



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

**ANÁLISIS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y RED DE
DISTRIBUCIÓN DE VAPOR PARA LAS ÁREAS DE CENTRAL DE EQUIPOS, LAVANDERÍA
Y COCINA CORRESPONDIENTE AL HOSPITAL CENTRO MÉDICO MILITAR**

Diego José David Fuentes Alonzo

Asesorado por el Ing. Luis Fernando Cuyan Culajay

Guatemala, febrero de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y RED DE
DISTRIBUCIÓN DE VAPOR PARA LAS ÁREAS DE CENTRAL DE EQUIPOS, LAVANDERÍA
Y COCINA CORRESPONDIENTE AL HOSPITAL CENTRO MÉDICO MILITAR**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

DIEGO JOSÉ DAVID FUENTES ALONZO

ASESORADO POR EL ING. LUIS FERNANDO CUYAN CULAJAY

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

GUATEMALA, FEBRERO DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurgen Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Nuñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez (a.i.)
EXAMINADOR	Ing. Alberto Eulalio Hernández García
EXAMINADORA	Inga. María Eugenia Aguilar Bobadilla
EXAMINADOR	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez
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:

ANÁLISIS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y RED DE DISTRIBUCIÓN DE VAPOR PARA LAS ÁREAS DE CENTRAL DE EQUIPOS, LAVANDERÍA Y COCINA CORRESPONDIENTE AL HOSPITAL CENTRO MÉDICO MILITAR

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, con fecha 3 de marzo de 2016.



Diego José David Fuentes Alonzo

Guatemala, Octubre de 2016

Señor Director
Ing. Juan José Peralta Dardón
Escuela de Mecánica Industrial
Facultad de Ingeniería

Estimado Ing. Peralta:

Atentamente me dirijo a usted para informarle que he asesorado la elaboración de la tesis titulada "ANÁLISIS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y RED DE DISTRIBUCIÓN DE VAPOR PARA LAS ÁREAS DE CENTRAL DE EQUIPOS, LAVANDERÍA Y COCINA CORRESPONDIENTE AL HOSPITAL CENTRO MÉDICO MILITAR", al estudiante **Diego José David Fuentes Alonzo**, quien se identifica con número de carné **2011-22758**, habiendo cumplido las instrucciones del suscrito ha completado el desarrollo de su trabajo.

El trabajo de tesis cumple con los objetivos planteados, y además, se ajusta al contenido indicado y autorizo según protocolo, lo que permite seguir los trámites correspondientes.

Atentamente,



Ing. Luis Fernando Cuyan Culajay
Ingeniero Mecánico Industrial
Colegiado No.8107

Luis Fernando Cuyan Culajay
ING. MECANICO INDUSTRIAL
COLEGIADO No. 8107



REF.REV.EMI.195.016

Como Catedrático Revisor del Trabajo de Graduación titulado **ANÁLISIS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y RED DE DISTRIBUCIÓN DE VAPOR PARA LAS ÁREAS DE CENTRAL DE EQUIPOS, LAVANDERÍA Y COCINA CORRESPONDIENTE AL HOSPITAL CENTRO MÉDICO MILITAR**, presentado por el estudiante universitario **Diego José David Fuentes Alonzo**, apruebo el presente trabajo y recomiendo la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



Ing. Sergio Antonio Torres Méndez
Catedrático Revisor de Trabajos de Graduación
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

Guatemala, noviembre de 2016.

/mgp



REF.DIR.EMI.018.017

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el Visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística del trabajo de graduación titulado **ANÁLISIS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y RED DE DISTRIBUCIÓN DE VAPOR PARA LAS ÁREAS DE CENTRAL DE EQUIPOS, LAVANDERÍA Y COCINA CORRESPONDIENTE AL HOSPITAL CENTRO MÉDICO MILITAR**, presentado por el estudiante universitario **Diego José David Fuentes Alonzo**, aprueba el presente trabajo y solicita la autorización del mismo.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. José Francisco Gómez Rivera
DIRECTOR a.i.
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial



Guatemala, febrero de 2017.

/mgp

Universidad de San Carlos
de Guatemala

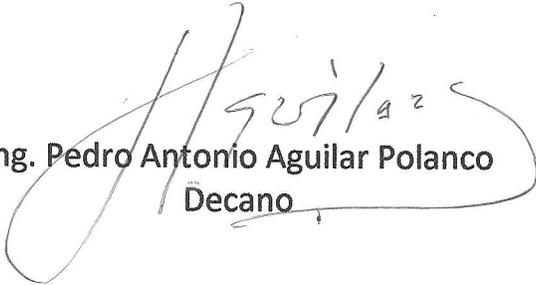


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 099.2017

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 Mecánica Industrial, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y RED DE DISTRIBUCIÓN DE VAPOR PARA LAS ÁREAS DE CENTRAL DE EQUIPOS, LAVANDERÍA Y COCINA CORRESPONDIENTE AL HOSPITAL CENTRO MÉDICO MILITAR**, presentado por el estudiante universitario: **Diego José David Fuentes Alonzo**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, -febrero de 2017

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por nunca desampararme, por darme la salud y la sabiduría para cumplir con este objetivo en mi vida. Por brindarme bendiciones y permitirme ser su instrumento a través de estos años.
- Mi madre y mi padre** Mariela Magaly Alonzo de Fuentes y Fredy Fuentes Yancor, por brindarme su amor y su apoyo incondicional, por alentarme en cada momento de mi vida a ser una mejor persona y ser mis ejemplos de superación y constancia.
- Mi abuelo** Rubén Fuentes Julián, por ser parte importante de mi vida y hacerle sentir orgulloso allá en el cielo.
- Mis hermanos** José Augusto, Josué y Pedro, por sus consejos, apoyo y ayuda siempre que lo he necesitado.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por su cobijo en sus salones de clases y ser el alma máter de mis estudios. Orgulloso de pertenecer a esta Universidad.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme las herramientas y el conocimiento, que me ayudaran a cumplir mis metas profesionales.
Mis amigos de la Facultad	José Maldonado, Marcella Chávez, Luis Polanco, Saúl Sandoval, Kevin Oliva, Azeneth Estrada, Pedro Puluc, Oscar Cantoral, Eswin López, Edwin Monroy, Ricardo Barrios, por su acompañamiento en esta aventura y apoyo durante de este ciclo.
Mis amigos del colegio	Edgar Reyes, Sergio Aguilar, Javier Fajardo, Saraí Estrada, Ibeth Illescas, por su amistad a través de los años.
Mi asesor	Ing. Luis Fernando Cuyan Culajay por acompañarme en el proceso de mi trabajo de graduación.

Centro Médico Militar

Por haberme abierto sus puertas y dejarme desarrollar mi trabajo de investigación sin ningún tipo de impedimento.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
OBJETIVOS.....	XVII
HIPÓTESIS.....	XVIII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES GENERALES	1
1.1. Antecedentes del Centro Médico Militar	1
1.1.1. Historia	1
1.1.2. Misión	3
1.1.3. Visión.....	4
1.1.4. Organización.....	4
1.1.5. División de Ingeniería	5
1.1.5.1. Misión.....	6
1.1.5.2. Objetivos	6
1.1.5.3. Organización	6
1.1.6. Ubicación geográfica	8
1.2. Componentes de una red de vapor	9
1.2.1. Calderas	10
1.2.1.1. Tipos de calderas	11
1.2.2. Tuberías	14
1.2.2.1. Tubería principal.....	14
1.2.2.2. Retorno de condensado	15

1.2.3.	Accesorios.....	16
2.	EVALUACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL	19
2.1.	Áreas que emplean vapor en el sistema	19
2.1.1.	Descripción del proceso de autoclaves	19
2.1.2.	Descripción del proceso de lavandería	22
2.1.3.	Descripción de proceso de cocina.....	24
2.2.	Sistema de generación de vapor.....	25
2.2.1.	Caldera.....	26
2.2.1.1.	Estado externo de caldera.....	26
2.2.2.	Insumos para funcionamiento de caldera.....	28
2.2.2.1.	Bunker.....	28
2.2.2.2.	Agua.....	29
2.2.2.3.	Aire comprimido	32
2.2.2.4.	Chimenea.....	34
2.3.	Sistema de distribución de vapor	36
2.3.1.	Estado de tubería actual.....	36
2.3.2.	Estado de tubería de retorno de condensado	39
2.3.3.	Accesorios.....	41
2.3.4.	Auditoría energética en tuberías	43
2.4.	Generación de vapor.....	47
2.4.1.	Eficiencia de caldera	48
2.4.2.	Medición de emisiones de caldera	51
2.4.3.	Nivel de producción de vapor	53
2.5.	Disminución de vapor.....	55
2.5.1.	Características de tubería principal	55

