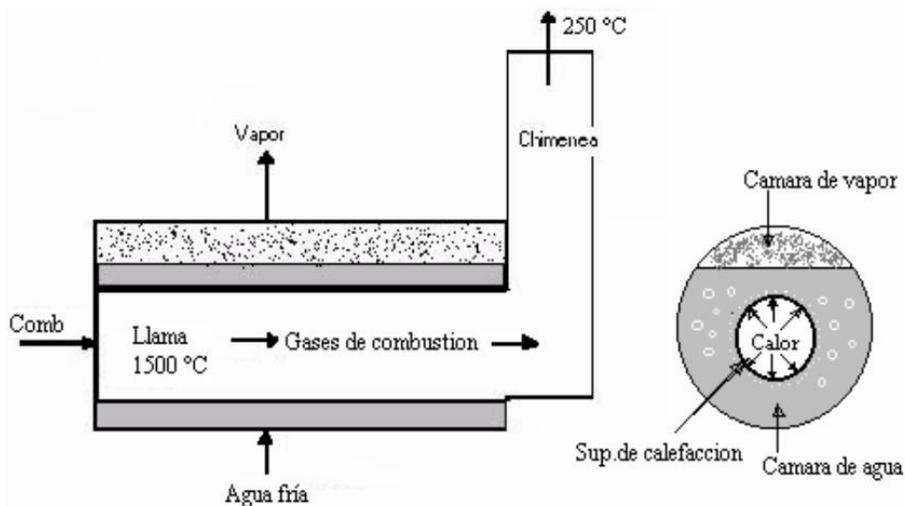
Las calderas de vapor reciben el agua de alimentación que está constituida por dos corrientes, una de agua nueva y una segunda corriente de agua recirculada, que vuelve de la instalación a partir de los condensados de vapor; como parte de un manejo eficiente de recursos energéticos podría tomarse el retorno de gases de combustión.

En el interior del sistema el agua de alimentación cambia de fase a vapor saturado o sobrecalentado según sea la exigencia de energía y la presión de salida de la caldera.

Si no se efectúa una desconcentración sistemática denominada purga o extracción, las impurezas se irán concentrando, cada vez más, en la fase líquida, por lo que será necesario verter al desagüe.

Cualquiera que sea el tipo de caldera que se considera, todas cumplen el mismo mecanismo y función, que se observa en el siguiente diagrama:

Figura 4. **Esquema de una caldera elemental de vapor**



Fuente: MARKS J. *Calderas industriales*. p. 9-108

2.17. Tipos de calderas

Las calderas se clasifican en función del paso del fluido que en este caso puede ser afuera o a través de los tubos de intercambio. Comúnmente existen dos tipos de calderas de vapor que suelen utilizarse: calderas piro-tubulares (tubos de humo), calderas acuotubulares (tubos de agua) y tubulares.

2.18. Calderas piro-tubulares

Calderas en las que los gases de combustión circulan por el interior de los tubos y el líquido se encuentra en un recipiente atravesado por dichos tubos. Son de aplicación principalmente cuando la presión de trabajo es menor a los 22 bar.

Generalmente, las calderas pirotubulares trabajan con un tiro forzado, el cual se obtiene mediante la utilización de vapor de escape de la máquina.

En las calderas pirotubulares, el combustible es quemado debajo del casco y los gases se orientan para entrar en los tubos que se encuentran en el interior del tambor de agua, haciendo su recorrido en uno o más pasos. El vapor sale por la parte superior del tambor y la entrada de agua está generalmente $2/3$ de la altura de los tubos.

El tope práctico de presión es de 250 psig con una producción de hasta 25 000 Lb/h, lo cual hace que este tipo de calderas sea recomendable para servicios donde la demanda de vapor es relativamente pequeña y no se requiere la aplicación de turbinas.

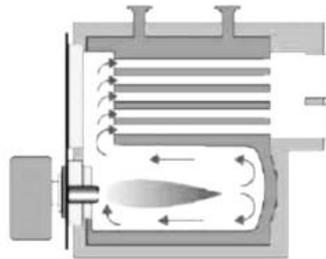
Las calderas pirotubulares pueden estar orientadas de manera horizontal o vertical y pueden clasificarse en función del número de haces tubulares en:

- Calderas de dos pasos de gases

Se distinguen dos vías de circulación de los productos de la combustión. Los gases de combustión se producen en el quemador que está situado en la parte posterior de la cámara de combustión (hogar) y fluyen en sentido inverso a través del hogar volviendo hacia el núcleo de la llama por la zona exterior de la misma hasta la zona delantera de la caldera para introducirse en los tubos del segundo paso de humos.

Las calderas que se basan en este principio se caracterizan por su bajo rendimiento y alto contenido de sustancias contaminantes en sus gases de combustión.

Figura 5. **Caldera pirotubular de dos pasos de gases**

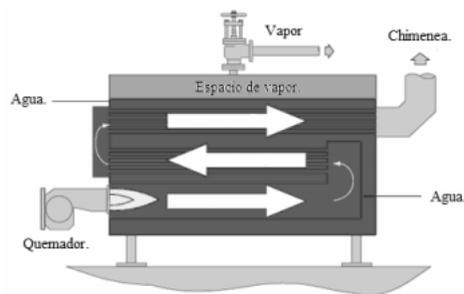


Fuente: Martínez A. Calderas industriales eficientes. P 80.

- **Calderas de tres pasos de gases**

En este diseño se distinguen tres vías de paso autónomo de sentido único de circulación de los productos de combustión, que se producen en el hogar ubicado en la parte posterior de la cámara de combustión; los gases pasan por los tres pasos de humos hasta el conducto de expulsión de gases, por el que se evacuan al exterior, se caracterizan por su alto rendimiento, así como por el bajo contenido de sustancias contaminantes en sus gases de combustión.

Figura 6. **Detalle de caldera de triple paso de humos**



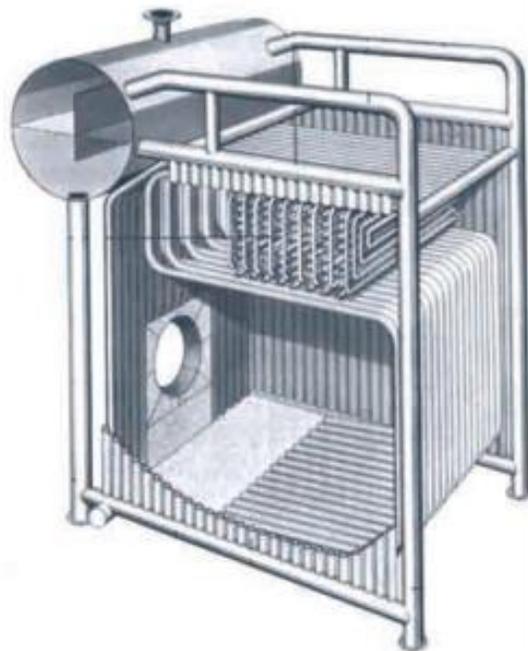
Fuente: Martínez. Calderas industriales eficientes. p 71.

2.19. Calderas acuotubulares

Calderas en las que el fluido de trabajo se desplaza por el interior de tubos durante su calentamiento y los gases de combustión circulan por el exterior de estos. Son de aplicación cuando se requiere una presión de trabajo por encima de los 22 bar.

Las calderas acuotubulares usualmente presentan una carga térmica por superficie de calefacción superior, lo que aumenta la sensibilidad a la calidad del agua, por lo cual la normativa vigente exige condiciones más restrictivas para el agua de alimentación de estos equipos.

Figura 7. **Detalle caldera acuotubular**



Fuente: Martínez. Calderas industriales eficientes. p 72.

2.20. Dimensionamiento de las calderas

La potencia de una caldera se puede expresar en cantidad de vapor generado en una hora, esto dependerá de la superficie total de calefacción. A mayor superficie de calefacción se tiene más vapor y, por lo tanto, mayor potencia. La potencia se mide normalmente en kilogramo de vapor producido en una hora por metro cuadrado de superficie de calefacción ($\text{Kg}^*\text{h}/\text{m}^2$).

Para determinar el tipo de caldera que va a utilizarse es necesario determinar:

- Determinar el gasto de vapor total necesario para cubrir la demanda energética del sistema diseñado.
- Determinar las pérdidas significativas de calor por convección, conducción o por radiación.
- Determinar la capacidad de la caldera, tomando en cuenta futuras instalaciones de equipos que necesiten una alimentación de vapor.

2.21. Combustión

Reacción rápida de un combustible con el oxígeno, sus productos son: CO_2 , H_2O y posiblemente CO y SO_2 . La importancia de las reacciones de combustión reside en la cantidad de energía que liberan, la cual se utiliza para hervir agua con el fin de producir vapor por medio de calderas.

El vapor producido puede utilizarse ya sea para mover una turbina y producir electricidad o para sistemas de acondicionamiento de aire e incluso para calentamiento de sustancias a través de equipos de transferencia de calor. La combustión puede ser completa o incompleta, esto dependerá de la reacción química, por ejemplo, al analizar la reacción de combustión del metano, se tiene:

- **Combustión completa**

Una combustión es completa cuando todos los componentes del combustible capaces de ser oxidados se oxidan por completo.



- **Combustión incompleta**

Sucede cuando aparecen en los productos trazas o restos de combustible, en forma del propio combustible (C_nH_m) o sus componentes oxidados parcialmente (CO , OH). Produce humos y un menor rendimiento de la operación.



2.22. Análisis de eficiencia en calderas

La eficiencia de una caldera corresponde a la razón entre el calor absorbido por el fluido térmico y el calor liberado en el equipo, la diferencia entre ambas magnitudes corresponderá a las pérdidas de calor del sistema.

La eficiencia de una caldera siempre va a ser menor que la eficiencia de combustión.

Una gran mayoría o prácticamente la totalidad de las plantas que poseen calderas no tienen claridad de la importancia que tiene, en la reducción de los costos operacionales, los ahorros que son posibles de obtener con el incremento de solo un par de puntos de eficiencia como:

- El nivel de exceso de aire: operar al valor de exceso de aire recomendado por el fabricante, reduce la temperatura de los gases de chimenea y el consumo de potencia en el ventilador.
- Temperatura de los gases de chimenea: los gases de combustión deben salir al mínimo de temperatura, como indicación de que se transfirió al máximo la energía liberada durante la combustión, este parámetro va relacionado con el exceso de aire (a mayor exceso de aire mayor temperatura en los gases de combustión).
- Temperatura del agua de alimentación: la eficiencia de la caldera aumenta, al aumentar la temperatura del agua de alimentación, al necesitar menos energía para producir vapor, esto se logra a partir de la recuperación del condensado y a partir del uso de economizadores.
- Suciedad de las superficies de transmisión de calor: la suciedad en la superficie de los tubos, del lado del fuego se traducirá en un aumento de las temperaturas de los gases de combustión y la suciedad en la superficie de los tubos en contacto con el agua, retardará la transmisión de calor y aumentará la temperatura de los tubos, debido al efecto aislante de las incrustaciones.

- Tipo de combustible, este parámetro se discutirá más adelante.

Una manera de conocer que tan eficiente es la combustión de la caldera, es analizando los gases de la chimenea, por medio de cromatografía de gases, analizadores de gases de combustión portátiles, los cuales actúan a partir de un electrodo; o a partir del aparato de Orsat.

2.22.1. Monitorización continua de emisiones

Las regulaciones gubernamentales sobre emisiones de SO_2 y NO_x han impulsado el crecimiento de nuevos sistemas de combustión, así como la nueva instrumentación y los controles electrónicos para mantener las relaciones aire/combustible y emisiones dentro de las restricciones jurisdiccionales.

Otro objetivo es incrementar la tasa térmica por monitorización de los combustibles en el gas, porque la mezcla pobre de aire y combustible en el quemador y en el hogar da como resultado la formación de monóxido de carbono no quemado en los gases de combustión.

Los analizadores de O_2 pueden medir el porcentaje de O_2 en los gases de combustión; esto permite el ajuste fino del proceso de combustión para obtener la mejor relación aire/combustible, aumentando así el rendimiento de la combustión.

Los programas de la EPA (Agencia de Protección Ambiental, Estados Unidos), efectivos desde 1989, exigen un límite de emisión de 0,545 kg de SO_2 por cada 252 000 kcal (106 BTU).

Para calderas de carbón de una producción por encima de 2,52 millones de kcal/hora de potencia. Para calderas por debajo de 18,8 millones de kcal/hora de potencia, la eliminación de SO₂ debe ser adicionalmente del 90 por 100 como mínimo. Las normas de emisión de NO_x se aplican a calderas de leña, carbón y combustibles líquidos. Esto exige que el NO_x este limitado a 0,454 kg por cada 252 000 kcal/hora sin importar el tamaño o potencia de la caldera.

2.23. Tipos de combustibles

En el proceso de combustión se necesita una mezcla adecuada de combustible y de aire. El término inflamabilidad se utiliza para describir la capacidad del combustible para quemarse, o realmente la habilidad para convertirse en gas de forma que la combustión pueda tener lugar. Los elementos fundamentales que producen calor en los combustibles son: el carbón, el hidrógeno y sus compuestos. El azufre, cuando se oxida rápidamente, es también fuente de alguna energía térmica, pero su presencia en los combustibles presenta efectos nocivos, al mezclar el combustible con el aire suelen producirse productos con nitrógeno NO_x.

A continuación, se presentan los diferentes tipos de combustibles más comunes y de mayor accesibilidad en la industria, se tiene contemplado la contaminación que estos producen al ser quemados, como también una breve descripción del combustible en sí.

Tabla IV. Tipos de combustibles

Combustible	Descripción	Contaminación ambiental
Carbón (sólido)	La calidad del carbono puede afectar a la tasa de combustión, existe amplia variedad de carbonos entre ellos, la antracita, carbón bituminoso y semi-bituminoso; el primero es muy duro, tiene un porcentaje de carbono elevado, arde suavemente su poder calorífico es de 14 000 BTU/Lb; el segundo es blando, tiene un porcentaje de materias volátiles elevado, arde con una llama amarilla y fumosa, su poder calorífico es de 14 000 BTU/Lb y el tercero arde con poco humo, es más blando que el antracita.	Es su contenido de azufre, presente en su mayoría como sulfuro de hierro (azufre en forma de piritita) y en los sistemas orgánicos del carbono, algunos de ellos conteniendo el anillo de tiofeno.
Gas oil- Fuel oil (líquido)	Los combustibles líquidos derivados del petróleo poseen viscosidades muy diferentes a los del gas. Los fuel oil son viscosos, además es necesario romper y pulverizar el fuel oil por atomización de forma que el aire pueda combinarse con las finas gotitas de aceite, la temperatura que puede alcanzar en la combustión es menor que la que alcanza el gas.	Es recomendable lavar los gases de chimenea puesto que, los combustibles líquidos si liberar una cantidad significativa de emisiones de CO ₂ , CO y productos con NO _x
Gases combustibles	El gas natural es el principal combustible utilizado en generación de vapor, ya que los gases manufacturados son de coste muy elevado, se producen en menores cantidades, de forma que normalmente se utilizan en los puntos de producción y no se distribuyen. El gas natural es incoloro e inodoro.	Según estudios realizados, se ha logrado demostrar que el gas natural es el combustible que presenta menos contaminación al ambiente al ser quemado.

Fuente: elaboración propia.

Según el Ministerio de Energía y Minas de la República de Guatemala se presentan a continuación los precios de algunos combustibles que se comercializan dentro del país.

Tabla V. **Costos y capacidades caloríficas de algunos combustibles**

No.	Combustible	Capacidad calorífica	Precio (Q/Galón)
1	Carbón mineral	24 200,00 BTU/Kg	1545,6000
4	Fuel oil CIB	150 000,00 BTU/Galón	29,9552
5	Queroseno	134 000,00 BTU/Galón	25,0000
6	Diesel (ACPM)	138 000,00 BTU/Galón	22,0000
7	Gasolina 87-93	115 400,00 BTU/Galón	65,01824
8	Gas natural	35 315,00 BTU/m3	8,78784
9	G.L.P.	92 000,00 BTU/Galón	6,8600

Fuente: <http://www.mem.gob.gt/hidrocarburos/precios-combustible-nacionales/historico-precios-nacionales/>. Consulta: septiembre 2018.

Se ha considerado como una opción rentable al gas licuado de petróleo para la caldera a dimensionar, puesto que es el que menor emisiones de CO₂, CO, SO_x y NO_x promueve al ambiente al ser quemado; su precio en la industria guatemalteca es considerablemente rentable, pero según se avance en el estudio se realizarán comparaciones con el combustible que utiliza la empresa actualmente que es el diésel, para recomendar el combustible que mejor se adapte a las necesidades de la empresa.