3.	ANÁLISIS DE MEJORA DE EFICIENCIA	59
3.1.	Mejora de diseño en tubería	59
3.1.1.	Diámetro de la tubería principal	59
3.1.2.	Longitud de la tubería	61
3.1.3.	Velocidad de vapor	63
3.1.4.	Aislamiento	64
3.2.	Mejora en el retorno de condensado	67
3.2.1.	Acciones correctivas.....	69
3.2.1.1.	Cambio de trampas de vapor en mal estado.....	70
3.2.1.2.	Inclinación de tubería	70
3.2.1.3.	Condensado no recuperado	71
3.3.	Rendimientos de equipos que utilizan vapor	72
3.3.1.	Marmitas.....	73
3.3.2.	Planchadoras.....	75
3.3.3.	Autoclaves	77
3.4.	Acciones de mejora en generación de vapor.....	78
3.4.1.	Aumento de exceso de suministro de aire	78
3.4.2.	Controles de temperatura en gases de combustión	79
3.4.3.	Nueva eficiencia	80
3.5.	Análisis financiero.....	82
3.5.1.	Costos de implementación.....	82
3.5.2.	Período de retronó de inversión.....	85
3.5.3.	Valor presente neto	87
3.5.4.	Tasa interna de retorno (TIR)	88
4.	PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN	91
4.1.	Procedimientos para mejora en la generación de vapor	91

4.1.1.	Control de nivel de agua.....	91
4.1.2.	Controles de purga.....	94
4.1.3.	Mantenimiento preventivo de caldera.....	97
4.2.	Procedimientos para mejora de distribución de vapor.....	101
4.2.1.	Tubería principal.....	101
4.2.2.	Retorno de condensado	104
4.2.3.	Distribución adecuada de accesorios a través de la tubería	107
4.3.	Medidas de mitigación de reducción de impacto ambiental ...	111
4.3.1.	Consumo de bunker	112
4.3.2.	Pretratamiento de agua	114
4.3.3.	Precalentamiento de aire.....	120
5.	SEGUIMIENTO Y MEJORA CONTINUA	123
5.1.	Mediciones	123
5.1.1.	Controles de contaminantes en emisiones.....	123
5.1.2.	Control de presión de trabajo	124
5.1.3.	Insumos.....	125
5.2.	Mejora continua.....	125
5.2.1.	Evaluación de parámetros óptimos	126
5.2.1.1.	Inspecciones periódicas a caldera de trabajo	127
5.2.1.2.	Nivel óptimo de dureza del agua.....	130
5.2.1.3.	Nivel de producción de vapor óptimo .	132
	CONCLUSIONES.....	135
	RECOMENDACIONES	137
	BIBLIOGRAFÍA.....	139
	ANEXOS.....	141

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Organigrama General del Centro Médico Militar	5
2.	Organigrama administrativo División de Ingeniería	8
3.	Toma aérea de Centro Médico Militar	9
4.	Caldera “Cleaver Brooks”	11
5.	Caldera tubular con retorno horizontal	12
6.	Patrón de circulación de agua en una caldera acuotubular.....	13
7.	Estación reductora de presión.....	20
8.	Diagrama de proceso de esterilización	21
9.	Diagrama de proceso de lavandería	23
10.	Diagrama de proceso de área de cocina.....	24
11.	Caldera en funcionamiento	27
12.	Tanque de búnker de capacidad de 6000 galones	29
13.	Sistema de suavizadores sin funcionamiento	31
14.	Tanque de tratamiento de agua	32
15.	Chimenea.....	35
16.	Tubería saliente de la caldera con aislante en mal estado.....	37
17.	Segmento de tubería expuesta	38
18.	Anclaje de tubería suelto.....	39
19.	Tubería de retorno de condensado	40
20.	Junta telescópica con fuga.....	42
21.	Junta de compresión.....	43
22.	Foto térmica de carcasa de caldera	44
23.	Pérdida de calor por radiación	45

24.	Fuga energética en tubería	46
25.	Calor específico de gases de combustión	52
26.	Acoplamiento adaptado	56
27.	Manifold de distribución principal	57
28.	Sección de tubería expuesta (sin aislante)	58
29.	Tubería principal protegida por aislante	65
30.	Comparación de tuberías sin pendiente y con ella	71
31.	Porcentaje de vapor instantáneo	72
32.	Diferencia de nivel de agua	92
33.	Sistema de control de agua	94
34.	Junta telescópica sin utilizar	102
35.	Aislante en mal estado.....	103
36.	Funcionamiento de tanque de retorno de condensado.....	105
37.	Acumulación de golpe de ariete.....	108
38.	Trampa de vapor mecánica	109
39.	Trampa de vapor termostática	110
40.	Trampa de vapor termodinámica	111
41.	Relación viscosidad de combustible y temperatura	113
42.	Tubería afectada por la corrosión	115
43.	Tubería incrustada.....	116
44.	Tubería de distribución de agua suavizada	118
45.	Sistema de control de suavizadores	119
46.	Pre calentador de tipo regenerativo	121
47.	Incrustación potencial de la caldera.....	132

TABLAS

I.	Niveles típicos óptimos de exceso de aire	33
II.	Análisis de sólidos totales disueltos	50
III.	TDS Globales.....	50
IV.	Cantidades de trabajo	53
V.	Factor de presión para tubería (P1)	60
VI.	Factor de presión para tubería (P2)	60
VII.	Proporciones de longitud equivalente según accesorios.....	62
VIII.	Propiedades de conductividad y sus aplicaciones	66
IX.	Tabla de control de agua (análisis TDS)	68
X.	Horario de suministro de vapor	73
XI.	Entalpía de vapor a 34,5 psia.....	74
XII.	Rendimiento de planchadora, tipo prensa	75
XIII.	Rendimiento de lavadora industrial	76
XIV.	Rendimiento de secadora industrial	77
XV.	Requerimientos de autoclave.....	78
XVI.	Costo de equipo y mejoras.....	85
XVII.	Flujo de efectivo para un año calendario.....	86
XVIII.	Tasas promedio.....	87
XIX.	Valor presente neto.....	88
XX.	Tasa interna de retorno	89
XXI.	Límites de sólidos en agua de calderas	96
XXII.	Formato de datos generales para establecer producción de vapor	98
XXIII.	Datos del sistema de fuego.....	99
XXIV.	Control de emisiones de caldera	99
XXV.	Condiciones anormales.....	100
XXVI.	Acciones de conservación de energía.....	103
XXVII.	Características de aceites combustibles	112

XXVIII.	Químicos utilizados en tratamiento de agua.....	116
XXIX.	Requerimientos de agua de caldera.....	117
XXX.	Niveles recomendables de emisión de gases	124
XXXI.	Conjunto de quemador	128
XXXII.	Control de nivel de agua.....	128
XXXIII.	Bomba y tubería de alimentación de agua	128
XXXIV.	Cuerpo de caldera.....	129
XXXV.	Sistema de combustible	129
XXXVI.	Tanque de condensado.....	130
XXXVII.	Índices de dureza del agua	131
XXXVIII.	Entalpía para 127 psia.....	133
XXXIX.	Entalpía para 158°F	133
XL.	Comparación de producción de vapor.....	134

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
hf	Entalpía de líquido saturado
hg	Entalpía de vapor sobrecalentado
gal	Galones
°F	Grados Fahrenheit
h	Hora
lb	Libra
N	Newton
ppm	Partes por millón
%	Porcentaje
p	Presión
psia	Presión absoluta
psi	Presión libra por pulgada cuadrada
s	Segundo

GLOSARIO

Aislante térmico	Material que aísla el calor, impidiendo la transferencia de este hacia otro cuerpo.
Alcalinidad	Medida de capacidad para el neutralizado de ácidos químicos.
Atomización	Fragmentación o dispersión de una cosa en partes muy pequeñas.
Avería	Daño, rotura o fallo que impide o perjudica el funcionamiento del mecanismo de una máquina, una red de distribución u otra cosa.
Bunker	Combustible pesado.
Combustión	La combustión es el proceso de quema que se produce cuando el combustible, el oxígeno y el calor están presentes simultáneamente.
Condensado	Acción de condensar. Hacer que un gas pase al estado líquido.
Convección	Transmisión de calor en un fluido por movimiento de capas desigualmente calientes.

Corrosión	Acción de corroer o corroerse.
Energía	Capacidad que tiene la materia de producir trabajo en forma de movimiento, luz, calor, etc.
Entalpía	Capacidad que tiene un cuerpo de transmitir su energía interna.
Fricción	Transformación de energía a calor por medio de algún rozamiento.
Ignición	Inicio de una combustión.
Incrustación	Capa de residuos minerales que se forma en la superficie de algunos cuerpos.
Manómetro	Instrumento para medir la presión de los fluidos, principalmente de los gases.
Purga	Restos que se eliminan en determinadas operaciones industriales.
Radiación	Emisión de radiaciones luminosas, térmicas, magnéticas o de otro tipo.
Suministro	Acción de suministrar.
Tanque	Contenedor de agua que distribuye agua a tuberías y a la caldera para la generación de vapor.

TIR	Tasa interna de retorno.
Tubería	Conjunto de tubos en el cual pasa, generalmente, algún fluido.
Válvula	Dispositivo que abre o cierra el paso de un fluido por un conducto en una máquina, aparato o instrumento, gracias a un mecanismo.
Vapor	Fase gaseosa en que se transforma una sustancia, generalmente líquida, y que se produce en temperaturas próximas al punto de ebullición.

RESUMEN

La eficiencia es un concepto importante en cuanto al establecimiento de la productividad se refiere. Por medio de la optimización de recursos se pretende obtener una mayor o igual cantidad de producción, que permita incrementar el rendimiento en los procesos de producción.

En este caso, se analizó la eficiencia energética del sistema de generación y red de distribución de vapor para las áreas de central de equipos, lavandería y cocina, correspondiente al Hospital Centro Médico Militar. Se analizaron sus procesos y procedimientos, para determinar las fallas existentes en el sistema y proponer una solución a los problemas, que sea viable para el establecimiento de los procedimientos y estándares.

El presente trabajo determinó una mejora de eficiencia energética, en la conservación de la energía calorífica producida y distribuida a lo largo de la red de transportación de vapor. Esto se logró mediante el ahorro en costos y mejorando el rendimiento de los equipos suministrados por este recurso. Así también, se establecieron índices y parámetros de mejora, que permitieron el alcance de los objetivos planteados.

OBJETIVOS

General

Mejorar la eficiencia energética correspondiente al sistema de generación y red de distribución de vapor para las áreas de Central de Equipos, Lavandería y Cocina.

Específicos

1. Evaluar el rendimiento de los insumos utilizados para la producción de vapor.
2. Determinar las pérdidas de energía que existen en el sistema de distribución de vapor.
3. Evaluar el sistema y el diseño actual del sistema de ramificación de las redes de vapor.
4. Identificar el nivel de impacto ambiental de los procedimientos efectuados en el sistema de vapor.
5. Determinar los parámetros adecuados, para un mejor rendimiento en la generación y distribución de vapor.

Hipótesis

- La gran cantidad de fugas energéticas presentes en el sistema de distribución, son el principal problema en la deficiencia del sistema.
- Los procedimientos en los equipos que emplean vapor contribuyen a un gasto excesivo de este, lo que significa un aporte negativo en el aprovechamiento de los recursos.
- Las variables que afectan directamente la eficiencia, están relacionadas con aspectos técnicos-operacionales, los cuales se incrementan a medida que no se le brinda el mantenimiento respectivo de éstos.

INTRODUCCIÓN

El análisis de la eficiencia energética en el sistema de generación y distribución de vapor, comprende un estudio de energías que permita identificar de qué manera está distribuida la temperatura, presión y calidad del vapor alrededor del sistema a estudiar.

Es importante recalcar que el concepto de eficiencia energética, en este estudio, involucra aspectos más allá del simple ahorro de costos en el insumo de búnker. Tales aspectos se deben de considerar como elementos que permitan el cumplimiento de los objetivos planteados, minimizando la cantidad de recursos energéticos necesarios.

La eficiencia energética representa la utilización de los recursos de una manera óptima y amigable con el medio ambiente. En el aspecto técnico de la caldera, necesita un equilibrio químico entre el combustible y el oxígeno. Este equilibrio permitirá que la energía producida por la caldera sea la requerida por el sistema. Además, se procura que la emanación del humo de las calderas contamine en el menor grado posible. De esta manera se relaciona la eficiencia de energías en el sistema, la cual permite, además de obtener los resultados, minimizar recursos y un procedimiento limpio en la producción de vapor.

La presente tesis se estructuró con cinco capítulos de la siguiente manera: en, el primer capítulo se establece el contexto del estudio y los conceptos necesarios para abordar de manera óptima el trabajo de investigación desarrollado.

En el segundo capítulo, se plantean los análisis y las observaciones correspondientes. De esta manera, se establecen los parámetros del funcionamiento actual del sistema de vapor para perfilar las mejoras que se propondrán.

El tercer capítulo incluye la aplicación de los conceptos del establecimiento de las mejoras y los estudios correspondientes para el cumplimiento de los objetivos planteados, mediante las herramientas ingenieriles requeridas.

En el cuarto capítulo se presenta la propuesta de implementación, la forma de llegar a los resultados obtenidos en el capítulo tres. Con ello se cumplen los de los objetivos planteados.

Finalmente, el capítulo cinco, complementa los capítulos 3 y 4 tomando en cuenta las nuevas acciones en función de los cambios realizados en el sistema. Se estableció un control de los nuevos procedimientos y parámetros, a partir de los cuales se recomendaron estudios complementarios para visualizar mejor los procedimientos que faciliten que faciliten la obtención de resultados óptimos.

1. ANTECEDENTES GENERALES

1.1. Antecedentes del Centro Médico Militar

El Centro Médico Militar, comprende una entidad dedicada a brindar un servicio de salud de alta calidad a los miembros del ejército de Guatemala y sociedad civil en general.

1.1.1. Historia

La idea de la creación del Centro Médico Militar surgió a finales del siglo XIX, durante el gobierno del General Justo Rufino Barrios. En esa época, se dificultaba la atención médica a los militares en los hospitales nacionales debido a que la mayoría eran atendidos por religiosos. De ahí que el 9 de octubre de 1880, el General acuerda la construcción del Centro Médico Militar.

La coyuntura social que demandaba la generación de alternativas al poder político, debido a la injerencia de la iglesia dentro del país, fue determinante para que la construcción del Hospital Militar se llevara a cabo en tan solo un año. El 15 de marzo de 1881, se inauguró el Hospital Militar. Ocupó un edificio situado en Ciudad Vieja, zona 10 de la ciudad capital. El Hospital Militar brindó atención específica al ejército de Guatemala, con lo cual, los soldados y oficiales contaron con un sistema de saneamiento y salud.

En los años 1917 y 1918, se necesitó una reestructuración de las instalaciones porque estaban en malas condiciones. Por esa razón se inició la búsqueda de un nuevo lugar para ubicar el edificio y continuar brindando los servicios de salud para los militares.

En el año de 1920, a finales del gobierno del presidente Estrada Cabrera, se autorizó y se realizó su traslado hacia el antiguo edificio “Joaquina Estrada Cabrera”, ubicado en lo que hoy es la 6ta. Ave. 4-50 de la zona 10. Dicho edificio era utilizado para personas convalecientes y de la tercera edad. Allí permaneció hasta que llegaron los diseños de su reinstalación en la década de los años noventa.

En el año 1924, se habilitó un anexo para brindar atención gratuita a los habitantes de áreas aledañas. De esta manera inicia la aceptación de pacientes civiles, dentro de las instalaciones del hospital. Sin embargo, el servicio para la sociedad civil en general no se oficializó. En el año 1997 el presidente de Guatemala, Álvaro Arzú, mediante un acuerdo gubernativo, instruye la apertura del centro hospitalario para el público en general. Sin embargo, la atención no se brinda de manera gratuita.

La función del Hospital Militar fue trascendental durante el período que duró el conflicto armado interno en Guatemala. Sus servicios permitieron al ejército contar con un centro asistencial seguro y de calidad para la recuperación de sus elementos. En el año 1936, el hospital ya contaba con una mejor tecnología y equipo, por lo cual se le ha calificado como uno de los mejores en el país.

En el año 1963, dada su evolución tecnológica y de servicio, este hospital fue calificado como un centro médico asistencial de calidad, y una dependencia importante del ejército. De tal manera que, al contar con nuevos enfoques y técnicas en el desarrollo de sus actividades de salud y sanitarias, enfocadas a la prevención, se acreditó como un hospital prestigioso.

En el año 1976, a raíz del terremoto que afectó al país, las autoridades militares consideraron la necesidad de contar con nuevas instalaciones para el

Hospital Militar que respondieran a las necesidades sanitarias de la época y atendiera a una población más amplia en mejores condiciones.

Así fue como se instaló una comisión de ingenieros y especialistas, para el diseño y construcción del nuevo centro médico militar. Las nuevas instalaciones se planificaron tomando en cuenta la amplitud y la mejora en el servicio de salud a partir de estándares internacionales para la construcción de hospitales, material de alta calidad y una excelente administración de recursos financieros provenientes del presupuesto asignado del Ministerio de la Defensa Nacional.

Actualmente, el Centro Médico Militar, es uno de los mejores hospitales del país puede competir con hospitales prestigiosos centroamericanos. Su política ya no se centra en la atención exclusiva a miembros del ejército, ahora presta sus servicios a personal civil, en forma de pagante o ingresados como emergencias.