2.24. Fundamentos de un circuito de vapor

Es importante comprender desde un principio como funciona un circuito de vapor y condensado. El flujo de vapor en un circuito es debido a la condensación del vapor que provoca una caída de presión.

Con la disminución de la presión se induce el flujo del vapor a través de las tuberías. El vapor generado en la caldera debe ser conducido a través de las tuberías hasta el punto en que se requiere esta energía calorífica. Inicialmente, habrá una o más tuberías principales que transporten el vapor de la caldera en la dirección de la planta. Otras tuberías derivadas de las primeras pueden transportar el vapor a los equipos individuales.

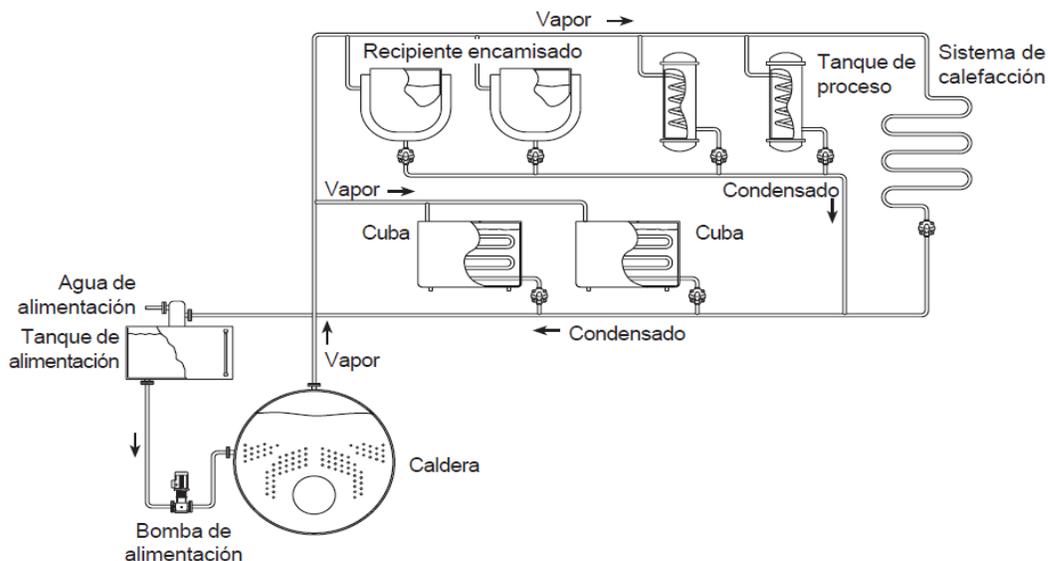
Cuando la válvula de salida de la caldera está abierta, el vapor pasa inmediatamente de la caldera a las tuberías principales. La tubería está inicialmente fría y, por tanto, el vapor le transfiere calor. El aire que rodea las tuberías está más frío que el vapor en consecuencia, la tubería transfiere calor al aire, como el vapor fluye hacia un medio más frío, comenzará a condensar inmediatamente.

En la puesta en marcha del sistema, la cantidad de condensado será la mayor, debido a que el vapor se utiliza para el calentamiento de la tubería fría, a esto se le conoce como: carga de puesta en marcha. Cuando la tubería se haya calentado, aún habrá condensación, ya que la tubería seguirá cediendo calor al aire que la rodea esto se conoce por carga de funcionamiento. El condensado que resulta, va a parar a la parte inferior de la tubería y es arrastrado a lo largo de esta por el flujo de vapor y por la gravedad, debido al gradiente en la conducción de vapor que normalmente disminuirá en la dirección del flujo de vapor. Deberá entonces purgarse el condensado de los puntos bajos de la tubería de distribución.

Cuando la válvula de la tubería de vapor que alimenta a un equipo de la planta está abierta, el flujo de vapor que proviene del sistema de distribución entra a la planta, en este momento hay un flujo continuo de vapor desde la caldera para satisfacer la carga conectada y para mantener este suministro deberá generarse más vapor.

Para lograrlo, será necesario alimentar la caldera con más combustible y bombear más agua a su interior para reemplazar el agua que ha sido evaporada. El condensado formado tanto en la tubería de distribución como en los equipos de proceso, es agua ya caliente y preparada para la alimentación de la caldera. Aunque es importante evacuar el condensado del espacio del vapor, se trata de un elemento demasiado valioso como para permitirse desaprovecharlo. El circuito de vapor básico debe completarse con el retorno del condensado al tanque de alimentación de la caldera, siempre que sea factible.

Figura 8. **Circuito de vapor y condensado**



Fuente: Distribución de vapor, Spirax sarco, 2017. Ref. No. 9

2.25. Vapor *flash*

Se genera cuando se tiene condensado caliente o líquido saturado, presurizado y se libera a una presión más baja. Por lo que parte de este líquido se vuelve a evaporar, es el vapor *flash*.

2.26. Golpe de ariete

Ocurre cuando el condensado, en lugar de ser purgado en los puntos bajos del sistema, es arrastrado por el vapor a lo largo de la tubería y se detiene bruscamente al impactar contra algún obstáculo del sistema. Las gotitas de condensado acumuladas a lo largo de la tubería, con el tiempo forman una bolsa sólida de agua que será arrastrada por la tubería a la velocidad del vapor. Esta bolsa de agua es densa e incomprensible y cuando viaja a una velocidad elevada, tiene una energía cinética considerable.

Parámetros para evitar el golpe de ariete:

- Mantener la velocidad del fluido por debajo de 1,5 m/s.
- Utilizar válvulas, con velocidades controladas de apertura y cierre.
- Al arrancar una bomba, cerrar parcialmente la válvula en la línea de descargas para minimizar la aceleración del volumen del líquido a través del sistema. Abrir completamente la válvula, después de que la línea se llene completamente.
- Utilizar una válvula de retención (*check*) en la línea de la tubería, cerca de la bomba, para mantenerla llena.

- Utilizar válvulas eliminadoras de aire para controlar la cantidad de aire que se admita o se elimine a través del sistema de tuberías.
- Diseñar el sistema de modo que la presión total (de operación más el golpe de ariete) no exceda el rango de presión del componente clasificado como el más bajo del sistema.

2.27. Elementos constitutivos de una red de distribución de vapor

El comportamiento del vapor hace que los elementos que constituyen la red presenten ciertas características en relación con la temperatura y la presión que han de soportar, deben presentar también determinadas características frente a la abrasión debido a las altas velocidades que suelen utilizarse en este tipo de sistemas.

Una red de distribución de vapor se compone de:

- Tuberías (ver anexos).
- Accesorios.

A continuación, se describen algunos de los accesorios más comunes, utilizados para diseñar una red de vapor.

- Te (T): accesorio en forma de T que permite realizar una conexión a tres bandas. También llamada racor en T. Los diámetros de las distintas salidas pueden ser del mismo tamaño o distintos.

- Cruz (X): accesorio con forma de cruz, para unir cuatro pasos; también llamado racor en cruz, T con salida lateral, T de cuatro pasos.
- Codo (C): accesorio de tubería que tiene una curva a X grados, empleada para desviar la dirección recta de la misma.
- Filtros (F): accesorios de seguridad que permiten retener y controlar la contaminación de posibles partículas no deseadas. También contribuyen en la vida útil de los equipos de sistema.
- Expansiones/reducciones (E/R): accesorios de forma cónica que permiten aumentar o disminuir el diámetro de las tuberías según las necesidades de cada tramo. Hay 2 tipos de reducciones: las concéntricas y las excéntricas. En el primer caso el diámetro grande y el pequeño tal y como indica su nombre son concéntricos. En el segundo caso los diámetros son excéntricos. Este último tipo es muy utilizado para evitar las bolsas de agua en las bombas (con una reducción excéntrica, se ayuda a que la bomba no pierda NPSH).
- Elementos específicos para sistemas de vapor (trampas de vapor, separadores de gota, purgadores, entre otros).

Existen dos factores característicos en sistemas de distribución de vapor que obligan a la utilización de elementos específicos:

- Presencia de aire: el aire se mezcla con el vapor al arranque de los equipos y es una situación indeseable por la pérdida de eficiencia, esta situación obliga al empleo de purgadores de aire dentro de la red de distribución.
- Presencia de condensados: se produce cuando el vapor entra en contacto con puntos fríos del sistema, tanto en nivel de tuberías de distribución, como en el proceso de transferencia de calor en los puntos de utilización.

2.28. Trampas de vapor

Accesorios que permiten evacuar los condensados formados en el circuito de vapor, para direccionarlos a la red de condensados. La evacuación puede realizarse de manera simple a partir de una válvula manual, pero se recomienda trampas automáticas que se encarguen de manera periódica de mantener el circuito de vapor libre de condensados. Los condensados se sitúan en los puntos más bajos del circuito. Suelen ubicarse en los siguientes puntos de la red de distribución:

- El lado de la entrada de la trampa es una extensión del cabezal principal de vapor, un método ha sido el instalar la trampa cerca de la línea principal para limitar la pérdida de calor por radiación.
- Cerca del suelo, no es recomendable colocarlas en alturas altas da problemas al momento de darles mantenimiento.

Tabla VI. Tipos de trampas de vapor

Tipo	Mecánico		Termodinámico	Termostático	
Ejemplo	De boya 	Cubeta invertida 	Termodinámica 	Presión equilibrada 	Bimetálica 
Principales características	Alta capacidad.	Alta capacidad.	Diseño robusto con resistencia a los golpes de ariete y vibraciones.	Se usa el calor sensible del condensado, reduciendo las pérdidas de re vaporizado, ahorrándole energía.	
	Excelente en la descarga de aire.	Diseño robusto.	Económico.		
	Descarga continua del condensado para una máxima transferencia de calor.	Descarga casi continua del condensado.	Descarga el condensada a temperatura cercana a la de saturación de vapor.	Excelente descarga de aire para una rápida puesta en marcha.	
	No hay retención de condensado.	Mínima retención del condensado.	Descarga positiva con cierre hermético.		
Aplicación	Aplicaciones controladas por temperatura/ presión con fluctuaciones en la carga.		Drenaje de tuberías y todas las aplicaciones de traceado.	En equipos que pueden ser inundados o se precisa para eliminar el exceso de entalpía.	
Tamaño	1/2" - 4"	1/2" - 2"	1/4" - 1"	1/4" - 1"	1/4" - 4"
Presión máxima de trabajo	80 bar	62 bar	250 bar	32 bar	210 bar

Fuente: Spirax Sarco. *Purga de condensados en sistemas de vapor*. P35

2.29. Presión

La caldera de 15 hp que posee la empresa suele mantenerse a presiones bajas en un rango aproximado de 45 a 65 PSI de presión, debido a que no se da abasto cuando se tienen todos los equipos trabajando al mismo tiempo, aparte de ello el vapor pierde una parte de su presión al pasar por la tubería, a causa de la pérdida de carga en la misma y a la condensación por la cesión de calor en la tubería; se deberá prever este margen a la hora de decidir la presión inicial de distribución en cabeza de instalación. Cuando se selecciona la presión de trabajo, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Presión requerida en el punto de utilización.
- Caída de presión a lo largo de la tubería.
- Pérdida de calor en la tubería.

El vapor a alta presión presenta un volumen específico menor que el vapor a baja presión. Existen algunas ventajas al utilizar vapor a altas presiones como: se requieren tuberías con diámetros menores, existen menores pérdidas energéticas, menor costo de la línea de distribución, de accesorios, mano de obra y de aislamiento. Pero habrá mayor consumo de combustible, por lo que se recomienda comparar los costes que representa elevar la presión del vapor a la máxima presión necesaria.

2.30. Pérdidas de carga

Es importante tomar en cuenta que al momento de calcular el diámetro de tubería y la cantidad de accesorios (codos, tes, cruces, entre otros), deben de tenerse en cuenta los caudales instantáneos (máximo y mínimo) y no el caudal medio. Se define caudal como la cantidad de fluido que circula en una conducción por unidad de tiempo. No tener en cuenta esta regla puede conducir a errores, pues el caudal instantáneo puede ser considerablemente mayor que el caudal medio, sobre todo cuando se trata de operaciones discontinuas. La relación entre velocidad y caudal viene dada por la siguiente expresión

$$v = \frac{4q}{\pi * D^2} \quad [Ecuación No. 14]$$

Donde:

- q = caudal (kg/s o m³/s)
- v = Velocidad (m/s)
- D = diámetro interno de la tubería (m)

Existe una serie de conceptos que son necesarios de explicar para determinar las pérdidas de carga en las tuberías:

- Viscosidad: representa el valor de los rozamientos internos que se oponen a su movimiento, se consideran dos tipos de viscosidades:
 - Viscosidad dinámica (μ), que se expresa en poises (P).

- Viscosidad cinemática (ϑ), que se expresa en Stokes (St).

Estas dos magnitudes están relacionadas entre sí por la siguiente expresión:

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho} \quad [\text{Ecuación No. 15}]$$

Donde:

ρ = densidad del fluido (kg/m^3).

- Rugosidad: es una característica propia de cada tubería, hay dos formas de expresar la rugosidad: absoluta (ε), es la altura media de las asperezas interiores de la tubería, y relativa (ε/D), es la relación entre la rugosidad absoluta y el diámetro de la tubería.

2.31. Tipo de flujo

Cuando un fluido circula por una tubería rectilínea, su circulación puede ser de dos tipos: régimen laminar o turbulento según el valor del número de Reynolds, este es un número adimensional que se define a partir de la siguiente expresión:

$$Re = 10^3 * \frac{V * D}{\vartheta} = \frac{4 * 10^6 * Q}{3,6 * \pi D \vartheta} \quad [\text{Ecuación No. 16}]$$

Criterio:

- Si Re es $< 2\,300$ se trata de flujo laminar.
- Si Re es $> 2\,300$ se trata de flujo turbulento.

En la práctica las condiciones reales se encuentran casi siempre exclusivamente en régimen turbulento.

Tabla VII. Longitud equivalente de algunos accesorios

Diámetro nominal de tubería (pulgadas)	Válvula de compuerta totalmente abierta	Válvula de globo			Válvula de retención (check)		Te		Codos
		90°	60°	45°	Vaivén	Bolas	Flujo curvo	Flujo recto	90°
1 ½	1,75	46	23	18	17	20	8	3	4,5
2	2,25	60	30	24	22	25	11	3,5	5,25
2 ½	2,75	70	38	30	27	30	13	4	6
3	3,5	90	45	38	35	38	16	5	7,5
4	4,5	120	60	48	45	50	20	7	10,5
6	6,5	175	88	72	65	75	30	10	15
8	9	230	120	95	90	100	40	14	21
10	12	280	150	130	120	130	50	16	24
12	14	320	170	145	140	150	60	21	32
14	15	380	190	160	150	170	65	22	33
16	17	420	220	180	170	190	75	26	39
18	18	480	250	205	190	210	86	29	44
20	20	530	290	240	200	240	100	32	48
24	32	630	330	270	250	290	120	38	57

Fuente: CLARKE L. DAVIDSON. Manual for process Engineering Calculation. P 145.

2.32. Accesorios de tuberías

Este método es muy conveniente, puesto que, al momento de calcular un tramo de tubería, se suman las longitudes equivalentes de todos los accesorios que contiene la red y se añaden a la longitud de la tubería recta; el resultado será la longitud total de la tubería a calcular.

2.33. Pérdidas energéticas

A lo largo de las tuberías que forman parte de un sistema de vapor, existen pérdidas a partir de la transferencia de calor por radiación y convección, que provoca que se transforme parte del vapor en agua; para evitar pérdidas energéticas por medio de los mecanismos de transferencia de calor suelen utilizarse aislantes térmicos, con el objetivo de minimizar pérdidas.

A partir de la ley de Fourier, se describe la conductividad térmica (k), cuyas unidades en el sistema internacional son $W/m \cdot K$, la cual es una constante de proporcionalidad que determina la facilidad del paso de calor a través del sólido; la conductividad es función de la temperatura para un material determinado, a mayor temperatura la conductividad tiende a disminuir para la mayoría de los sólidos, pero para los gases tiende a aumentar. En función de la conductividad de cada material, se puede realizar la siguiente clasificación:

- Aislantes: $0 \leq k \leq 1$
- Semiconductores: $1 < k < 4$
- Conductores: $4 \leq k \leq \infty$

Valores típicos de conductividades en aislantes se encuentran en: 0,026 W/m°C y 0,04 W/m°C, para conductores pueden estar entre: 61 W/m°C hasta 200 W/m°C.

El espesor de los sólidos implica una dificultad a ese paso y se puede definir como:

$$Q = \frac{\Delta T}{\sum R} \quad [\text{Ecuación No. 17}]$$

R es la resistencia térmica ofrecida por el medio; a partir de dicha relación es posible determinar pérdidas energéticas a pesar de poseer aislamiento en las tuberías.

El aislamiento térmico debe cumplir las siguientes funciones:

- Reducir la conducción térmica en el material de la tubería.
- Reducir la transferencia de calor por radiación, que corresponde al transporte de energía térmica por ondas electromagnéticas.

Una forma conveniente de aplicar el aislamiento a las tuberías es por medio de la utilización de cañuelas de fibra de vidrio, lana de roca (perteneciente a la familia de lana mineral fabricada a partir de roca volcánica), armaflex (es un material aislante posee baja conductividad térmica y protección antimicrobiana).

Se tomará como criterio de diseño para tuberías por las cuales pasa vapor a presiones iguales o menores a 150 psi, las siguientes condiciones:

- Tuberías menores a dos pulgadas de diámetro se tendrá una pulgada de espesor de aislante.
- Para tuberías mayores a dos pulgadas de diámetro se tendrá dos pulgadas de espeso de aislante.

Existen tablas, por medio de las cuales es posible determinar los espesores de las cañuelas para obtener una mejor protección.

2.34. Mantenimiento mecánico de un sistema de vapor

Se recomienda que el mantenimiento mecánico de una caldera se realice con una frecuencia de cada dos meses, las etapas más importantes de esta acción son las siguientes:

- Limpieza del quemador.
- Cambio de empaquetadura.
- Revisión de la cámara de agua.
- Revisión de la cámara de fuego.
- Calibración de los controles y protecciones.

Se recomienda que al tanque de combustible se le inspeccionen algunas posibilidades de fugas y la pintura interior del tanque.

Anualmente debe realizarse:

- Mantenimiento a la bomba de agua.
- Mantenimiento a la bomba de diésel.
- Revisión de empaques, de sellos mecánicos.
- Cambio de cojinete al motor.

2.35. Parámetros de control en el agua de alimentación a la caldera

Sí el agua de alimentación contiene sólidos y gases disueltos, estos pueden promover problemas como: incrustaciones en las tuberías, corrosión, golpe de ariete, minimizar la transferencia de calor, entre otros. Es de suma importancia tener en cuenta que cuando se tiene oxígeno disuelto, altos niveles de cloro y bajo pH en las características del agua de alimentación a la caldera pueden existir mayores causas de corrosión y en el caso de tener dureza del agua no tratada se tiene mayores causas de sólidos depositados.

Actualmente el agua de alimentación a la caldera de 15HP que posee la empresa, se le agrega un químico llamado POL OF, de la casa POLCHEMICAL, es un anti incrustante para generadores de vapor, posee 4,75 % de hidróxido de sodio como ingrediente principal para aumentar el pH del agua.

A continuación, se presenta información detallada sobre las características del agua de alimentación de la caldera:

Tabla VIII. **Parámetros de control agua de alimentación**

Parámetros de control	Agua de alimentación	Alimentación a la caldera
Presión de vapor (Mpa)	$1 < P < 1,6$	$1 < P < 1,6$
Sólidos suspendidos (mg/L)	< 5	-
Dureza (mmol/L)	< 0,03	-
pH (25°C)	> 7	10-12
Concentración de sulfatos (mg/L)	-	10-30
Concentración de fosfatos (mg/L)	-	10-30
Aceite (mg/L)	< 2	-
Hierro (mg/L)	< 0,3	-

Fuente: FULTON J. *Manual de operación*. P 21.

2.36. Tratamiento del agua

Algunos de los propósitos de tratar el agua son:

- Evitar incrustaciones y taponamientos
- Impedir fatiga en los metales de la caldera
- Impedir formación de espumas
- Evitar y proteger el equipo contra la corrosión

- Impedir pérdidas de calor por purgas frecuentes
- Disminuir los costos de operación y mantenimiento

El tratamiento interno o químico tiene como principal objetivo prevenir corrosión e incrustaciones. Algunos de los aditivos químicos utilizados en el tratamiento de agua son:

- Hidracina
- Sulfito de sodio
- Aminas de neutralización y fosfatos

Para tratar el agua es necesario de los siguientes procesos:

- Descalcificador

Es necesario que el agua que se introduzca en la caldera sea debidamente tratada y acondicionada. Los descalcificadores son aparatos que permiten sustituir los iones minerales incrustantes por iones solubles en el agua.

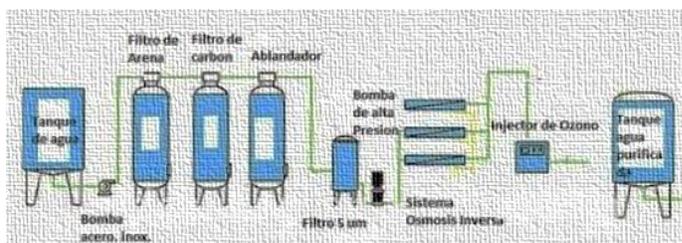
Este equipo consta de dos tanques: uno donde se coloca la resina catiónica, y otro donde se deposita la salmuera. Para llevar a cabo dicha transformación se utilizan productos tales como resinas a base de poli estireno formadas por pequeñas esferas de 0,3 mm de diámetro que tienen la propiedad de cambiar los iones de calcio y magnesio (cales) por iones de sodio, solubles en agua.

Para regenerar estos aparatos no es necesario sustituir la resina que, prácticamente, tiene una duración indefinida, basta con circular salmuera (cloruro sódico). La regeneración del descalcificador se efectúa de manera completamente automática por el impulso de un temporizador debidamente programado o por el impulso de un aparato volumétrico.

- Desgasificadores

Se conocen como desaireadores, dispositivos mecánicos empleados para liberar los gases contenidos en el agua de alimentación (aire, oxígeno, anhídrido carbónico y otros gases) mediante calentamiento por vapor. De acuerdo con las especificaciones de la Norma UNE-9075-85 relativas al agua de alimentación para las calderas, el contenido de O_2 disuelto en el agua debe ser nulo. Un desgasificador térmico consiste en una cámara colocada sobre el tanque de alimentación de agua a la caldera, que contiene una serie de bandejas perforadas por las que cae el agua de alimentación introducida por su parte superior y circulada a contracorriente. Esta lluvia de agua en finas gotas de vapor producido por la caldera o por el vapor de los condensados recogidos, logran con ello el calentamiento del agua y como consecuencia la separación del aire disuelto en el agua.

Figura 9. Equipos tratamiento de agua



Fuente: Marks. Manual del ingeniero Mecánico. p 269.

2.37. Análisis económico

Es importante el realizar un análisis de costos y determinar un presupuesto aproximado al que podría llegar a tenerse al momento de iniciar un proyecto.

A continuación, se describen algunas herramientas analíticas para tomar decisiones económicas, considerando siempre que el valor del dinero cambia a través del tiempo.

2.37.1. Valor presente neto (VPN)

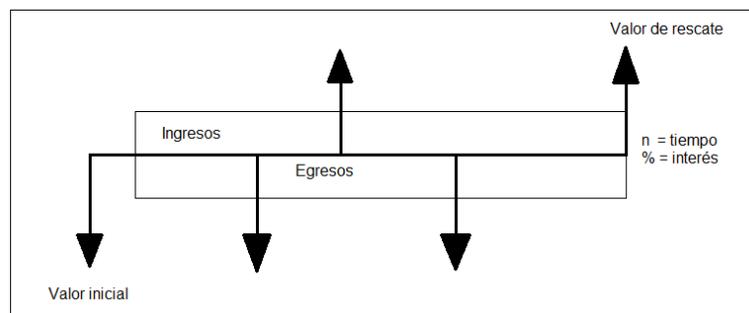
Es una alternativa al tomar decisiones de inversión, que permite determinar de ante mano si una inversión vale la pena o no; así evitar realizar malas inversiones que provoquen en un futuro pérdidas. El valor presente neto puede desplegar tres posibles respuestas, las cuales pueden ser:

- $VPN < 0$, permite predecir que el proyecto no es rentable.
- $VPN = 0$, indica que exactamente se está generando el porcentaje de utilidad que se desea.
- $VPN > 0$, esta indicando que la opción es rentable y que inclusive podría incrementarse el porcentaje de utilidad.

Para poder realizar comparaciones en varias opciones y elegir la mejor, siempre debe compararse con el mismo tiempo de vida útil, si el caso fuera lo contrario debe encontrarse un mínimo común denominador.

En el diagrama de flujo se trabajan los ingresos como valores positivos y los egresos como valores negativos, es decir:

Figura 10. **Esquema de cálculo VPN**



Fuente: Vásquez, Abel. *Valor presente neto*. p 168.

2.37.2. Tasa de retorno (TIR)

Puede decirse conceptualmente, que la tasa de retorno es la tasa máxima de utilidad que puede pagarse u obtenerse en la evaluación de una alternativa, se puede interpretar en la siguiente:

Cuando el VPN = 0 puede utilizarse la siguiente relación:

$$\text{TIR} = \text{VPB}_{\text{beneficio}} - \text{VPN}_{\text{gastos}} = 0$$

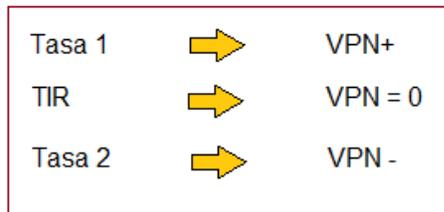
Donde:

- TIR = tasa de retorno de inversión
- $\text{VPN}_{\text{beneficio}}$ = valor presente neto de los beneficios

- $VPN_{\text{gastos}} = \text{valor presente neto de los gastos}$

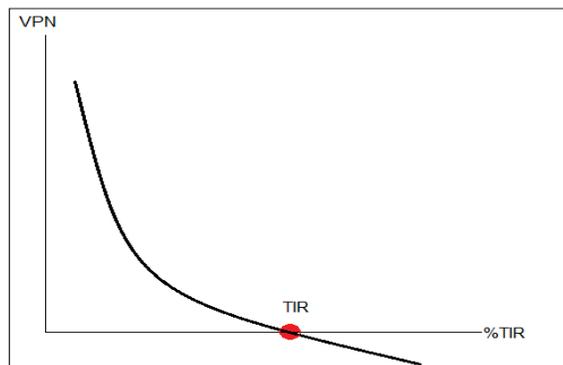
Se busca obtener un dato menor y otro mayor, para interpolar:

Figura 11. **Interpolación TIR**



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Esquema de cálculo VPN**



Fuente: Vásquez, Abel. Variables económicas. p 185.

2.37.3. Relación beneficio costo (B/C)

Este método se establece con el fin de evaluar la eficiencia con que utiliza los recursos un proyecto determinado. Si los ingresos superan a los costos, el proyecto es aceptable; en caso contrario, el proyecto debe ser rechazado. Los ingresos y egresos deben ser calculados utilizando el VPN o el CAUE, este análisis toma valores mayores, menores o iguales a 1, por lo que se tiene el siguiente criterio de aceptación:

- $B/C > 1$, implica que los ingresos son mayores a los egresos, entonces, el proyecto es viable.
- $B/C = 1$, implica que los ingresos son iguales a los egresos, entonces, el proyecto es indiferente, es decir, ni se gana ni se pierde.
- $B/C < 1$, implica que los ingresos son menores a los egresos, entonces, el proyecto no es viable.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

A continuación, se describen los diferentes tipos de variables en función al diseño del sistema de vapor.

3.1.1. Variables dependientes de dimensionamiento de la caldera

- Presión a la salida de la caldera de 15 hp, en condición estable
- Flujo de vapor entregado por la caldera de 15hp (Kg vap/h)
- Flujo de vapor necesario por equipo (Kg vap/h)
- Consumo energético total (KW/h)
- Costo de la caldera según marcas (Q)

3.1.2. Variables del diseño de la red de distribución de vapor

- Presión de trabajo de la caldera dimensionada.
- Flujo de vapor (Kg/h)
- Velocidad del flujo de vapor (m/s), criterio de diseño
- Número de accesorios
- Longitud equivalente por cada accesorio
- Longitud de la tubería (m)
- Diámetro de la tubería (m)
- Presión a la que trabaja cada equipo (Kpa)
- Caída de presión (KPa)

3.1.3. Variables de control en el programa preventivo para el agua de alimentación a la caldera

- Dureza del agua (ppm)
- Cloro (ppm)
- pH
- Conductividad ($\mu s/cm$)

3.1.4. Variables de diseño para el economizador

- Diámetro tubería de los gases de combustión de la caldera de 15 hp
- Diámetro de la tubería a los extremos de la rejilla
- Diámetro de la tubería el interior de la rejilla
- Caudal que entrega la bomba de agua de alimentación

3.1.5. Análisis económico de la instalación del sistema de vapor

- Costo de materiales
- Costo de instalación
- Tasa de interés activa
- Relación beneficio costo
- Depreciación del equipo

3.2. Delimitación del campo de estudio

El diseño de la red de distribución de vapor se realizará bajo los planos de la nueva planta farmacéutica. Las áreas en las que se trabajará serán:

- Área de calderas
- En el distribuidor de vapor
- Alimentación de vapor del sistema de acondicionamiento de aire (HVAC)
- Alimentación de vapor marmita con capacidad de 1000 L
- Alimentación de vapor marmita con capacidad de 500 L
- Alimentación de vapor autoclave con capacidad de 500L

La toma de datos se realizará durante la jornada laboral (7:00 a 16:00 h).

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigadora: Clara Sofia Motta Rodriguez
- Asesor: Inga. Ana Lily Batres
- Jefe de mantenimiento de la planta farmacéutica: Ing. José Manuel Rivas

3.4. Recursos materiales disponibles (equipo, cristalería y reactivos)

Para la toma de datos, serán necesarios los siguientes equipos e instrumentos de medición:

- Manómetros ubicados en los diferentes equipos.
- Manómetro ubicado en la salida de condensado de los tanques de fabricación.
- Medidor de nivel ubicado en tanque de combustible.
- Medidor de nivel en tanque de agua.
- Termómetro.
- Cinta métrica.

3.5. Instrumentos, cristalería y reactivos a utilizar:

- Reactivo EDTA, para titular y determinar la concentración de carbonatos en el agua de alimentación a la caldera.
- Solución Cloruro de potasio, para determinar el pH del agua de alimentación.
- Conductímetro.
- Beacker de 250 ml.

3.6. Técnica cuantitativa

La técnica a utilizar será cuantitativa porque se realizará una serie de cálculos; se inicia con la verificación de que el sistema actual no está cumpliendo con la demanda de vapor, para el dimensionamiento de la nueva caldera a recomendar será necesario una serie de conversiones para determinar la potencia necesaria a la cual la caldera deberá trabajar.

En el diseño de la red de vapor se utilizará la ecuación de *Darcy-Weisbach*; se escogió esta ecuación, porque actualmente es la ecuación más difundida en hidráulica y con la que se obtienen los resultados más precisos; esta permite el cálculo de la pérdida de carga debido a la fricción dentro de una tubería y no presenta restricciones, por lo que se puede utilizar con todo tipo de fluidos.

La dificultad en el uso de esta ecuación radica en la obtención del factor de fricción de *Darcy* que depende de la rugosidad relativa y el número de *Reynolds*; para su determinación es posible utilizar el diagrama de *Moody* o una relación matemática conocida como la ecuación de *White-Colebrook* que se resuelva a partir de varias iteraciones; en el presente estudio se procederá a utilizar como primera opción el diagrama de *Moody*, pero se tendrá como segunda opción de cálculo la ecuación de *White-Colebrook*.

Para el análisis económico también se utiliza una serie de relaciones que permitirán calcular los factores económicos críticos del presente estudio.

3.7. Recolección y ordenamiento de la información

A continuación, se presentan los resultados del análisis energético realizado en la planta de producción.