1.1.2. Misión

“De acuerdo a las capacidades y necesidades, su misión principal es proporcionar servicios médicos-hospitalarios a los integrantes del Ejército de Guatemala, relativos al diagnóstico, tratamiento y rehabilitación, con la finalidad de recuperar y preservar la salud, coadyuvando al bienestar y al estado de apresto óptimo del personal militar en activo; con el propósito de alcanzar, mantener y salvaguardar los objetivos militares nacionales. En tiempo de paz dedicara su esfuerzo principal en proporcionar los servicios médicos-hospitalarios con tecnología de punta, basada en la investigación, docencia y su desarrollo práctico en la promoción, atención, recuperación y preservación de la salud de los integrantes del Ejército de Guatemala, dichos servicios pueden ser

extensivos a las personas que cumplan con los requisitos y condiciones que en ley corresponda”¹

1.1.3. Visión

“Consolidarnos como hospital universitario de tercer nivel, líder en el ramo de servicios médicos con un amplio sistema de servicios de calidad, excelencia académica, brindando atención personalizada a toda hora, que le permita proporcionar a los derecho habientes y pacientes en general los mejores servicios de salud que eleven la calidad de vida, proyectándose a nivel nacional e internacional.”²

1.1.4. Organización

La organización del Centro Médico Militar, se basa en cuatro divisiones fundamentales, los cuales funcionan bajo lineamientos que proporciona la dirección.

Estas divisiones desarrollan tareas específicas, la integración de todas es fundamental para el funcionamiento eficiente del hospital.

Las cuatro divisiones que componen el Centro Médico Militar son:

- División Médica: se encarga de brindar los servicios médicos profesionales a los clientes del Centro Médico Militar.

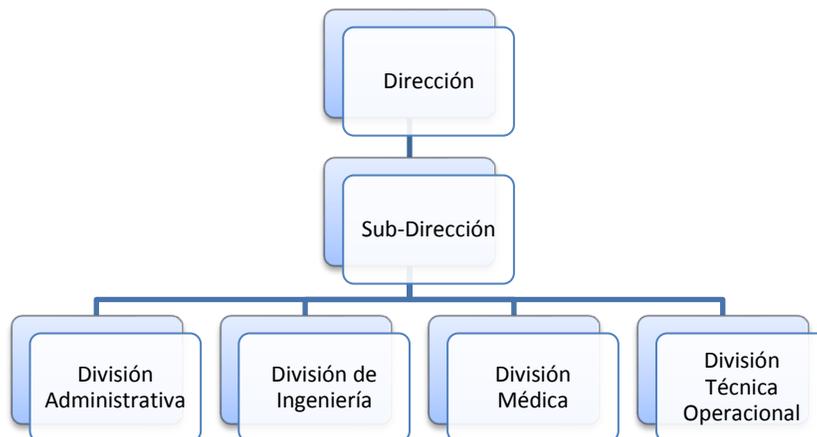
¹ Centro Médico Militar. <http://www.centromedicomilitar.com.gt/index.php>. Consulta: junio de 2016.

² *Ibíd.*

- División Administrativa: administra los recursos, operacionales y financieros con los que cuenta el centro médico militar.
- División de Ingeniería: brinda servicios técnicos, en función de los servicios que ofrece el hospital militar.

División Técnica Operacional: lleva a cabo los procedimientos legales y temas de investigación del hospital.

Figura 1. **Organigrama General del Centro Médico Militar**



Fuente: elaboración propia.

1.1.5. División de Ingeniería

A continuación, se describen las características de la composición organizacional de la división de ingeniería del Centro Médico Militar.

1.1.5.1. Misión

Maximizar la disponibilidad de los equipos, fluidos y energéticos para la atención de pacientes del Centro Médico Militar, preservando la instalación física en condiciones de funcionamiento económico, confiable y seguro, minimizando su deterioro.

1.1.5.2. Objetivos

- Ser partícipe efectivo del éxito de las demás divisiones del Centro Médico Militar, y recíprocamente éstas coadyuven a la de Ingeniería en alcanzar la finalidad para la cual fue creada.
- Garantizar la disponibilidad de los equipos, fluidos y energéticos para la atención de pacientes, preservando la instalación física en condiciones de funcionamiento económico, confiable y seguro, minimizando su deterioro.

1.1.5.3. Organización

La División de Ingeniería, se divide en tres departamentos para su óptimo rendimiento.

Los departamentos corresponden a:

- Departamento de eléctrica y electrónica: tiene a su cargo la distribución de la energía eléctrica, mediante la subestación eléctrica, así como sus instrumentos correspondientes. A su vez, la integran tres secciones fundamentales:
 - Sección de Potencia
 - Sección de Comunicaciones

- Sección de Equipo Médico Electrónico

- Departamento de Mecánica Industrial: tiene como objetivo brindar servicio. funcionamiento y mantenimiento a los equipos empleados en el Centro Médico Militar, de manera que el hospital pueda completar sus procesos eficazmente. Algunos de los servicios que brinda el departamento son: atención al equipo de autoclaves, funcionamiento de calderas, mantenimiento al equipo de aire acondicionado y refrigeración, suministrar vapor a las áreas de lavandería, central de equipos y cocina; así como el uso para tanques de agua caliente.

- Departamento de Mantenimiento de Obra Civil y Saneamiento: desarrolla funciones de jardinería, fontanería, limpieza, manejos de bombas de agua, carpintería, entre otros.

Estos tres departamentos, coadyuvan con el funcionamiento eficaz en la División de Ingeniería. Ello permite que el Centro Médico Militar brinde un servicio médico de alta calidad a la sociedad guatemalteca.

Este estudio se desarrolló en el departamento de Mecánica Industrial. En el transcurso de la investigación se pudo observar que los operarios de calderas tienen un régimen de trabajo de administración por cumplimiento de objetivos. Por esta razón carecen de nivel de empoderamiento, ya que deben de tomar acciones con base en las órdenes emitidas por sus superiores.

Para cumplir con la misión del Centro Médico Militar enfocan su interés en la verificación de que el sistema sea funcional, para que los demás departamentos que requieran de sus servicios, estén siempre satisfechos con el

nivel de atención y comportamiento de los operarios, que corresponden a mantenimiento de equipo.

Figura 2. **Organigrama administrativo División de Ingeniería**



Fuente: elaboración propia.

1.1.6. **Ubicación geográfica**

El Centro Médico Militar, se encuentra ubicado en la Finca El Palomar Acatán, Santa Rosita, zona 16 de la ciudad de Guatemala. El área construida es de 60,000 m².

Figura 3. **Toma aérea de Centro Médico Militar**



Fuente: Google Maps. Consulta: 24 de noviembre de 2015.

1.2. Componentes de una red de vapor

Los componentes que forman parte de una red de generación y distribución de vapor deben ser los indicados según corresponda a las características de los procesos a los cuales se les suministra el vapor.

Está contemplado que según sea la cantidad de vapor y tiempo de suministro, así debe ser la resistencia y características mecánicas y físicas que comprende la tubería, así como la clase de equipo que requiera el vapor.

Una red de vapor está constituida en dos elementos básicos: el equipo de generación y el equipo de distribución de vapor.

Entre los elementos que componen la generación de vapor se puede mencionar las calderas, compresores, tanques de agua, tanques de bunker y bombas que sean requeridas.

Los componentes de distribución de vapor, comprenden una gama de mecanismos más amplia. Entre los principales se encuentran las tuberías de distribución que constituyen el medio de transporte del vapor hacia los equipos donde sea requerido. Los accesorios necesarios para el funcionamiento óptimo del sistema también forman parte de esos componentes.

Por esta razón, es importante determinar las configuraciones necesarias de los elementos que complementen el sistema, para brindar un buen rendimiento. En este caso en general, se basó en la aplicación a la industria hospitalaria, la cual requiere de un sistema para suministrar el vapor eficazmente debido al nivel de cuidado de los equipos que emplean el suministro.

1.2.1. Calderas

Una caldera es un mecanismo ingenieril empleado para la producción de vapor. Su funcionamiento consiste en convertir agua en estado líquido a estado gaseoso, a una temperatura y presión determinada.

Entre los componentes principales de una caldera se pueden mencionar: el quemador, que es el elemento ubicado en el hogar, en el cual sucede la combustión producto de la mezcla entre el combustible, el oxígeno y el fuego. También posee un tablero de control, donde se ubican lámparas indicadoras, interruptores, tablilla de conexiones y demás controles para el funcionamiento automático.

Posee un manómetro de control, para medir la presión a la cual se está trabajando. También incluye una columna de nivel cuya función es medir el nivel de agua dentro de la caldera. Posee válvulas de seguridad programadas para activarse cuando se dé la señal correspondiente.

En la parte conocida como el espejo, se ubica el cemento refractario para alta temperatura. Una válvula de purga para drenar sedimentos. Y finalmente un aislante térmico de fibra de vidrio para aislar el calor.

Figura 4. **Caldera “Cleaver Brooks”**



Fuente: Manual *Cleaver Brooks*, página 1-4.

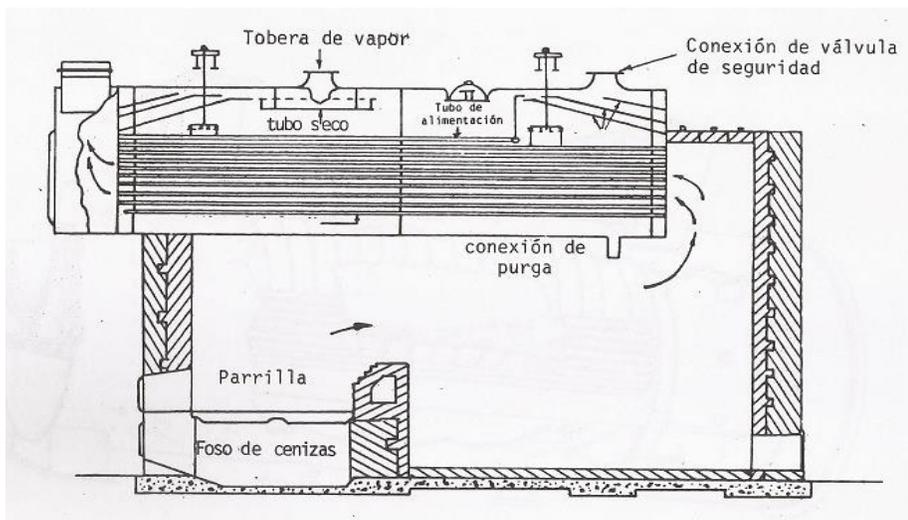
1.2.1.1. Tipos de calderas

Las calderas se pueden clasificar de diversas maneras, según sean sus aplicaciones o bien sus características. Se puede determinar su clasificación por capacidad de producción de vapor, por caballos de fuerza, una clasificación por tamaño de caldera, también es posible clasificarlas según sea el tipo de combustible que utilice para realizar la combustión.

Aunque generalmente, existe una clasificación que predomina en la industria y es la más utilizada según sea el proceso que se requiera. La clasificación corresponde a dos tipos de calderas denominadas: piro tubulares y acuotubulares.

En una caldera pirotubular el proceso de vaporización dentro de la caldera, se lleva a cabo mediante gases, productos de la combustión interna, los cuales pasan a través de tubos interiores. Estos al estar en contacto directo con el agua almacenada dentro de la caldera, transmiten el calor de los gases y provocan que el agua se caliente a altas temperaturas y se vaporice. La construcción de este tipo de calderas, por lo general es sencilla y resistente. Además, son relativamente económicas en comparación con las calderas acuotubulares. En la Figura 5 se presenta una caldera tubular con retorno horizontal.

Figura 5. **Caldera tubular con retorno horizontal**

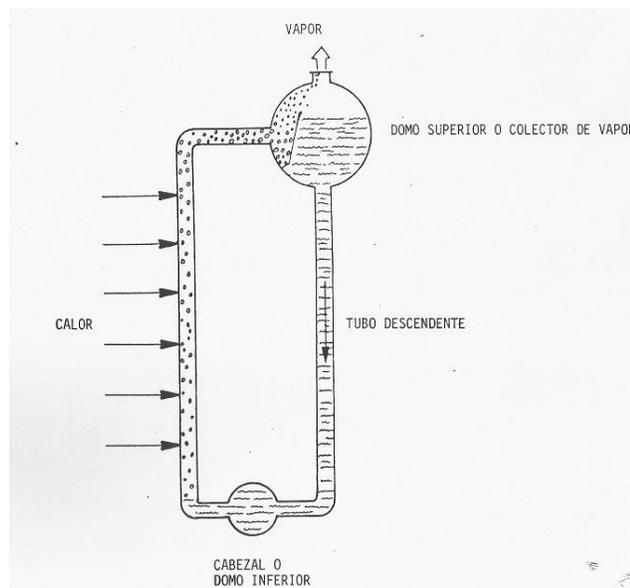


Fuente: *Estación experimental de ingeniería del instituto tecnológico de Georgia, Mejoramiento de la eficiencia de operación de calderas de vapor. p.7.*

Una de las diferencias entre una caldera acuotubular y una pirotubular es que el fluido circula dentro de los tubos de la caldera, mientras que los gases lo hacen en la parte interior de la caldera.

Este tipo de calderas se utilizan en la industria cuando se requiere gran capacidad de generación de vapor, por ejemplo, en centrales termoeléctricas o ingenios. Existen diversos tipos de diseños de este tipo de calderas, sin embargo, los más utilizados consisten en una integración de tubos inclinados o tubos verticales en las secciones correspondientes a la transferencia de la energía en forma de calor a través de los fenómenos de radiación y convección.

Figura 6. **Patrón de circulación de agua en una caldera acuotubular**



Fuente: *Estación experimental de ingeniería del instituto tecnológico de Georgia, Mejoramiento de la eficiencia de operación de calderas de vapor. p.13.*

Debido a la gran capacidad de trabajo de este tipo de calderas, el vapor generado suele alcanzar temperaturas supercríticas, por lo que es necesario que los materiales adyacentes de trabajo, tengan las propiedades metalúrgicas requeridas para dicho propósito.

1.2.2. Tuberías

Las tuberías comprenden una parte fundamental en la distribución del vapor, ya que, según sus características, así es la manera en que trabaja el sistema. Entre las consideraciones técnicas para seleccionar una tubería que pueda cumplir con la función de transportar el vapor están la presión de trabajo, el diámetro nominal de la tubería, la longitud y el tipo de acero de la cual estará construida.

De esta manera, se asegura que la selección de la tubería sea la indicada para soportar las altas temperaturas y presiones a la que será sometida; para el correcto suministro de recursos a las máquinas que emplean los requerimientos de vapor.

1.2.2.1. Tubería principal

Las tuberías generalmente se utilizan para el transporte de fluidos a grandes presiones de trabajo. La tubería principal en un sistema de distribución de vapor, es aquella en la cual se transporta todo el vapor producido inicialmente por la caldera.

Este vapor producido, se conduce hacia un manifold de distribución, donde el vapor se divide en los distintos ramales distribuyéndose hacia las áreas y equipos en los que sea requerido.

Generalmente, esta tubería se fabrica de acero sin costura o también conocido como hierro fundido. Y según sea la presión a la que será sometida puede ser de cédula 40 o de cédula 80, la cual determina su nivel de calidad y de resistencia.

El diseño de la tubería debe comprender aspectos como inclinación adecuada de la pendiente. En este sentido, se entiende que debe tener una pendiente mínima de 1% en el sentido del flujo.

Es importante recubrir la tubería mediante un aislante térmico, naturalmente fabricado de fibra de vidrio con otros componentes para conservar el calor de la tubería. De esta manera, el vapor conserva sus características y disminuye, en la medida de lo posible el condensado que se forma en las tuberías, el cual debe ser purgado según con los sistemas instalados y éste condensado debe ser evacuado del flujo del vapor.

Los anclajes que sostengan la tubería, también deben ser adecuados para sostener y mantener fija la tubería. Sobre todo, cuando se produce el retorno de condensado y muchas veces este lleva una alta velocidad. Un mal anclaje puede provocar que la tubería se suelte y puede ocasionar serios daños al sistema de distribución de vapor.

Además, se debe de reducir al mínimo la resistencia a la fricción para poder obtener una facilidad de mantenimiento a la tubería, un buen aspecto físico y finalmente un sistema eficiente.

1.2.2.2. Retorno de condensado

La tubería de retorno de condensado, cumple un papel fundamental dentro del sistema de distribución de vapor ya que si bien, esta no conduce vapor, permite evacuar el condensado que se genera en las tuberías de flujo del gas.

Es un rol determinante, puesto que la evacuación correcta de este condensado generado, aporta mejor calidad al vapor durante su recorrido,

además, disminuye el efecto golpe de ariete en las tuberías, el cual es uno de los mayores problemas que se generan si no se evacua este condensado.

Otro aspecto que se debe tomar en cuenta en el sistema de retorno de condensado es que en la medida de lo posible, el condensado generado pueda retornar hacia un tanque para alimentar la caldera.

Como condensado generado posee una temperatura más elevada que el agua de alimentación, permite que su evaporación sea más rápida. De esta manera los costos se minimizan. Además, el agua condensada contiene elementos químicos del tratamiento que se le brinda a la caldera, con lo cual se crea un sistema de alimentación de condensado más amigable para las tuberías internas de la caldera.

Para este tipo de tubería, también se requiere un aislante térmico para que el condensado conserve su temperatura durante más tiempo. Para este tipo de tubería, las consideraciones técnicas del espesor del aislante es que debe tener como mínimo $\frac{3}{4}$ de pulgada, con una conductividad térmica máxima de $0.37 \text{ calorías-cm}/m^2\text{-h-}^\circ C$

Drenajes mal ejecutados, con un sistema de aislante deficiente y un mal dimensionamiento de tubería, puede provocar fallas en el dimensionamiento, golpe de ariete, ruidos, deficiencia en el calentamiento, entre otros.

1.2.3. Accesorios

Los accesorios utilizados en el sistema deben cumplir los requerimientos técnicos que éste necesite, en caso contrario provocará una deficiencia en el sistema que no permitirá obtener un rendimiento deseado.