Tabla IX. **Consumo energético por equipo**

Equipos	Kg vap/h	Kpa
Marmita 500 L	90 0000	150
Marmita 1000 L	170 0000	300
Autoclave	150 0000	45
Sistema HVAC	80 3984	35

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Requerimiento total de energía**

Equipos	BHP
Marmita 500 L	5,7511
Marmita 1000 L	10,8632
Autoclave	9,5852
Sistema HVAC	5,1376
Perdidas	2,5484
Otros equipos	8,4714
Requerimiento total	42,3570

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Resultados del análisis de agua para la caldera del sistema inicial**

Análisis	Resultado	Límites	Unidades	Dictamen
PH	8,4	10,5-12	NA	No cumple
Total, sólidos disueltos	800	Max. 3 500	Ppm	Cumple
Conductividad	22,08925	Menor a 5	µS/cm	Cumple
Dureza total	63	0	ppm como CaCO ₃	No cumple
Alcalinidad total "M"	700	700-800	ppm como CaCO ₃	Cumple
Alcalinidad hidróxidos	150	Max. 500	ppm como CaCO ₃	Cumple
Fosfatos	30	30 – 60	ppm como PO ₃	Cumple límite inferior
Sulfitos	20	20 – 40	ppm como SO ₃	Cumple límite inferior
Cloruros	40	Max. 200	ppm como Cl	Cumple
Sílice	60	Max. 120	ppm como SO ₂	Cumple
Purgas	2/día	Mínimo 3 al día	NA	No cumple

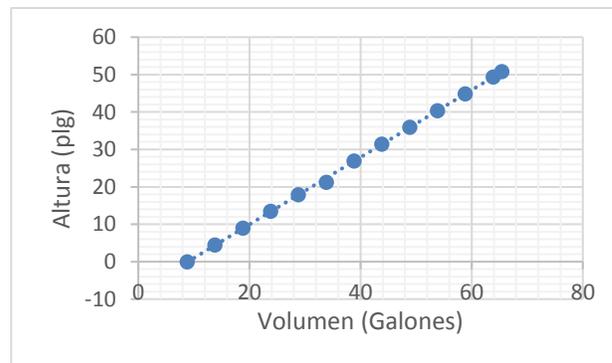
Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Calibración del nivel de Diesel en el tanque de almacenamiento**

No.	Espacios manguera	Espacios manguera (cm)	H (cm)	Volumen (cm ³)	Volumen (galones)	Pendiente (gal/plg)
0	Po=7,874 plg	Po = 20cm = 0	20	33 238,128	8,7805	0
1	0	0	0	0	8,781	0
2	4,4882	11,4000	31,4000	52 183,8609	13,7855	0,8968
3	8,9764	22,8000	42,8000	71 129,5939	18,7905	0,8968
4	13,4646	34,2000	54,2000	90 075,3268	23,7954	0,8968
5	17,9528	45,6000	65,6000	109 021,059	28,8003	0,8968
6	21,2598	54,0000	77,0000	127 966,792	33,8053	0,6608
7	26,9291	68,4000	88,4000	146 912,525	38,8102	1,1327
8	31,4173	79,8000	99,8000	165 858,258	43,8151	0,8968
9	35,9055	91,2000	111,2000	184 803,991	48,8201	0,8968
10	40,3937	102,6000	122,6000	203 749,724	53,8250	0,8968
11	44,8819	114,0000	134,0000	222 695,457	58,8299	0,8968
12	49,3701	125,4000	145,4000	241 641,190	63,8349	0,8968
13	50,7874	129,0000	149,0000	247 624,053	65,4154	0,8968

Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Nivel de diesel del tanque de almacenamiento**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. Consumo de combustible diario del sistema inicial

No. Día	Fecha	Consumidos durante el día	Horas de trabajo	Galones / hora	Ti	Tf	ΔT
1	03/6/2018	45	7,9400	5,6675	17	72	55
2	04/6/2018	42	6,9100	6,0781	18	76	58
3	05/6/2018	44	10,8200	4,0665	16	75	59
4	06/6/2018	47	8,3600	5,6220	20	78	58
5	07/6/2018	45	7,0100	6,4194	18	74	56
6	09/6/2018	48	6,1100	7,8560	20	72	52
7	10/6/2018	41	6,1600	6,6558	19	72	53
8	11/6/2018	40	7,3400	5,4496	20	76	56
9	12/6/2018	45	7,0600	6,3739	16	76	60
10	13/6/2018	49	7,9900	6,1327	18	78	60
11	16/6/2018	50	7,8200	6,3939	17	77	60
12	17/6/2018	52	8,9900	5,7842	16	74	58
13	18/6/2018	51	9,7700	5,2201	17	75	58
14	19/6/2018	45	9,1400	4,9234	18	68	50
15	20/6/2018	47	9,1500	5,1366	19	66	47
16	23/6/2018	49	9,8500	4,9746	20	70	50
17	24/6/2018	48	9,0500	5,3039	21	72	51
18	25/6/2018	47	8,9200	5,2691	20	72	52
19	26/6/2018	46	7,7300	5,9508	22	75	53
20	27/6/2018	53	9,5000	5,5789	20	75	55
21	30/6/2018	54	11,4900	4,6997	20	78	58
22	31/6/2018	49	8,9000	5,5056	21	79	58
23	02/7/2018	48	9,0200	5,3215	19	80	61
24	06/7/2018	49	9,2800	5,2802	18	76	58
25	07/7/2018	43	9,5400	4,5073	21	77	56
26	08/7/2018	48	8,3400	5,7554	20	72	52
27	09/7/2018	45	9,6400	4,6680	22	72	50
28	10/7/2018	54	9,6500	5,5959	20	74	54
29	13/7/2018	56	10,4800	5,3435	21	75	54
30	14/7/2018	45	9,2700	4,8544	19	74	55

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Consumo de diésel con el economizador instalado (sistema actual)**

No. Día	Fecha	Galones consumidos durante el día	Horas de trabajo	Galones / hora	Ti	Tf	T
1	03/06/2018	27	7,5000	3,6000	15	72	57
2	04/06/2018	32	8,9900	3,5595	18	76	58
3	05/06/2018	32	9,7700	3,2753	17	75	58
4	06/06/2018	39	11,4900	3,3943	20	78	58
5	07/06/2018	32	8,7900	3,6405	19	74	55
6	09/06/2018	27	9,1400	2,9540	18	72	54
7	10/06/2018	32	9,1500	3,4973	20	72	52
8	11/06/2018	34	9,8500	3,4518	20	76	56
9	12/06/2018	27	9,0800	2,9736	18	76	58
10	13/06/2018	23	6,6500	3,4586	18	78	60
11	16/06/2018	29	8,9200	3,2511	17	77	60
12	17/06/2018	26	7,7300	3,3635	16	74	58
13	18/06/2018	30	8,7500	3,4286	17	75	58
14	19/06/2018	41	9,5000	4,3158	18	68	50
15	20/06/2018	29	10,7100	2,7077	19	66	47
16	23/06/2018	30	9,2800	3,2328	20	70	50
17	24/06/2018	32	9,8200	3,2587	21	72	51
18	25/06/2018	31	9,6900	3,1992	20	72	52
19	26/06/2018	31	9,5400	3,2495	22	75	53
20	27/06/2018	31	9,6500	3,2124	20	75	55
21	30/06/2018	31	8,9500	3,4637	20	78	58
22	31/6/2018	32	9,6500	3,3161	21	79	58
23	02/07/2018	32	8.2600	3,8741	19	79	605
24	03/07/2018	37	10,4800	3,5305	20	78	58
25	06/07/2018	29	9,2700	3,1284	20	76	56
26	09/07/2018	30	9,0700	3,3076	20	72	52
27	10/07/2018	33	9,3700	3,5219	22	72	50
28	13/07/2018	33	9,3700	3,5219	20	74	54

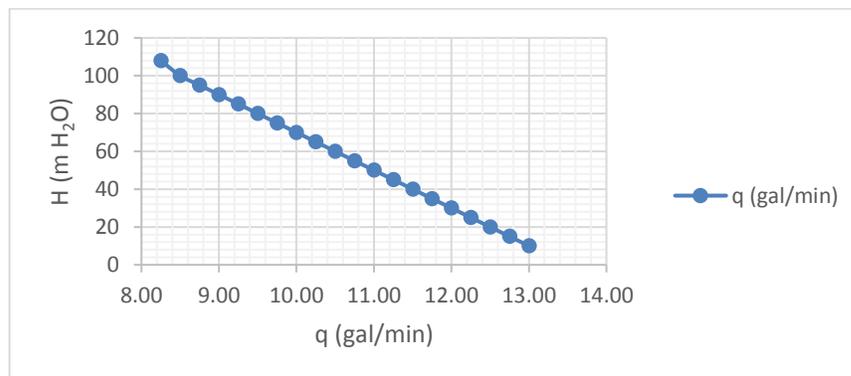
Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Curva de calibración de la bomba (caldera 15HP)**

H (m H ₂ O)	q (gal/min)
10	12,87
15	12,85
25	12,55
30	12,35
35	12,00
40	11,90
45	11,75
50	11,65
55	11,20
70	10,55
75	10,45
80	10,25
85	10,20
90	10,10
95	10,00
100	9,20

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Curva de calibración de la bomba (caldera 15HP)**



Fuente: elaboración propia.

3.8. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

A continuación, se presentan los resultados tabulados en la primera corrida de datos experimentales en el área de calderas.

Tabla XVI. **Producción de vapor sistema actual, corrida 1 (todos los equipos trabajando)**

No.	Tiempo por arranque (s)	Presión bomba (PSI)	H (m H ₂ O)	Temperatura (°C)	q (Gal/min)	Densidad agua (Kg/L)	Kg vap
1	46,21	50	35,1535	70	12,0000	1,00000	34,9810
2	44,16	50	35,1535	60	12,0000	1,00000	33,4291
3	42,51	50	35,1535	66	12,0000	1,00000	32,1801
4	48,20	50	35,1535	68	12,0000	1,00000	36,4874
5	44,79	50	35,1535	72	12,0000	1,00000	33,9060
6	41,98	50	35,1535	74	12,0000	1,00000	31,7789
7	46,41	50	35,1535	74	12,0000	1,00000	35,1324
8	57,30	50	35,1535	75	12,0000	1,00000	43,3761
9	41,80	55	38,6689	76	11,7600	1,00000	31,0097
10	39,00	55	38,6689	76	11,7600	1,00000	28,9325
11	49,07	55	38,6689	76	11,7600	1,00000	36,4031
Producción total de vapor en una hora							377,6163

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Producción de vapor sistema actual, corrida 2 (todos los equipos trabajando)**

No.	Tiempo por arranque (s)	Presión bomba (PSI)	H (m H ₂ O)	Temperatura (°C)	q (Gal/min)	Densidad agua (Kg/L)	Kg vap
1	28,8300	35	24,6075	70	12,5000	1,00000	22,7337
2	26,4000	35	24,6075	60	12,5000	1,00000	20,8175
3	27,6900	35	24,6075	66	12,5000	1,00000	21,8347
4	32,5000	35	24,6075	68	12,5000	1,00000	25,6276
5	25,9500	40	28,1228	72	12,2500	1,00000	20,0534
6	23,5000	35	24,6075	74	12,5000	1,00000	18,5307
7	25,7900	35	24,6075	74	12,5000	1,00000	20,3365
8	19,9800	35	24,6075	75	12,5000	1,00000	15,7551
9	31,6500	35	24,6075	76	12,5000	1,00000	24,9573
10	25,8800	42	29,5289	76	12,3200	1,00000	20,1136
11	24,2700	40	28,1228	76	12,2500	1,00000	18,7551
Producción total de vapor en una hora							229,5152

Fuente: elaboración propia

Tabla XVIII. **Producción de vapor sistema actual, corrida 1
(economizador)**

No.	Tiempo por arranque (s)	Presión bomba (PSI)	H (m H ₂ O)	Temperatura (°C)	Q (Gal/min)	Densidad agua Kg/h	Kg vap
1	2629	50	35,153	78	12,0000	1,0000	19,90153
2	37,82	55	38,689	78	11,9300	1,0000	28,46273
3	64,45	55	38,689	78	11,9300	1,0000	48,50405
4	47,73	50	35,1535	78	12,0000	1,0000	36,13161
5	40,63	50	35,1535	78	12,0000	1,0000	30,75691
6	36,05	50	35,1535	78	12,0000	1,0000	27,28985
7	43,32	45	31,6382	78	12,3700	1,0000	33,80436
8	36,03	45	31,6382	78	12,3700	1,0000	28,11568
9	39,67	45	31,6382	79	12,3700	1,0000	30,95612
10	39,07	50	35,1535	79	12,0000	1,0000	29,57599
11	30,25	50	35,1535	79	12,0000	1,0000	22,89925
12	34,96	55	38,6689	79	11,9300	1,0000	26,31034
13	48,37	55	38,6689	79	11,9300	1,0000	36,40250
14	43,67	55	38,6689	80	11,9300	1,0000	32,86535
15	39,34	50	35,1535	80	12,0000	1,0000	29,78038
16	49,24	60	42,1842	80	11,8300	1,0000	36,74662
Producción total de vapor en una hora							498,5032

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Producción de vapor sistema inicial, corrida 2 (economizador)**

No.	Tiempo por arranque (s)	Presión bomba (PSI)	H (m H ₂ O)	T (°C)	Q (Gal/min)	Densidad agua (Kg/L)	Kg vap
1	39,4500	50	35,1535	72	12,0000	1,0000	29,8637
2	41,4000	50	35,1535	72	12,0000	1,0000	31,3398
3	21,0600	50	35,1535	72	12,0000	1,0000	15,9424
4	52,9000	50	35,1535	73	12,0000	1,0000	40,0453
5	59,9200	50	35,1535	73	12,0000	1,0000	45,3594
6	39,4800	50	35,1535	73	12,0000	1,0000	29,8864
7	47,9100	50	35,1535	74	12,0000	1,0000	36,2679
8	20,8800	50	35,1535	74	12,0000	1,0000	15,8062
9	38,6900	45	31,63815	74	12,3700	1,0000	30,1914
10	34,1500	45	31,63815	74	12,3700	1,0000	26,6486
11	24,1200	45	31,63815	74	12,3700	1,0000	18,8218
12	35,1300	45	31,63815	76	12,3700	1,0000	27,4134
13	17,5800	45	31,63815	76	12,3700	1,0000	13,7184
14	26,6500	45	31,63815	76	12,3700	1,0000	20,7961
15	14,1700	40	28,1228	76	12,4000	1,0000	11,0842
Producción total de vapor en una hora							393,1849

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Cotización calderas pirotubulares**

Características	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Marca	Fulton	Cleaver Brooks	Fulton
Diseño	Caldera pirotubular vertical, tipo paquete y sin tubos.	Caldera pirotubular, con tubo de fuego horizontal con cuatro pasos de flujo, tubo central corrugado.	Caldera pirotubular horizontal con tres pasos.
Capacidad nominal	50 BHP, hasta 3 000 pies sobre el nivel del mar.	50 BHP, hasta 5 000 pies sobre el nivel del mar.	60 BHP, hasta 5 000 pies sobre el nivel del mar.
Presión de diseño	150 PSI	150 PSI	150 PSI
Presión máxima de trabajo	125 PSI	135 PSI	135 PSI
Capacidad térmica	1 673 750 BTU/h	1 674 000 BTU/h	2 010 000 BTU/h
Capacidad de generación de vapor	784 kg/h	783 kg/h	940 Kg/h
Consumo de combustible (100 % carga)	25 (Gal/h) Gas propano	21 (Gal/h) gas propano	17 (Gal/h) de diésel
Eficiencia mínima (100 % carga)	80 %	85 %	85,70 %
Distribuidor en el país	SIDASA	SIDASA	MAQUINSA
Estado de la caldera	Primera	Primera	Primera

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Cotización calderas propuestas**

Característica	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Cotización, únicamente de la caldera	\$ 46 600,00	\$ 51 000,00	\$ 42 000,00
Cotización sistema de alimentación	\$ 5 700,00	\$ 6 900,00	\$ 5 628,00
12 % IVA	\$ 7 704,00	\$ 8 580,00	\$ 5 429,76
Total	\$ 58 904,00	\$ 80 080,00	\$ 52 528,76

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Proyección consumo de combustibles según las diferentes calderas propuestas**

Datos del combustible	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Tipo de combustible	Gas propano	Gas propano	Diésel
Densidad (Kg/m ³)	2,01	2,01	850
Cp (BTU/Gal)	92 000	92 000	140 000
Horas de trabajo (h)	10	10	10
Consumo diario (Gal/h)	25	21	31
Costo por Galón (quetzales/Gal)	12	12	22
Costo (quetzales/mes)	3000	2520	6820

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Diseño red de vapor diámetro mínimo**

Línea del circuito	Demanda (KPa)	Kg vap/h	Caudal q (m ³ /h)	Velocidad vapor (m/h)	Dmín (m)	Diámetro a proponer según tablas (plg)
Línea 1-P	499,1750	495,0000	185,6250	38	0,0415	2,0000
Línea 2 M5	150,0000	90,0000	104,3100	38	0,0311	1,5000
Línea 3 M10	300,0000	170,0000	103,0200	38	0,0309	1,5000
Línea 4 Ac	55,0000	150,0000	537,0000	38	0,0706	3,0000
Línea 7-RC	NA	783,0000	89,9702	25	0,0381	1,5000
Línea 5-HVAC	35,0000	80,3984	364,2048	38	0,0582	3,0000

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Propiedades fisicoquímicas del vapor saturado**

Línea del circuito	Densidad del vapor (Kg/m ³)	viscosidad dinámica x 10 ⁻⁵ (cP)	Viscosidad cinemática x 10 ⁻⁵ (m ² /s)
Línea 1-P	2,6667	1,40	0,5250
Línea 2 M5	0,8628	1,26	1,4600
Línea 3 M10	1,6502	1,37	0,8270
Línea 4 Ac	0,2793	1,18	4,2100
Línea 7-RC	987,17	1,13	0,0661
Línea 5-HVAC	0,2208	1,14	5,1700

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Número de Reynolds, rugosidad relativa y factor de Darcy**

Línea del circuito	L (m)	D(plg)	Re = V*D/u X 10⁺⁵	Rugosidad relativa	f
Línea 1-P	105,3624	2,0000	145,0000	0,0011	0,0190
Línea 2 M500	58,2365	1,5000	39,0000	0,0015	0,0240
Línea 3 M1000	64,5236	1,5000	68,9000	0,0015	0,0230
Línea 4 Ac	104,2365	3,0000	27,1000	0,0007	0,0210
Línea 5 sistema HVAC	149,9060	3,0000	22,0000	0,0008	0,0260
Línea 6 retorno de condensado	305,3721	1,5000	363,0000	0,0012	0,0000
Línea 5.1 manejadora A001	134,9876	3,0000	22,0000	0,0008	0,0260
Línea 5.2 manejadora A002	135,26547	3,0000	22,0000	0,0008	0,0260
Línea 5.3 manejadora A004	138,2654	3,0000	22,0000	0,0008	0,0260
Línea 5.4 manejadora A005	145,3265	3,0000	22,0000	0,0008	0,0260

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Caídas de presión de las diferentes líneas que conforman la red de vapor**

Línea del circuito	Caída de presión (Pa)	Caída de presión (PSI)	Porcentaje en caída de presión (%)
Línea 1-P	73 742,9287	10,6955	NA
Línea 2 M500	68647,8072	9,9565	6,9093
Línea 3 M1000	72889,7212	10,5718	1,1570
Línea 4 Ac	53756,2521	7,7967	8,2743
Línea 5 sistema HVAC	95715,4909	13,8824	NA
Línea 6 retorno de condensado	7,3234	0,0011	NA
Línea 5.1 manejadora A001	86190,0417	12,5008038	9,9518
Línea 5.2 manejadora A002	86367,4627	12,5265365	9,7664
Línea 5.3 manejadora A004	88282,9282	12,8043512	7,7652
Línea 5.4 manejadora A005	92791,4646	13,4582588	3,0549

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. Longitud equivalente según la cantidad de válvulas de globo y compuerta existentes en las diferentes líneas de la red de vapor

Tramo de tubería	Válvula de globo		Longitud equivalente total (m)	Válvula de compuerta		Longitud equivalente total (m)
	Le/D	Cantidad		Le/D	Cantidad	
Línea 2 M-500	46	1	1,7526	1,75	1	0,0667
Línea 3 M-1000	46	1	1,7526	1,75	1	0,0667
Línea 4 AC	60	4	9,1440	2,25	3	0,2572
Línea 5 HVAC	90	1	3,4290	3,5	1	0,1334
Línea 6 RC	46	0	0,0000	1,75	8	0,5334

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. Longitud equivalente según la cantidad de válvulas *check* existentes en las diferentes líneas de la red de vapor

Tramo de tubería	Válvula check de bolas		Longitud equivalente total (m)
	Le/D	Cantidad	
Línea 2 M-500	20	3	2,2860
Línea 3 M-1000	20	3	2,2860
Línea 4 AC	25	9	8,5725
Línea 5 HVAC	38	3	4,3434
Línea 6 RC	20	5	3,8100

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Longitud equivalente según la cantidad de codos a 90° existentes en las diferentes líneas de la red de vapor**

Tramo de tubería	Codo de 90°		Longitud equivalente total (m)
	Le/D	Cantidad	
Línea 2 M-500	1,5000	5	0,2858
Línea 3 M-1000	4,5000	5	0,8573
Línea 4 AC	5,2500	8	1,6002
Línea 5 HVAC	7,5000	5	1,4288
Línea 6 RC	1,5000	6	0,3429

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Longitud equivalente según la cantidad de codos T estándar existentes en las diferentes líneas de la red de vapor**

Tramo de tubería	T estándar		Longitud equivalente total (m)
	Le/D	Cantidad	
Línea 2 M-5	3	1	0,1143
Línea 3 M-10	3	2	0,2286
Línea 4 AC	3,5	2	0,2667
Línea 5 HVAC	5	3	0,5715
Línea 6 RC	3	6	0,6858

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Longitud equivalente total de las diferentes líneas que conforman la red de vapor**

No.	VPN 1	VPN2	VPN 3
0	- Q 453 595,55	- Q 616 663,25	- Q 404 502,44
1	Q 140 125,87	Q 148 883,74	Q 159 826,57
2	Q 128 555,85	Q 136 590,59	Q 146 629,88
3	Q 117 941,14	Q 125 312,46	Q 134 522,83
4	Q 108 202,88	Q 114 965,56	Q 123 415,44
5	Q 99 268,70	Q 105 472,99	Q 113 225,17
6	Q 91 072,20	Q 96 764,21	Q 103 876,30
7	Q 83 552,48	Q 88 774,51	Q 95 299,36
8	Q 76 653,65	Q 81 444,50	Q 87 430,61

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Análisis de VPN de las calderas propuestas**

Tramo de tubería	Diámetro tubería (m)	Longitud tubería (m)	Longitud total (m)
Línea 2 M-500	0,0381	60	4,5053
Línea 3 M-1000	0,0381	75	5,1911
Línea 4 AC	0,0381	120	19,8406
Línea 5 HVAC	0,0381	150	9,9060
Línea 6 RC	0,0381	175	5,3721

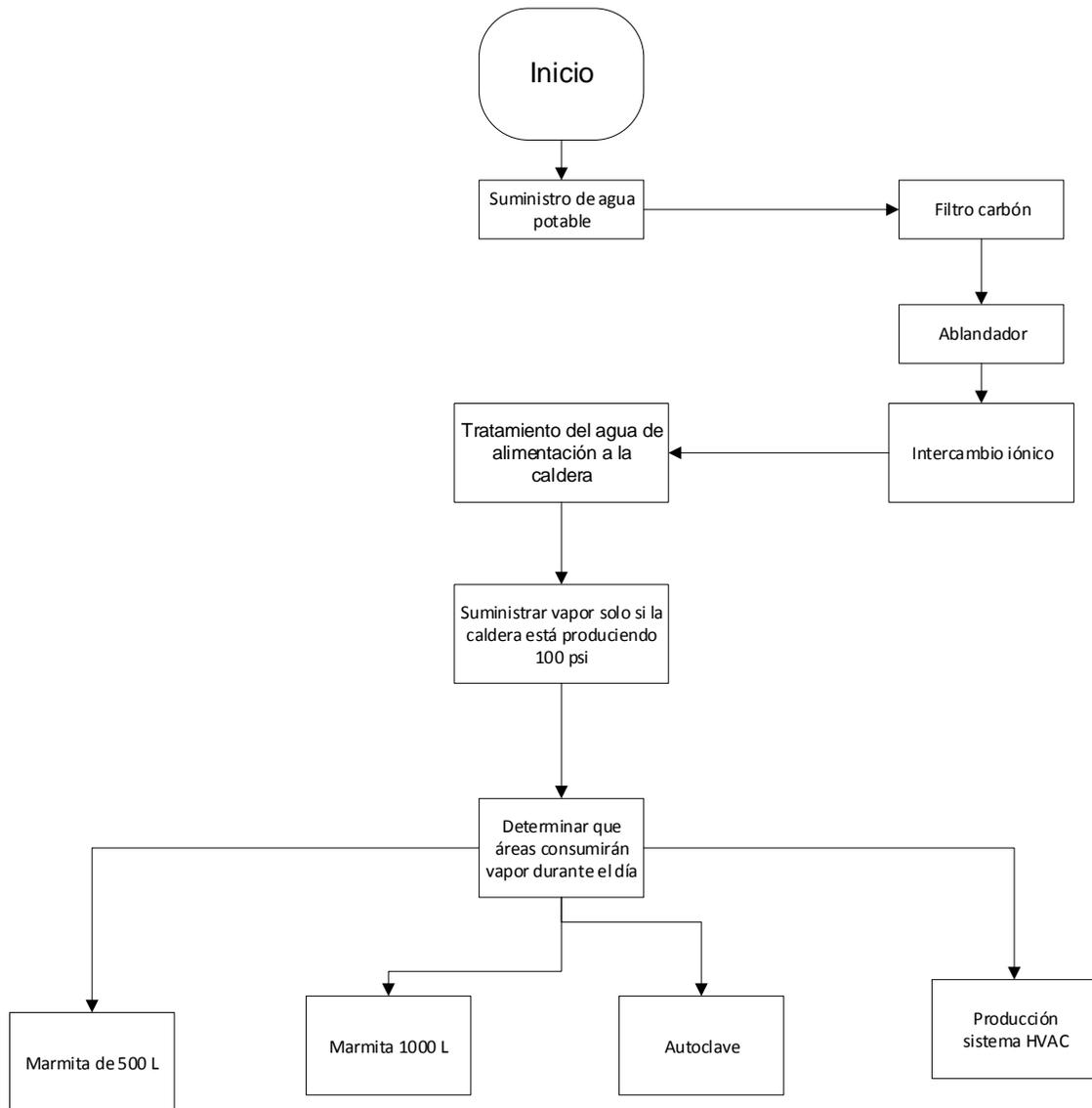
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Análisis de TIR de las calderas propuestas**

Año	TIR 1	TIR 2	TIR 3
0	-453 595,5534	-616 663,2472	-404 502,444
1	Q 152 737,20	Q 162 283,28	Q 174 210,96
2	Q 152 737,20	Q 162 283,28	Q 174 210,96
3	Q 152 737,20	Q 162 283,28	Q 174 210,96
4	Q 152 737,20	Q 162 283,28	Q 174 210,96
5	Q 152 737,20	Q 162 283,28	Q 174 210,96
6	Q 152 737,20	Q 162 283,28	Q 174 210,96
7	Q 152 737,20	Q 162 283,28	Q 174 210,96
8	Q 152 737,20	Q 162 283,28	Q 174 210,96

Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Diagrama de flujo del sistema de vapor



Fuente: elaboración propia.

3.9. Análisis estadístico

A continuación, se presentan los resultados estadísticos de las curvas de calibración.

Tabla XXXIV. **Ecuación lineal curvas de calibración**

Ecuación figura 7	24,715 x + 333,68
Desviación estándar figura 7	0,9847
Ecuación figura 8	0,898 x – 8,0145
Desviación estándar figura 8	0,9996

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Kilogramos de vapor producidos**

No.	Sistema inicial	Con economizador
	Kg/ h	Kg /h
1	258,6931	375,1958
2	249,5638	384,5269
3	252,3698	398,5269
4	254,8963	393,1849
5	250,6574	398,5261
Media	253,2361	389,9921
Desviación	3,6548	8,2124

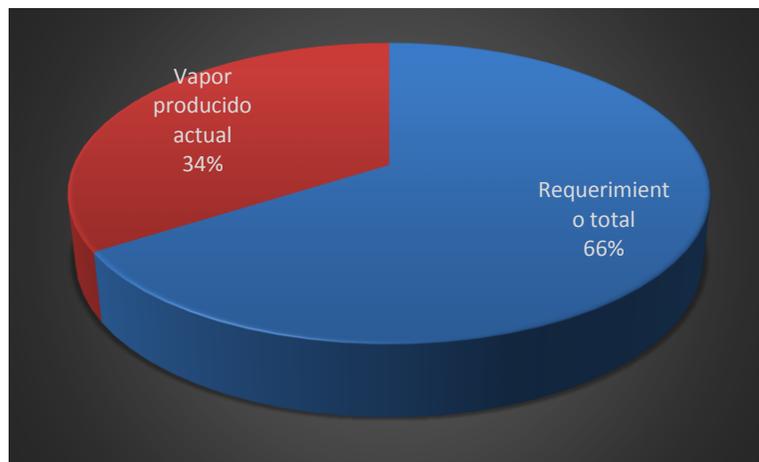
Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

4.1. Dimensionamiento caldera

A continuación, se presenta la deficiencia de vapor de la planta.

Figura 16. Evaluación del sistema actual



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. Requerimiento de vapor

Vapor producido por la caldera de 15 HP	274,1119 kg vapor/ hora
Requerimiento total de vapor	530,42 kg vapor/ hora
Factor C	0,5168 (adimensional)
Porcentaje de cumplimiento de vapor	51,6783 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Análisis económico de las tres opciones diferentes de calderas propuestas**

Análisis económico	Opción 1	Opción 2	Opción3
VPN	Q 153 886,20	Q 26 409,28	Q 264 575,14
TIR	19 %	10 %	29 %

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Características de la caldera a proponer según análisis económico, opción 3**

Requerimiento total de vapor actual	530,4151 Kg vap/h
Caballos de fuerza equivalentes al requerimiento actual	42,3569 BHP
Dimensionamiento caldera	60 BHP
Marca a proponer	Fulton
Consumo de combustible al mes	2 520,00 Quetzales/mes
Cotización total de la opción a proponer	\$ 80 080,00

Fuente: elaboración propia.

4.2. Programa preventivo para el sistema de vapor

A continuación, se describe una serie de actividades propuestas para realizar un mantenimiento preventivo en el sistema de vapor.

4.2.1. Agua de alimentación caldera

El tratamiento de agua para una caldera es necesario y fundamental para asegurar larga vida útil libre de problemas operacionales dentro del sistema de vapor; a partir de esto, se realizaron cambios en los procedimientos actuales de la empresa. El agua que se utilizaba al inicio para alimentar la caldera del sistema de vapor actual de 15BHP era potable, según los resultados que se muestran en la tabla XXIII.

Actualmente se está cumpliendo con los parámetros especificados por el proveedor a partir de las siguientes mejoras:

- Se cambió de agua potable a desmineralizada, el suministro del tanque de la caldera de 15 BHP, así se disminuyó la conductividad y dureza total.
- Se propuso automatizar el sistema de purga de fondo y de superficie de la caldera, actualmente el sistema es manual, la purga de fondo es importante porque: al agua de ingreso penetran sales disueltas, a la vez que el vapor que sale no contiene impurezas, lo que produce un aumento de la concentración de sólidos disueltos; si este fenómeno no se controla se producirá espuma, lo que causa arrastre y contaminación del vapor; ahí la importancia de la purga de fondo. Uno de los proveedores acá en Guatemala para automatizar este tipo de procesos es Spirax Sarco.

Tabla XXXIX. **Análisis del agua de alimentación a la caldera de 15HP**

Análisis	Resultado	Límites	Unidades	Dictamen
PH	11,9	10,5-12	NA	Cumple
Total, sólidos disueltos	800	Max. 3 500	Ppm	Cumple
Conductividad	22,08925	Menor a 5	μS/cm	Cumple
Dureza total	0	0	ppm como CaCO3	Cumple
Alcalinidad total "M"	700	700-800	ppm como CaCO3	Cumple
Alcalinidad Hidróxidos	150	Max. 500	ppm como CaCO3	Cumple
Fosfatos	30	30 – 60	ppm como PO3	Cumple
Sulfitos	20	20 – 40	ppm como SO3	Cumple
Cloruros	40	Max. 200	ppm como Cl	Cumple
Sílice	60	Max. 120	ppm como SO2	Cumple
Purgas	4/día	Mínimo 3 al día	NA	Cumple

Fuente: elaboración propia.