Este aspecto es fundamental para determinar la caída de presión que se genera en el sistema de distribución. Según los métodos desarrollados para el diseño de las tuberías, cada accesorio comprende una longitud de tubería equivalente. Su contemplación prevé la cantidad de presión que debe generar la caldera con el vapor para que la pérdida de presión a través del sistema, sea tal que los equipos reciban la presión requerida para trabajar en su nivel óptimo.

Entre los accesorios están los acoplamientos, los diferentes tipos de codos, uniones, válvula de compuerta, válvula de esfera, entre otros.

2. EVALUACIÓN DEL SISTEMA ACTUAL

2.1. Áreas que emplean vapor en el sistema

En el Centro Médico Militar, se utiliza vapor en las áreas de Central de Equipos, donde se encuentran las máquinas denominadas autoclaves; en la Lavandería donde se lleva a cabo la limpieza de la ropa y sábanas y el área de Cocina donde se preparan los alimentos para los pacientes y trabajadores.

2.1.1. Descripción del proceso de autoclaves

En el área de Central de Equipos, se utiliza el equipo de autoclaves, cuyo funcionamiento se basa en vapor seco con una presión determinada para brindarle las libras necesarias para la esterilización de equipo quirúrgico.

El área cuenta con esterilizador que funciona con gas pero está fuera de funcionamiento. Existe también un calderín que tampoco está funcionando. Por esta razón, solo se utilizan las autoclaves que funcionan con vapor proveniente del sistema de distribución. Se cuenta también con una autoclave eléctrica que se utilizará en caso de que no se puedan utilizar las autoclaves de vapor.

Su ciclo de esterilización comprende un suministro de vapor de 15 a 20 minutos, a una temperatura de $120^{\circ} C$. Se pretende brindar el servicio con un vapor que tenga la temperatura suficientemente alta, para eliminar las bacterias que se encuentran en los equipos las cuales, debido a las altas temperaturas, durante un tiempo determinado mueren. De esta manera los equipos quedan estériles.

En la figura 7, se puede observar una estación reductora de presión. Se utiliza para reducir la presión proveniente de la caldera de 125 psi a 20 psi, que es la presión a la cual trabaja el equipo de esterilización.

Para esterilizar correctamente, se deben considerar aspectos fundamentales como la sobredimensión de los paquetes serán procesados, y la sobrecarga de los mismos. Para que la esterilización surta efectos requeridos, es necesario eliminar todo el aire dentro de los paquetes antes de la esterilización.

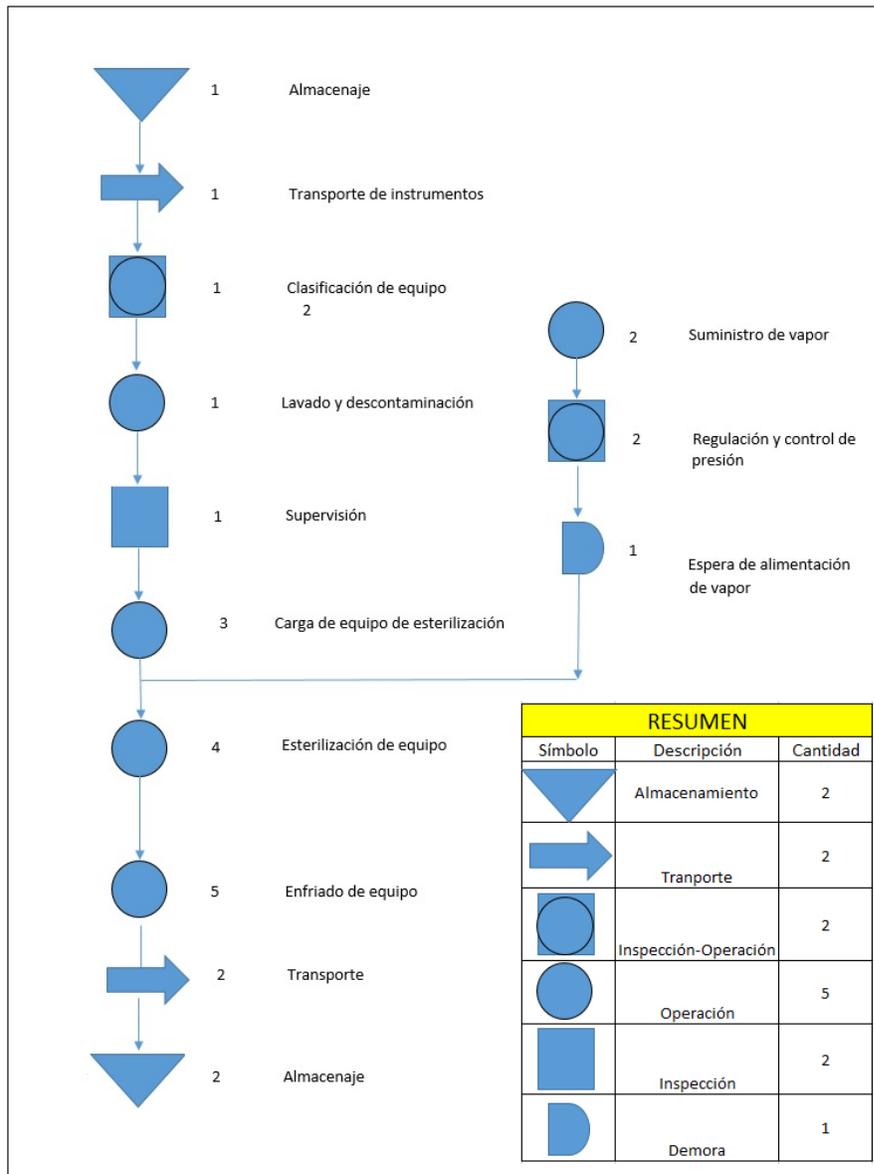
Figura 7. Estación reductora de presión



Fuente: Centro Médico Militar, zona 16, Guatemala.

A continuación, se presenta un diagrama de proceso que representa el procedimiento para la esterilización del equipo quirúrgico.

Figura 8. Diagrama de proceso de esterilización



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

2.1.2. Descripción del proceso de lavandería

La capacidad correspondiente al área de lavandería se basa en el número de camas ocupadas, que requieran del lavado y planchado de ropa y sábanas.

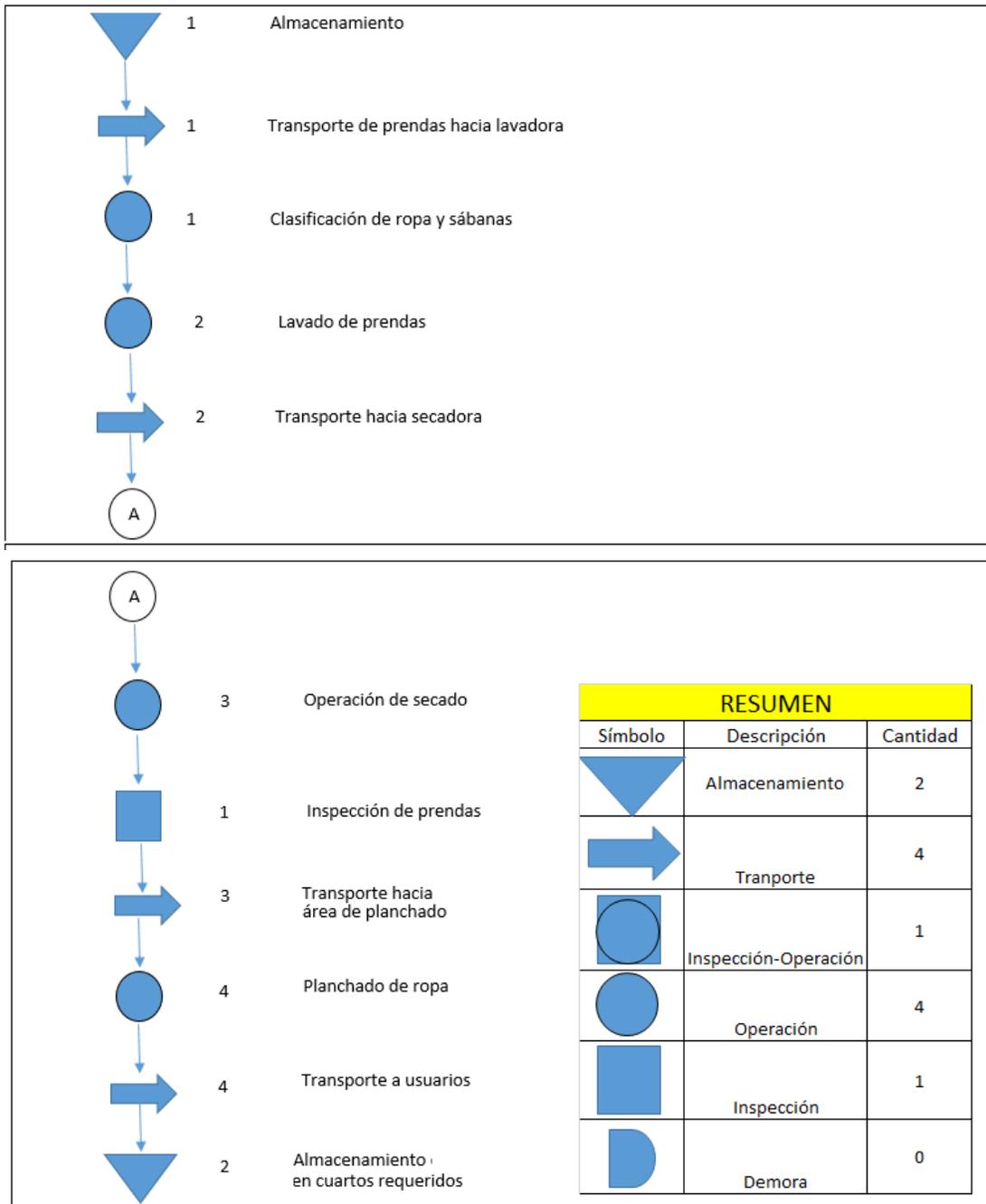
En el contexto de un hospital, la ropa y sábanas deben lavarse mediante un procedimiento especial que impida el contagio de gérmenes entre pacientes y personal de trabajo. Por ello, el suministro de vapor para el funcionamiento óptimo de los equipos debe ser constante y con las características térmicas e isobáricas que requiera el sistema para proporcionar la presión necesaria de trabajo.

Actualmente, el área de lavandería cuenta con 2 lavadoras de tipo industrial las cuales trabajan a una presión de 80 psig, 4 secadores de los cuales únicamente 2 están en buenas condiciones de funcionamiento y trabajan a una presión de 110 psig. Además, existen 4 planchadoras industriales tipo prensa que trabajan a 80 psig.

Durante el proceso, se lograron identificar 2 fugas en el área de trabajo. Una fuga era de agua y otra fuga correspondía a vapor. Por lo que se tomó en consideración los efectos que estas fugas pudieran ocasionar sobre el impacto de una caída de presión, que provocaría a la caldera trabajar más de lo necesario para compensar esa pérdida.

A continuación, se presenta un diagrama de proceso, que explica y representa los procedimientos empleados en el área de lavandería.

Figura 9. Diagrama de proceso de lavandería



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

2.1.3. Descripción de proceso de cocina

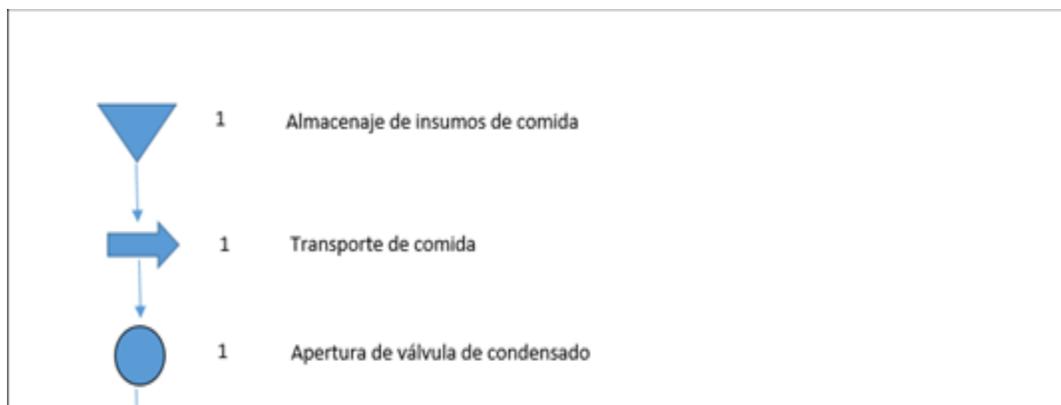
En la cocina del Centro Médico Militar, se procesan los alimentos diarios para los pacientes y para el personal en turno.

La cocina cuenta con 7 marmitas, de las cuales únicamente 4 están en funcionamiento. Estas tienen una capacidad para 40 galones cada una, y trabajan a una presión de 20 psi. En el área se encontraron varias fugas de vapor, que afectan su eficiencia. Se calcula su caudal según las libras de vapor-hora, con el tiempo en que se mantiene activo el suministro de vapor para el área de cocina.

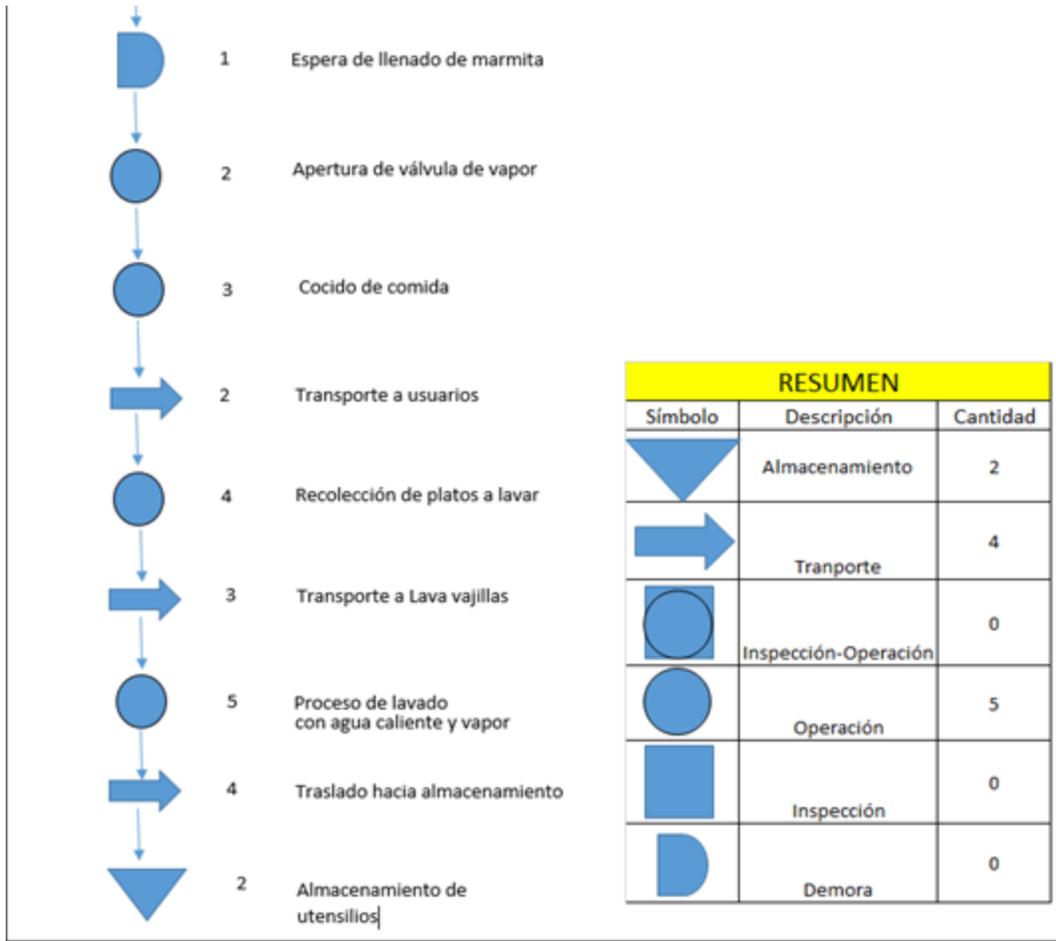
También se cuenta con un lavavajillas que utiliza el sistema de vapor. Las flautas de esta máquina no se encuentran en funcionamiento, por lo cual se utiliza de manera recomendada. Para asear los utensilios de comida, este equipo trabaja a 20 psi, empleando agua caliente a 90 grados.

A continuación, se presenta un diagrama de proceso, que representa los procedimientos empleados en el área de cocina.

Figura 10. Diagrama de proceso de área de cocina



Continuación de la figura 10.



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Visio.

2.2. Sistema de generación de vapor

El sistema de generación de vapor correspondiente al Centro Médico Militar comprende de 3 calderas, de las cuales solo una se encuentra en funcionamiento. Cuenta con su tanque de búnker, de alimentación y de retorno de condensado.

Adicionalmente se cuenta con una bomba, utilizada para alimentar la caldera con bunker. También se cuenta con 3 chimeneas, una por caldera diseñada para que el humo producido por la combustión de la caldera, de forma que emane correctamente.

2.2.1. Caldera

Las calderas del Centro Médico Militar son de marca Cleaver Brooks, de tipo pirotubular con una capacidad de 500 hp y 2 092 200 BTU/hora. La presión de trabajo que se aplica es de 125 psi. La temperatura del combustible con la que se alimenta a la caldera es de 80°C y la temperatura del agua de alimentación corresponde a 60°C.

2.2.1.1. Estado externo de caldera

El estado externo de la caldera es bueno. No existen fugas externas y el funcionamiento de los instrumentos correspondientes a la caldera es aceptable.