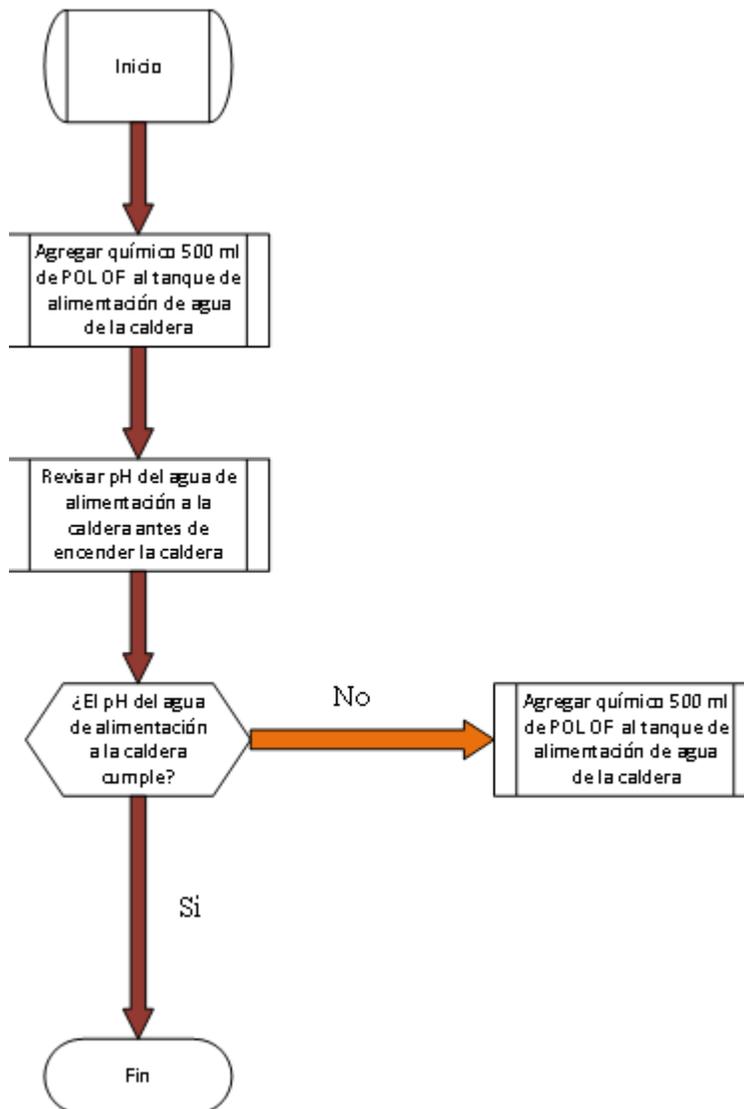
Figura 17. **Automatización del proceso de purga**



Fuente. Spirax Sarco. Purga de calderas. p 122.

- Tratamiento del agua con productos químicos, se recomienda utilizar “POL OF”, es un químico distribuido en Guatemala por POLCHEMICAL, es un anti incrustante para la industria, generación de vapor y sistemas de lavandería.
- El pH de este químico se encuentra alrededor de 13,5, lo que permitiría aumentar el pH del agua en el tanque de alimentación ya que esta se encuentra según la tabla XXI a pH 8,40, fuera del rango recomendado.

Figura 18. Diagrama de flujo procedimiento adición del químico al tanque de almacenamiento de agua de la caldera actual



Fuente: elaboración propia.

4.2.2. Programa de mantenimiento preventivo mecánico de los distintos elementos del sistema de vapor

El objetivo del presente programa de mantenimiento preventivo es el mejorar la fiabilidad global del sistema de vapor y el aumento de la vida útil de los equipos involucrados en dicho sistema; el programa se llevará a cabo en fechas que no interfieran con las actividades diarias de la planta; por tal razón, se realizará a cabo en vacaciones de medio año y diciembre para aprovechar que en dichas épocas la planta se encuentra parada.

Tabla XL. Programa de mantenimiento preventivo de los equipos involucrados en el sistema de vapor

No.	Acción	Fotografía
1	Vaciar la caldera de agua.	
2	Revisar que todo este desconectado.	
3	Quitar tortugas.	
4	El interior de la caldera se debe lavar, es decir, el hogar y los pasos que la conforman; a partir de una hidrolavadora y se deben raspar las hebras.	

Continuación de la tabla XL.

5	Proceder a quitar el quemador.	
6	El quemador se deberá limpiar con tiner, no limar, porque podría desgastar el aislante.	
7	Revisar el indicador de nivel de la caldera, si está muy sucio se deberá cambiar.	
8	Realizar una revisión a la cámara de agua y a la cámara de fuego.	
9	Armar nuevamente la caldera, colocar el quemador en su lugar. Sellar las tortugas, sellar la parte superior de la caldera, con una mezcla de asbesto más agua.	

Continuación de la tabla XL.

10	Abrir la chimenea, también deberá limpiarse, se deberán retirar todos los sólidos depositados en el fondo.	
11	Los controles deberán calibrarse, seleccionar la presión máxima de trabajo a la cual se requiere que trabaje la caldera. En el caso de la caldera de 15 HP, se selecciona una presión máxima de 120 PSI.	
12	Conectar el sistema eléctrico y llenar nuevamente la caldera con agua.	
13	Encender la caldera.	

Continuación de la tabla XL.

14	Verificar que la caldera llegue a los 120 PSI de presión máxima, esto significa que al llegar a esta presión deberá parar automáticamente.	 A circular pressure gauge with a white face and black markings. The scale ranges from 0 to 200 PSI in increments of 20. The needle is pointing to approximately 120 PSI. The brand name 'ASHCROFT' and the model '436-118' are visible on the gauge face. It has a brass-colored threaded fitting at the bottom.
15	Verificar la válvula de emergencia, que se encuentra en la parte superior de la caldera.	 A brass emergency valve with a red plastic cap on top. It is connected to a black cylindrical pressure gauge. The gauge has a white face with red markings and a needle pointing to approximately 120 PSI. The brand name '&' is visible on the valve body.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **Programa preventivo de los equipos que conforman la red de vapor**

Equipo	Período de frecuencia	Acción preventiva
Caldera	Cada 6 meses	Para el mantenimiento de la caldera Fulton de 15HP, es necesario vaciarla, quitar las tortugas y revisar que todo este desconectado. Se debe lavar por dentro se recomienda utilizar una hidro lavadora, las hebras se raspan. Se quita el quemador; los electrodos del quemador se limpian con tiner, no se liman, porque se desgasta el aislante. Se debe realizar una revisión a la cámara de agua y a la cámara de fuego. Se realiza una calibración a los controles y protecciones; es recomendable inspeccionar si existen posibles fugas.
Bomba de alimentación caldera y la bomba de diésel	Cada 6 meses	Es fundamental llevar a cabo la revisión de los empaques, el sello mecánico, determinar si es necesario un cambio del cojinete del motor, entre otros.

Fuente: elaboración propia.

4.2.3. Rediseño sistema de vapor

A continuación, se presentan los diámetros de tuberías y los calibres del material aislante que se utilizarán en el sistema de vapor.

Tabla XLII. **Diámetros de las tuberías que conforman la red de vapor**

Línea del circuito	D (m)	Aislante Fibra de vidrio (m)	Material tubería
Línea 2 M500	0,0381	0,0254	Acero al carbono
Línea 3 M1000	0,0381	0,0254	
Línea 4 Ac	0,0762	0,0254	
Línea 5.1 Manejadora A001	0,0762	0,0635	
Línea 5.2 Manejadora A002	0,0762	0,0635	
Línea 5.3 Manejadora A004	0,0762	0,0635	
Línea 5.4 Manejadora A005	0,0762	0,0635	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. **Caídas de presión de las diferentes líneas del circuito de vapor**

Línea del circuito	Caída de presión (Pa)	Caída de presión (PSI)	Porcentaje en caída de presión
Línea 2 M500	68 647,8072	9,9565	6,9093 %
Línea 3 M1000	72 889,7212	10,5718	1,1570 %
Línea 4 Ac	53 756,2521	7,7967	8,2743 %
Línea 5.1 Manejadora A001	86 190,0417	12,5008	9,9518 %
Línea 5.2 Manejadora A002	86 367,4627	12,5265	9,7664 %
Línea 5.3 Manejadora A004	88 282,9282	12,8043	7,7652 %
Línea 5.4 Manejadora A005	92 791,4646	13,4582	3,0549 %

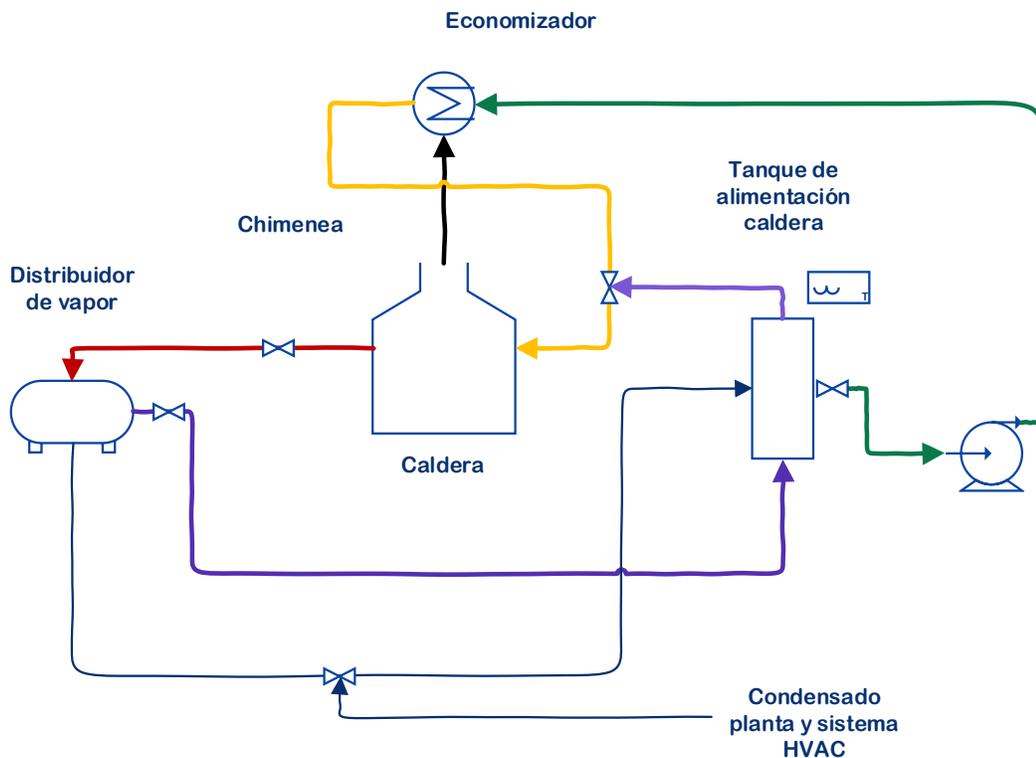
Fuente: elaboración propia.

4.2.4. Red de retorno de condensado

Para la red de condensado se realizaron los siguientes cambios:

Se instaló un serpentín dentro del tanque de agua de alimentación a la caldera de 15 BHP y se recolecto el condensado de todos los equipos que forman parte del sistema de vapor.

Figura 19. Diagrama de equipo red de retorno de condensado



Fuente: elaboración propia.

4.2.5. Características de la red de condensado

A continuación, se presentan los diámetros de las tuberías que se utilizarán en la red de condensados.

Tabla XLIV. **Diámetros de las tuberías que conforman la red de condensado**

Línea del circuito	D (m)	Aislante Fibra de vidrio (m)	Material tubería
Planta de producción	0,0254	0,0064	Acero al carbono
Sistema HVAC	0,0254	0,0064	

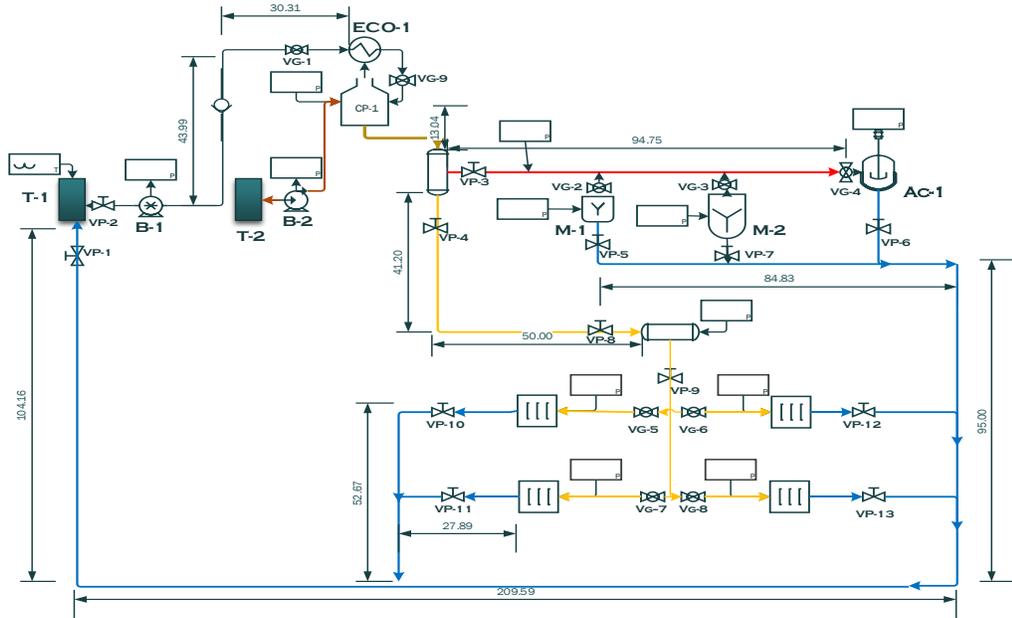
Fuente: elaboración propia.

Tabla XLV. **Caídas de presión de las diferentes líneas del sistema de condensado**

Línea del circuito	Caída de presión (Pa)	Caída de presión (PSI)	Porcentaje en caída de presión
Planta de producción	647,8072	3,2569	1,5269%
Sistema HVAC	889,7212	5,6248	3,7100%

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. Diagrama de equipo del sistema de vapor con la caldera de 15 BHP



Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVI. Códigos del diagrama de equipo del sistema de vapor

Equipo	Código	Figura
Autoclave	AC-1	
Marmita 500 L	M-1	
Marmita 1000 L	M-2	

Continuación de la tabla XLVI.

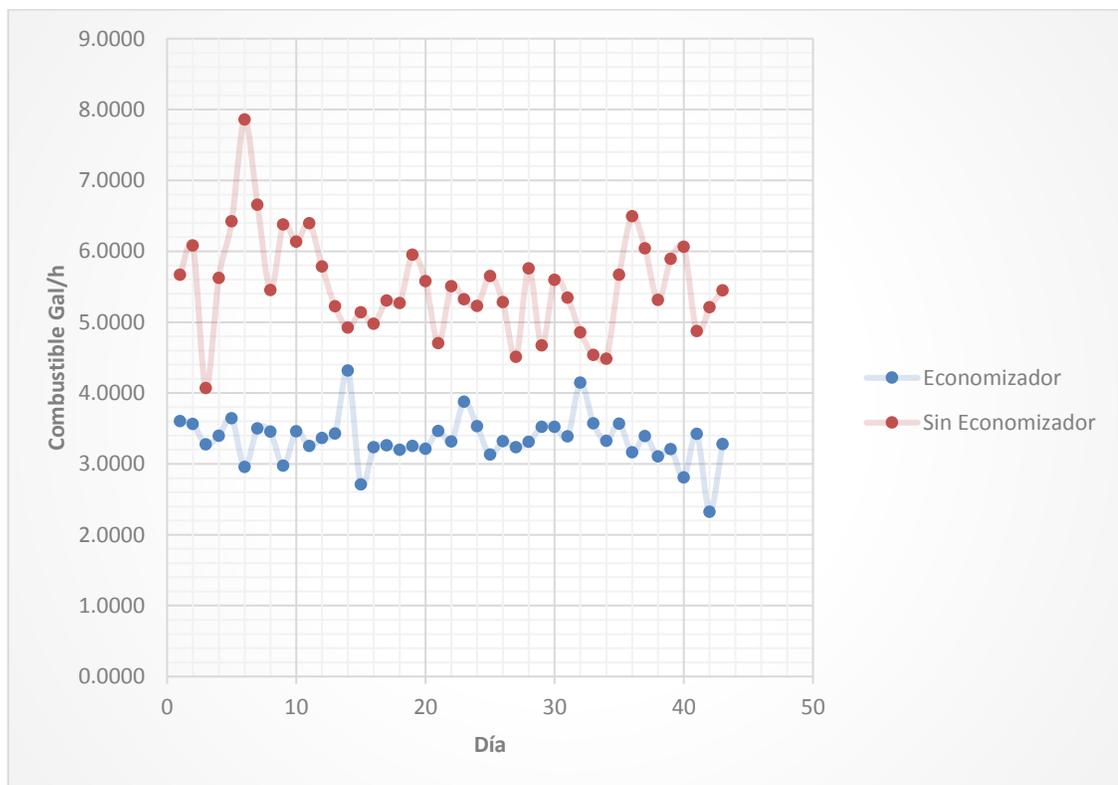
Economizador	ECO-1	
Tanque de agua	T-1	
Tanque de diésel	T-2	
Bomba de agua	B-1	
Bomba de diésel	B-2	
Caldera pirotubular	CP-1	
Manejadora	M-1	

Fuente: elaboración propia.

4.2.6. Propuesta e implementación de una solución al consumo de combustible actual

Se realizó el diseño y la implementación de un economizador a la salida de los gases de combustión de la caldera de 15 BHP; a continuación, se presenta la comparación del consumo de combustible antes y después de la implementación del economizador dentro del sistema de vapor actual.

Figura 21. Comparación consumo de combustible



Fuente: elaboración propia.

4.2.7. Diseño e implementación del economizador

A continuación, se presentan las diferentes tipos de vistas del economizador implementado en el sistema de vapor.

Tabla XLVII. Visitas del economizador

Vista de planta	 Una fotografía que muestra una vista superior (planta) de un componente del economizador. Se trata de una placa rectangular de metal con un agujero circular en el centro. A través del agujero se ven las espirales de las bobinas de serpentín.
Vista de perfil	 Una fotografía que muestra una vista lateral (perfil) de las bobinas de serpentín del economizador. Se observan varias bobinas de metal con un tubo central que se curva en forma de U.
Economizador instalado	 Una fotografía que muestra el economizador instalado en un entorno industrial. El equipo es un cilindro vertical de metal con tuberías y válvulas conectadas. Está situado en un espacio con otros equipos y estructuras de acero.

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVIII. **Dimensiones del economizador para caldera de 15 BHP**

Dimensiones	Medidas reales	
Altura	0,4000 m	
Ancho	0,5500 m	
Profundidad	0,5500 m	
Volumen	0,1210 m ³	
Longitud tubos verticales	0,4000 m	
Longitud tubos horizontales	0,1280 m	
Diámetro tubos verticales	0,0254 m	1 plg
Diámetro tubos horizontales	0,0064 m	1/4 plg
Numero de tubos verticales	6	
Número de tubos horizontales	24	
Número de codos de 90°	3	
Número de aletas	3	

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se inició el análisis del proyecto con la cuantificación de la cantidad de vapor que produce la caldera de 15 BHP, que provee al sistema actual de la planta nueva, según la tabla XXXII se están produciendo 274,11 Kg vapor/ hora para un requerimiento diario, considerando todos los equipos trabajando de 530,42 kg/h. La figura 11 es una gráfica de pie en la cual se demuestra que actualmente se trabaja con una deficiencia de vapor del 66 %; por tal razón, no es posible tener todos los equipos con requerimiento de vapor trabajando al mismo tiempo.

Para comprobar que la caldera actual no es viable ante la demanda energética actual se calculó el valor del factor C presentado en la tabla XXXII, definido como un parámetro para determinar si la caldera actual cumple con la demanda de vapor, solo sí, su valor es mayor a 1, pero según los resultados obtenidos posee un valor de 0,5168. A partir de los consumos energéticos individuales por equipo, fue posible demostrar que el sistema actual con el que cuenta la nueva planta farmacéutica requiere una caldera de 42,3569 BHP, dato presentado en la tabla XXXIV. Para seleccionar la mejor opción dentro del mercado se hizo un análisis económico, de marcas y de distribuidores dentro de la región nacional, previendo la accesibilidad de repuestos, mantenimiento, entre otros factores; para ello se analizaron tres opciones con diferentes atributos.

En la tabla XXXIII se observan los resultados del estudio económico para cada caldera, donde la opción más atractiva resulta ser la número 3, porque posee un VPN más positivo con una tasa de retorno del 29 %; esta caldera se describe en la tabla XXXIV, de marca Fulton, entrega 60 BHP, con una inversión inicial que incluye gastos de instalación y traslado de \$ 80 080,00 dólares.

Es claro ver que la inversión en una caldera nueva es una suma significativa para el laboratorio farmacéutico, por ello se consideró importante el diseñar procedimientos que estipulan condiciones que prevengan cualquier daño al equipo: mantenimiento del sistema de vapor y el tratamiento del agua de alimentación a la caldera; esto se muestra en el inciso 4.2 de la sección de resultados.

Para el tratamiento del agua de alimentación, se realizaron estudios previos en el laboratorio de fisicoquímica donde se encontró que el agua no cumplía con pH, cantidad de sulfatos y fosfatos disueltos en el agua, según parámetros especificados por el manual de la caldera actual. Como solución se propuso cumplir por lo menos con 3 purgas al día de fondo y 3 purgas de superficie ya sea que se realicen de manera manual; lo más conveniente es automatizar el sistema de purga.

Así mismo, como tratamiento interno se propuso la adición de sustancias químicas como un ablandador y un agente antiincrustante; la empresa aprobó su compra mensual y aplicación diaria; se justificó que es a partir de estas dos sustancias químicas que se logró disminuir la dureza del agua. El ablandador de intercambio catiónico reacciona con compuestos que poseen calcio y magnesio formando fosfato tricálcico, compuesto insoluble que puede ser eliminado por purgas de fondo.

El antiincrustante se añadió para prevenir la formación de cristales de fosfatos y sulfatos, ambas sustancias ayudaron a aumentar el pH del agua de alimentación llegando a un valor de 11,9, se encuentra dentro del rango especificado en la tabla XXXV, se diseñó un diagrama de flujo donde se explica el procedimiento para añadir los químicos propuestos, figura 13, se creó un procedimiento detallado en donde se explica todo lo que conlleva un

mantenimiento del sistema de vapor; adicional, se detallaron períodos de frecuencia dentro del año, con el objetivo de buscar días en pausa (planta parada), de manera de realizar el mantenimiento de forma conveniente.

Luego de definir la carga energética total y la deficiencia del sistema actual, se procedió a rediseñar el sistema de vapor en función de los 60 BHP, que teóricamente estaría entregando la caldera dimensionada, con el objetivo de verificar si es necesario cambiar diámetros en la tubería actual, o aumentar la cantidad de accesorios o trampas de vapor; en la figura 15 se presenta el diagrama de equipo del sistema de vapor actual de la planta farmacéutica. Según el análisis realizado, se recomendó utilizar tuberías de acero al carbono, por razones de costos de instalación y porque la planta ya cuenta con tubería de este material; como aislante, fibra de vidrio con una conductividad térmica de $0,04 \text{ W/m}^\circ\text{K}$.

Los diámetros obtenidos en los cálculos son aproximadamente parecidos a los que se tiene actualmente en la planta, las caídas de presión obtenidas son menores al 10 % de lo estipulado teóricamente, por lo que se encuentran dentro del criterio de diseño. Para el diseño de la red de condensado, fue necesario calcular el caudal de condensado que regresa al tanque de alimentación de agua para la caldera, los diámetros obtenidos fueron de 0,0254m.

Para las líneas de condensado provenientes del sistema HVAC, como de la planta de producción; en la figura 14 se muestra el diagrama de equipo del retorno de condensado; se observa que se instaló como algo extra un serpentín dentro del tanque de agua con la intención de aumentar la temperatura del agua de alimentación; se obtuvo un $\Delta T = 32 \text{ K}$, esto permitirá que la caldera realice menor trabajo para evaporar el agua que entra, que repercute en el consumo de combustible.

El sistema de vapor actual trabaja con una caldera de 15 BHP, la capacidad de la caldera queda en desventaja ante la demanda energética actual; por tal razón, la caldera suministra vapor todo el día, lo que en algún momento aumentó el consumo de combustible; como solución a esta problemática, se procedió a diseñar e instalar un economizador en el área de chimenea de la caldera para aprovechar la temperatura de los gases de combustión y así calentar el agua del tanque de alimentación; gracias a esta implementación los gases de chimenea disminuyeron su temperatura con un $\Delta T = 200 K$, según un análisis realizado por una compañía externa; se promueve de esta forma la producción más limpia dentro de la planta.

La figura No. 16, presenta la disminución en el consumo de combustible con el economizador, antes de su instalación se consumía 8 galones por hora, ahora el consumo máximo es de 4,5 galones por hora, permitiéndose así una disminución del 46,5 %, esto será de beneficio económico para la empresa, en lo que se compra e instala la nueva caldera.

En las tablas XLIII y XLIV es posible observar el economizador y sus dimensiones de diseño; donde se ve que posee 8 tubos internos por cada rama, con diámetros de 0,0064 m y con 6 tubos externos con diámetros de 0,0254 m; posee 3 aletas para direccionar a los gases de combustión dentro de la caja que encierra al economizador y está hecho de acero inoxidable revestido con una capa de pintura PPG Protective; se decidió escoger este tipo de pintura porque provee ventajas adicionales, tal como permitir su aplicación directa sobre óxido muy adherido en situaciones de mantenimiento y reparación; protección muy eficiente contra la corrosión.

CONCLUSIONES

1. La situación actual del sistema de vapor de la empresa se ve reflejado en el gráfico 11 de la sección de resultados, a partir de este es posible determinar que actualmente se está cumpliendo con un 34 % del requerimiento total de vapor. En la tabla XXXIII, se describe el análisis económico de tres calderas diferentes; según los resultados obtenidos, la opción 3 caldera pirotubular horizontal de 60 BHP, marca Fulton que utiliza como combustible diésel es la mejor opción; el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR), de esta alternativa son los más convenientes; se demuestra que es la opción más rentable y que la inversión inicial es posible recuperarla en un período de tiempo menor en comparación a las otras dos alternativas.
2. Según los resultados obtenidos del análisis del agua de alimentación de la caldera de 15 BHP, se demostró que con la adición del químico POL OF y el aprovechamiento del agua desmineralizada que la planta produce se mejoró la calidad del agua de alimentación a la caldera; a partir del ablandador y el antiincrustante agregados el agua se volvió más básica, disminuyendo así su conductividad y aumentando su alcalinidad; por lo que queda dentro de los parámetros especificados para este tipo de agua.

3. Se determinaron los diámetros mínimos de cada una de las ramas que forman el sistema de vapor de la planta, según se observa en la tabla XXIV de la sección de resultados; las caídas de presión generadas por cada diámetro mínimo, comparados con la caída de presión que se produce tomando la línea más larga del sistema, permiten determinar que los diámetros mínimos de tubería sí cumplen con el criterio de diseño, se obtuvieron porcentajes menores al 10 %, se demuestra de esta forma que la red de vapor actual sí soportará el caudal de vapor requerido.

4. El economizador en la caldera actual de 15 BHP y el serpentín dentro del tanque de alimentación de agua permitieron que el consumo de diésel del sistema actual se reduzca a un 46,5 % de la cantidad que se consumía antes.

RECOMENDACIONES

1. Analizar el agua de alimentación de la caldera de 15 BHP, antes de agregar el químico POL OF, colocar un agitador al tanque para mejor homogenización.
2. Realizar los mantenimientos del sistema de vapor cada vez que la planta no esté trabajando.
3. Automatizar el sistema de purgas en las calderas.
4. Cuando se instale la caldera de 60 BHP, se contará con el apoyo de dos calderas; alternar su uso.

BIBLIOGRAFÍA

1. CASTILLA Y LEON J. *Manual técnico diseño y cálculo de redes de vapor*. 1a ed. España: Ente regional de Energía. [en línea] <<http://www.spiraxsarco.com/global/mx/News/Documents/Catalogo%20Spirax%20Sarco%20Me%CC%81xico.pdf>>. [Consulta: 26 de febrero de 2018].
2. CENGEL Yunus, BOLES, Michael. *Termodinámica*. 7a ed. México: McGraw-Hill, 2012. p 145.
3. CLARKE, Lorence. *Manual of process Engineering Calculations*. 1a ed. EE.UU. McGraw-Hill, 2003. p 256.
4. KERN, Donald. *Procesos de transferencia de calor*. 3a ed. México: Compañía editorial continental, S.A. 1999. p.981.
5. MARKS, Eugene. *Manual del ingeniero Mecánico*. 2a ed. México: McGraw-Hill, 1992. p 1206.
6. MARTÍNEZ, Arsel. *Calderas industriales eficientes*. Madrid: Consejería de Economía y Hacienda, Comunidad de Madrid. [en línea] <<http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-basica-calderas-industriales-eficientes-fenercom-2013.pdf>>. [Consulta: 15 octubre 2017]

7. McCABE, Warren. *Operaciones básicas de ingeniería química*. México: McGraw-Hill, 1985. 1112 p.
8. Ministerio de Energía y Minas, Guatemala. *Históricos precios nacionales* [en línea] <<http://www.mem.gob.gt/hidrocarburos/precios-combustible-nacionales/historico-precios-nacionales/>>. [Consulta: 26 de febrero de 2018]
9. UTA, Oscar. Análisis de Orsat. [en línea] <<https://es.slideshare.net/oscarfreirebonilla/analisis-orsat>>. [Consulta: 24 de febrero 2018]
10. SPIRAX Sarco. *Purga de condensados en sistemas de vapor*. Traducción Salvador Aguirre. 2010. PDF. [en línea] <http://www.spiraxsarco.com/global/cl/Products/Documents/Purga_de_condensados_en_sistemas_de_vapor-Catalogo.pdf>. [Consulta: 5 de noviembre 2017]

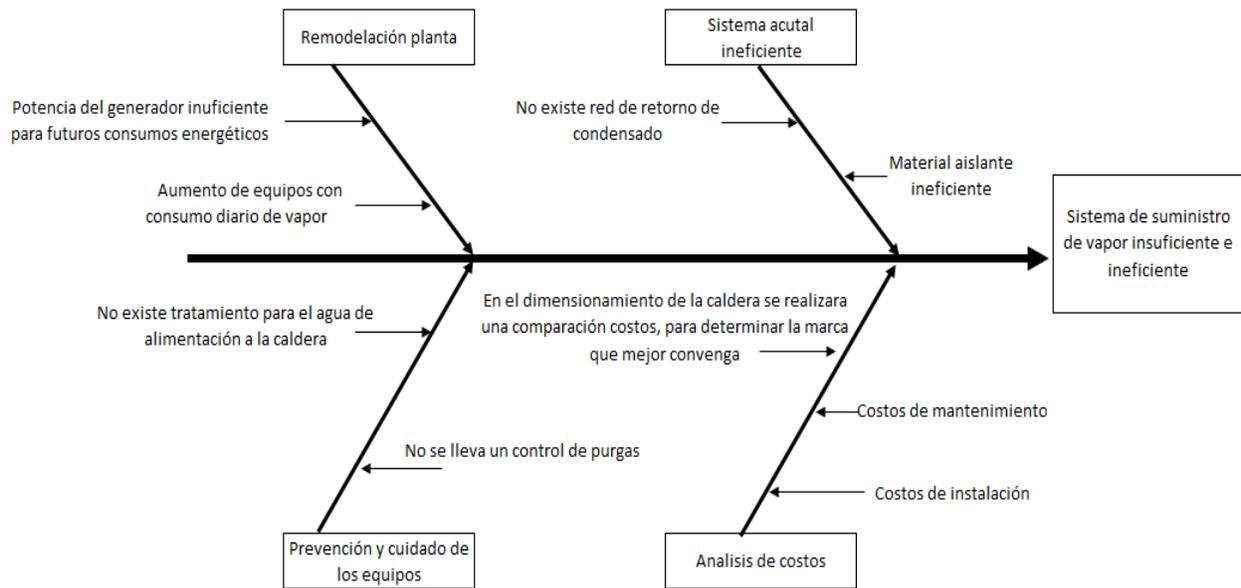
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos para la carrera de licenciatura en Ingeniería Química**

Área	Curso	Tema
Áreas de ciencias básicas y complementarias	Técnicas de estudio y de investigación	Métodos de investigación
	Estadística 1	Medidas de tendencia central y medidas de dispersión
	Estadística 2	Ensayos de hipótesis
	Ingeniería económica 1 y 3	Presupuesto y depreciación
Química	Química 3	Soluciones
	Química 4	Reacciones redox, corrosión
	Análisis cualitativo	pH de soluciones
	Análisis cuantitativo	Compuestos cuaternarios, dureza del agua.
Fisicoquímica	Termodinámica 3	Equilibrio líquido-vapor
	Fisicoquímica 2	Mezclas
Operaciones Unitarias	Balance de masa y energía (IQ-1)	Balance de masa y energía

Fuente: elaboración propia.

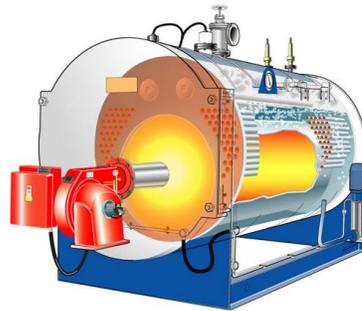
Apéndice 2. Diagrama de ishikawa



Fuente: elaboración propia.

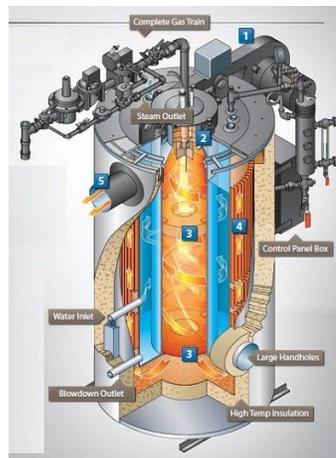
ANEXOS

Anexo 1. **Caldera pirotubular horizontal a recomendar, opción 3**



Fuente: FULTON J. Manual de instrucción, operación y mantenimiento. p 115.

Anexo 2. **Caldera pirotubular vertical de 15 BHP**



Fuente: FULTON J. Manual de instrucción, operación y mantenimiento. p 124.

Continuación del anexo 2.

- Materiales para construcción de una caldera
 - Acero inoxidable.
 - Acero al carbón.
 - Por dentro revestidas por ladrillos refractarios, los cuales evitan las fugas de calor.

- Materiales tentativos para la línea de vapor
 - Polietileno de alta densidad.
 - Fibrocemento.
 - Acero al carbón.
 - Cobre.
 - Hierro fundido.

Nota: el material más utilizado en líneas de vapor es el acero al carbón.

- Materiales para el aislamiento de tubería
 - Fibra de vidrio.
 - Lana mineral.
 - Fibra de vidrio inorgánica aglutinada con resina.

Nota: el material a utilizar dependerá del costo y la accesibilidad en el mercado nacional. Se recomienda que independiente del aislante a utilizar, un revestimiento de acero al carbono.

Fuente: FULTON J. Manual de instrucción, operación y mantenimiento. p 57.

Anexo 3. Tuberías en redes de vapor

Debido a la gran cantidad de tuberías que se encuentran en la planta, es necesaria una nomenclatura que permita reconocer de manera fácil y rápida cada tubería. Para ello se usará un código estándar que consta de cinco grupos bien diferenciados el cual describe una característica específica de la tubería. Los distintos grupos se muestran a continuación:

- Diámetro nominal

A continuación, se muestra algunos ejemplos de diámetros nominales utilizados en la industria.

Tabla 1. **Espesores y diámetros interiores de distintos tubos**

DN (")	DN (mm)	DE (mm)	ANSI									
			Sch 10	Sch 20	Sch 30	Sch 40	Sch 60	Sch 80	Sch 100	Sch 120	Sch 140	Sch 160
			Espesor									
3/8	10	17,1	-	-	-	2,31	-	3,2	-	-	-	-
1/2	15	21,3	-	-	-	2,77	-	3,73	-	-	-	4,78
3/4	20	26,7	-	-	-	2,87	-	3,91	-	-	-	5,56
1	25	33,4	2,77	-	-	3,38	-	4,55	-	-	-	6,35
1 1/4	32	42,2	2,77	-	-	3,56	-	4,85	-	-	-	6,35
1 1/2	40	48,3	2,77	-	-	3,68	-	5,08	-	-	-	7,14
2	50	60,3	2,77	-	-	3,91	-	5,54	-	-	-	8,74
2 1/2	65	73,0	3,05	-	-	5,16	-	7,01	-	-	-	9,53
3	80	88,9	3,05	-	-	5,49	-	7,62	-	-	-	11,12
4	100	114,3	3,05	-	-	6,02	-	8,56	-	11,13	-	13,49
5	125	141,3	3,4	-	-	6,55	-	9,52	-	12,7	-	15,88
6	150	168,3	3,4	-	-	7,11	-	10,97	-	14,28	-	18,26
8	200	219,1	4,78	6,35	7,04	8,18	10,31	12,7	15,09	18,26	20,62	23,01
10	250	273,0	4,19	6,35	7,8	9,27	12,7	15,09	18,26	21,44	25,4	28,58
12	300	323,8	4,57	6,35	8,38	10,31	14,27	17,48	21,44	25,4	28,58	33,33
14	350	355,6	6,35	7,92	9,52	11,13	15,09	19,05	23,83	27,79	31,75	35,71
16	400	406,4	6,35	7,92	9,52	12,7	16,66	21,44	26,19	30,96	36,53	40,49
20	500	508,0	6,35	9,52	12,7	15,09	20,62	26,19	32,54	38,1	44,45	50,01
24	600	609,6	6,35	9,52	14,27	17,47	24,61	30,96	38,89	46,03	52,37	59,54

- Espesores de aislante (fibra de vidrio) según el valor del diámetro de la tubería:

Continuación del anexo 3.

Tabla 2. **Espesores de aislante según el diámetro**

Diámetro (in)	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	Espesor (in)	Espesor comercial (in)
6.00	150	89	3.50	4.00
3.00	76	64	2.50	2.50
4.00	100	64	2.50	2.50
2.00	50	64	2.50	2.50
1.25	38	64	2.50	2.50
1.50	19	64	2.50	2.50
0.75	0.75	0.75	0.75	0.75

Fuente: CASTILLA Y LEON J. Manual técnico diseño y cálculo de redes de vapor. p 218.

- **Material de la tubería**

En la industria, los materiales de construcción de tuberías más utilizados son los aceros; comúnmente se utilizan dos tipos de acero: el acero al carbono y el acero inoxidable AISI. Además de los aceros existen materiales más económicos hechos base resinas sintéticas que han dan muy buenos resultados por su relación calidad.

A continuación, se mencionan algunos ejemplos:

- AISI 316 L: este tipo de acero inoxidable se usa en piezas que requieren una alta resistencia en la corrosión localizada y cuando además se necesita una menor proporción de carbono que el tipo 304 para restringir la precipitación de carburos que resultan de la soldadura, especialmente cuando las partes no pueden recibir tratamiento térmico después de soldar.

Continuación del anexo 3.

- ST 195T: es un tipo de acero al carbono con una composición química de 0,2 % máximo de carbono, 1,40 % máximo de manganeso, 0,035 % fósforo y 0,030 % azufre. Este tipo de acero al carbono puede presentar corrosión altas temperaturas, por lo que se utilizará en las tuberías que tengan un rango de temperatura inferior a 120 °C.
- PVC: el policloruro de vinilo se caracteriza por ser un material dúctil, tenaz i presentar estabilidad dimensional y resistencia ambiental. Es un tipo de material más económico que los aceros y se usa por conducciones donde los fluidos no presentan corrosión. Este tipo de material será usado por ejemplo en las tuberías de servicios de agua de las torres de refrigeración.
- Teflón: posee un bajo coeficiente de fricción, inferior a 0,1. El coeficiente de fricción representa la facilidad o dificultad que poseen los cuerpos para deslizarse unos sobre otros o sobre cualquier superficie. Mientras menos resistencia oponga y más fácilmente se deslicen, más bajo será su coeficiente de fricción.

Fuente: CASTILLA Y LEON J. Manual técnico diseño y cálculo de redes de vapor. p 220.

Anexo 4.

Número de cédula tuberías de vapor

Tuberías comerciales de acero, con base en ANSI B36.10:1970 y BS 1600: Parte 2: 1970										
Espesor de la tubería según número de cédula										
Medida tubería en pulgadas	Diámetro o tubería (mm)	Espesor (mm)	Diámetro interior (mm)	Medida tubería en pulgadas	Diámetro tubería (mm)	Espesor (mm)	Diámetro interior (mm)			
Cédula 10	14	355.5	0.36	342.9	Cédula de 80 (continuación)	3.5	202.6	8.08	33.4	
	16	406.4	6.35	393.7		4	114.3	3.56	97.2	
	18	457.2	6.35	444.5		5	242.3	9.52	122.3	
	20	508	6.35	495.3		6	168.3	10.97	146.4	
	24	609.6	6.35	596.9		1	219.1	12.7	193.7	
	28	762	7.22	766.2		10	273.0	15.1	242.8	
Cédula 20	8	219.4	6.38	206.4	Cédula de 100	12	323.0	17.47	289	
	10	273	6.38	260.3		14	355.6	19.05	317.5	
	12	222.8	6.35	211.2		18	406.3	21.44	363.6	
	14	366.6	7.92	339.3		20	457.2	26.19	409.3	
	16	406.4	7.92	390.6		24	609.6	25.56	547.5	
	18	457.2	7.92	441.4		Cédula 120	8	219.1	15.39	118.9
	20	508	6.52	489			10	273	18.26	236.5
	24	602.6	7.92	590.6			12	323.9	21.44	281
	30	762	12.7	736.6			14	355.6	23.82	308
Cédula 30	8	219.1	7.04	205	16		406.4	26.19	354	
	10	273	7.8	157.4	18	457.2	26.36	398.5		
	12	323.9	8.38	107.1	20	508	32.54	442.9		
	14	355.6	7.82	336.6	24	609.4	38.59	521.9		
	16	406.1	9.52	287.1	Cédula 120	4	114.3	15.09	92	
	18	457.2	11.13	445250004		5	141.3	18.26	115.9	
	20	508	22.7	482.6		6	168.2	21.44	199.8	
	24	609.9	14.27	581.1		8	219.1	23.82	182.2	
	30	762	18.88	730.2		10	273	26.19	232.1	
Cédula 4	0.5	10.3	1.7	6.8		12	323	29.36	273.1	
	0.25	11.7	2.24	9.2	14	355.6	32.54	300		
	0.125	17.1	2.32	12.3	16	406.4	32.39	344.5		
	1	22.2	2.77	16.8	18	457.3	52.36	337.4		
	1.25	26.7	2.87	21	20	508.3	35.62	431.8		
	1.5	23.8	2.38	10	24	608.9	34.52	517.6		

Continuación apéndice 4.

	2	12.2	2.56	35.1	140	1	219.1	20.62	177.9
	2.5	44.3	2.48	40.9		10	273	25.4	222.2
	3.5	60.3	2.91	52.5		12	323.9	28.58	266.7
	4	73	5.16	62		14	355.6	31.75	292.1
	5	85.9	6.49	17.9		16	406.4	36.52	333.4
	6	101.6	5.74	99.1		18	457.2	39.69	377.8
	8	114.3	6.02	102.3		20	508.6	44.45	419.1
	10	141.2	6.55	128.2		24	609.6	52.29	504.1
	12	161.3	7.11	154.1		0.5	21.3	4.78	11.7
	14	219.1	8.18	202.7		0.75	26.7	5.56	16.6
	16	273	9.27	254.5		1	32.4	6.25	20.7
	18	323.9	10.33	300.3		1.25	42.2	6.35	29.5
	20	566.6	11.13	333.3		1.5	48.3	7.14	34
	24	609.6	12.76	281		2	40.3	8.74	42.8
Cédula 60	1	219.1	10.31	198.5	Cédula 160	2.5	73.6	9.52	54
	10	273	12.7	247.6		3	70.9	11.12	66.6
	12	323.9	14.27	295.7		4	114.3	13.49	87.5
	14	355.6	15.09	325.4		5	141.3	15.88	109.5
	16	406.4	15.14	373.3		6	168.3	18.28	121.5
	18	457.2	19.05	419.1		8	219.1	23.01	171.1
	20	508	20.62	466.3		10	273	28.58	215.8
	24	609.6	246.1	560.4		12	323.9	22.24	257.2
Cédula 80	0.5	10.3	2.41	3.3	14	355.6	36.71	234.2	
	0.25	11.7	2.32	7.7	16	406.4	40.49	325.4	
	0.125	17.1	3.2	10.7	18	547.2	45.24	366.7	
	1	32.4	3.73	13.8	20	508.6	50.01	408	
	1.25	42	3.91	18.9	24	609.6	59.54	490.8	
	1.5	40	4.55	24.3					
	2	60.3	4.85	49.2					
	2.5	73	6.64	39					
	3	88.9	7.62	73.7					

Fuente: CASTILLA Y LEON J. Manual técnico diseño y cálculo de redes de vapor. p 346.

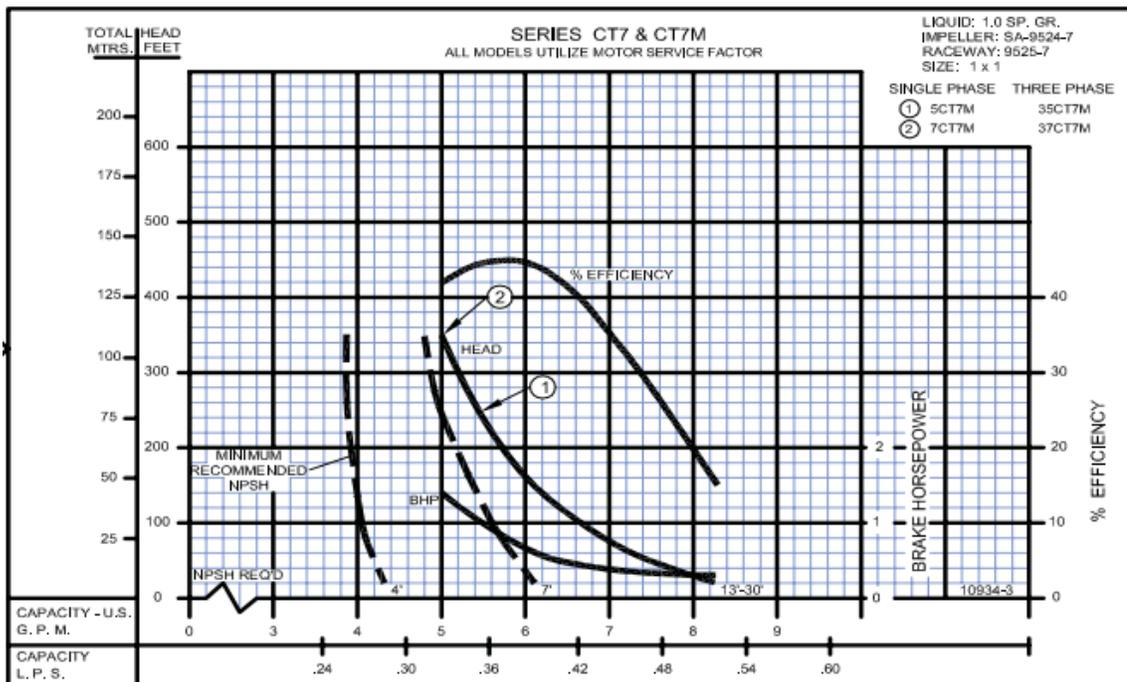
Anexo 5. Presión Nominal según norma ANSI

PN ANSI	MATERIAL					ACEROS INOXIDABLES				
	Carbón		1,1 1/4Cr, 1Mo	2 1/4 Cr, 1Mo	5 Cr, 1/2 Mo	Tipo 304	Tipo 316	Tipo 304L	Tipo 309	Tipo 310
	Normal	C + 1/2 Mo						Tipo 316L		
150 Lb										
(-20. 100)	285	265	290	290	290	275	275	230	260	260
200	260	260	260	260	260	235	240	195	230	230
300	230	230	230	230	230	205	215	175	220	220
400	200	200	200	200	200	180	195	160	200	200
500	170	170	170	170	170	170	170	145	170	170
600	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
650	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125
700	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
750	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
800	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
850	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65
900	50	50	50	50	50	50	50		50	50
950	35	35	35	35	35	35	35		35	35
1000	20	20	20	20	20	20	20		20	20
300 Lb										
(-20,100)	740	695	750	750	750	720	720	600	670	670
200	675	680	710	715	750	600	600	505	605	605
300	655	655	675	675	730	530	530	455	570	570
400	635	640	660	650	705	470	470	415	535	535
500	600	620	640	640	665	435	435	380	505	505
600	550	605	605	605	605	415	415	360	480	480
650	535	590	590	590	590	410	410	350	465	465
700	535	570	570	570	570	405	405	345	455	455
750	505	530	530	530	530	400	400	335	445	445
800	410	510	510	510	500	395	395	330	435	435
850	270	485	485	485	440	390	390	320	425	425
900	170	450	450	450	355	385	385		415	415
950	105	280	380	380	260	375	375		385	350
1000	50	165	225	270	190	325	360		335	335
1050			140	200	140	310	350		290	290
1100			95	115	105	260	325		225	245
1150			50	105	70	195	275		170	205
1200			35	55	45	155	205		130	160
1250						110	180		100	120
1300						85	140		80	80
1350						60	105		60	55
1400						50	75		45	40
1450						35	60		30	30
1500						25	40		25	25

Fuente: CASTILLA Y LEON J. Manual técnico diseño y cálculo de redes de vapor. p 346.

Anexo 6. Curva característica bomba

El comportamiento hidráulico de una bomba viene especificado en sus curvas características que representan una relación entre los distintos valores del caudal proporcionado por la misma con otros parámetros como la altura manométrica, el rendimiento hidráulico, la potencia requerida y la altura de aspiración, que están en función del tamaño, el diseño y la construcción de la bomba. Estas curvas, obtenidas experimentalmente en un banco de pruebas, son proporcionadas por los fabricantes a una velocidad de rotación determinada (N). Se representan gráficamente, colocando en el eje de abscisas los caudales y en el eje de ordenadas las alturas, los rendimientos, las potencias y las alturas de aspiración.



Fuente. CRANE C. Pumps and systems. p 145.