Los tanques de alimentación no tienen fugas que permita el escurrimiento del agua de alimentación, así como del tanque de retorno de condensado y del tanque de agua tratada.

El tablero electrónico cuenta con todas sus señales adecuadas, así como una acometida en condiciones ambientales recomendables al tener el tablero en un cuarto con refrigeración.

Figura 11. Caldera en funcionamiento



Fuente: Centro Médico Militar, zona 16, Guatemala.

No se pudo observar la tubería interna de la caldera porque solo había una unidad disponible. Sin embargo, se pudo determinar que no se le aplica un pre tratamiento de impurezas al agua que alimenta a la caldera proveniente del exterior. Por esta razón, es posible que se formen sedimentos de minerales llamados incrustaciones, en la parte exterior de los tubos internos de la caldera. Esta formación de sedimentos provoca que el procedimiento de transferencia de calor sea más difícil de concretar y, por consiguiente, la utilización de insumos mayor. Al utilizar mayor cantidad de energía de la necesaria, la eficiencia del proceso se afecta considerablemente.

La caldera ha funcionado durante 8 meses por lo cual se corre el riesgo de que algún tubo interno pueda rajarse y provoque fuga interna.

2.2.2. Insumos para funcionamiento de caldera

Los insumos necesarios para el funcionamiento de la caldera, corresponden fundamentalmente a bunker, gas propano, agua y aire comprimido. El análisis respectivo de la utilización de cada uno, se realiza en función del tiempo de uso de la caldera, la cual enciende a las 3:00 am y se apaga a las 12:00 am.

2.2.2.1. Bunker

El bunker se almacena en tres tanques de 6000 galones de capacidad. El bunker se utiliza como combustible de la caldera. Se somete a un pre calentamiento para que su viscosidad disminuya y se pueda bombear fácilmente a la caldera. Si el bunker se bombea a temperatura ambiente, dado es altamente viscoso provocaría que la bomba caducara.

En el mercado, este combustible se conoce como Fuel Oil 6 y es uno de los más económicos. Dada su mala calidad provoca una gran contaminación en el medio ambiente. Además, requiere de un manejo especial para obtener el rendimiento deseado.

Tiene un alto contenido en azufre, asfalto y lodo, requiere una constante limpieza de filtros y su poder calorífico es de 9 500 Kcal/Kg.

El control del consumo de bunker se lleva a cabo mediante una medición de nivel en los tanques de alimentación de bunker. Para ello, se mide la altura de bunker en el tanque y se compara con una tabla debidamente calibrada para determinar la cantidad de galones existentes en el tanque.

De esta manera se lleva el control para los 3 tanques, y su uso se alterna según se vacíen. Como norma, se tiene estipulado dejar de utilizar un tanque

de bunker cuando le quedan cerca de 250 galones, los cuales son almacenados y únicamente utilizados en caso de emergencia.

Figura 12. **Tanque de búnker de capacidad de 6000 galones**



Fuente: Centro Médico Militar, zona 16, Guatemala.

2.2.2.2. Agua

Es un insumo fundamental para la producción de vapor en el sistema. La cantidad de agua que se le proporciona al sistema es prácticamente la cantidad de vapor que producirá. Por ello, los requerimientos de agua van en relación a la capacidad del tanque.

Las calderas se alimentan con agua a la mayor temperatura posible para obtener mejor eficiencia en el proceso de evaporización y disminuir lo más posible los choques térmicos dentro del sistema.

EL agua en su estado natural cuenta con una cantidad de minerales provenientes de su entorno, generalmente son sílice, magnesio, carbonato de calcio, entre otros. Si no se aplica un sistema de suavizamiento al agua para alimentar la caldera, esa concentración de sales y ácidos puede provocar que, en los tubos internos, se formen solidificaciones los cuales se denominan “incrustaciones”. Estas solidificaciones crean una especie de barrera entre el calor que emite el gas a través de la tubería y el agua que se desea calentar. Por esta razón, la caldera deberá trabajar más de lo necesario para lograr transmitir el calor. A su vez, debido a ese esfuerzo extra de transmisión de calor, puede sobrecalentar las tuberías y romper los tubos internos. Esto es peligroso para el funcionamiento de la caldera.

De acuerdo con el análisis desarrollado en el Centro Médico Militar el agua que alimenta la caldera proveniente del exterior, no recibe ningún pre tratamiento de desmineralización, por lo que la caldera se alimenta con agua dura. Aunque la institución cuenta con las instalaciones adecuadas, el sistema de suavizadores de agua se encuentra descompuesto y el presupuesto ha sido insuficiente para atender esta necesidad.

Figura 13. **Sistema de suavizadores sin funcionamiento**



Fuente: Centro Médico Militar, zona 16, Guatemala.

El agua de la caldera solo un tratamiento de secuestro de manganeso, para tratar de corregir el efecto que causa la ausencia del pre tratamiento.

Generalmente, se cuenta con un tanque que almacena el agua proveniente del retorno del condensado del cual es alimentada la caldera en los intervalos programados por los controladores del sistema.

El Centro Médico Militar cuenta con un tanque de tratamiento de agua como se muestra en la Figura 14. Periódicamente, un experto llega a suministrar los químicos necesarios para lograr el secuestro de manganeso que se encuentre en el agua cruda al suministrar el agua de este tanque hacia la caldera. Este procedimiento es determinante, ya que se especificó

anteriormente que el agua de alimentación del exterior no cuenta con un pre tratamiento. Por eso, el suministro de los químicos es necesario para minimizar los efectos negativos en la caldera.

Figura 14. **Tanque de tratamiento de agua**



Fuente: Centro Médico Militar, zona 16, Guatemala.

2.2.2.3. Aire comprimido

El aire comprimido se utiliza para brindar oxígeno al proceso de combustión. Los componentes del aire son el oxígeno, nitrógeno y trazas de otros gases que incluyen el dióxido de carbono.

La cantidad de aire suministrado al proceso de combustión es fundamental para el equilibrio de la mezcla entre el combustible y el oxígeno que se encuentra en el aire.

Debido al diseño del hogar de la caldera, así como la calidad del combustible utilizado para el proceso de combustión, la cantidad real de aire suministrado debe ser mayor a la cantidad teórica. Esto se debe a que se considera que el sistema no es ideal, por lo que si no se provee de una cantidad suficiente de aire, se podrá observar combustible no quemado, monóxido de carbono, hollín en los gases de combustión a través de la chimenea.

Cuando se incrementa el combustible en el proceso de combustión el humo que se despidе es de color negro, se incrementan los elementos químicos que producen la contaminación en el medio ambiente y se desperdicia energía del combustible.

A continuación, se presentan los niveles de porcentaje óptimos de aire.

Tabla I. **Niveles típicos óptimos de exceso de aire**

Tipo de combustible	Método de quemado	% De exceso de aire óptimo	% O2 (por volumen) Equivalente
Gas Natural	--	5 - 10	1 - 2
Propano	--	5 - 10	1 - 2
Horno de carbón para gas	--	5 - 10	1 - 2
Aceite No. 2	vapor atomizante	10 - 15	2 - 3
Aceite No. 6	vapor atomizante	10 - 15	2 - 3.5
Carbón	pulverizador	15 - 20	3 - 3.5
Carbón	pulverizador	20 - 30	3.5 - 5

Fuente: *Estación experimental de ingeniería del instituto tecnológico de Georgia, Mejoramiento de la eficiencia de operación de calderas de vapor. p. 84.*

De acuerdo con la tabla, al suministrar un alto porcentaje de aire en exceso al proceso de combustión se provoca una disminución en la eficiencia de la caldera debido a que una gran parte del combustible se utilizará solamente para el calentamiento de ese porcentaje de exceso que no es requerido ya que se escapa a través de la chimenea. Por esta razón el gas de emanación adquiere un color blanco o gris, lo cual se puede medir mediante las cartas de Ringelmann.

2.2.2.4. Chimenea

La chimenea correspondiente a la caldera en uso, está compuesta de 5 secciones. La primera sección "A" fabricada de lámina rolada en frío de 5/32" de espesor, con 2 flanges de las mismas dimensiones en las calderas. Tiene una soldadura de penetración corrida, sellada y desvanecida. Pernos de 3/8" de diámetro y empaque de asbesto grafitado de 1/4 de espesor. Diámetro interior de 24" y longitud de 1.32 mt.

La sección "B", comprende una longitud de 2.18 mt, 2 flanges de 5/32" y un diámetro interno de 24".

La sección "C" está constituida por lámina rolada de 1/4", un codo de 4 partes con 1 flange. Un diámetro de 24", sección vertical de 0.82 mt, con dos flanges de 31" de diámetro.

La sección "D" está hecha de lámina rolada en frío de 5/32" de espesor, sección cónica excéntrica. Con un diámetro superior interno de 28". Diámetro inferior de 18". Y largo de 1.62 mt. Con 1 flange de 31" de diámetro exterior. Empaque de asbesto grafitado de 1/4" de espesor.

Finalmente, la sección "E", está compuesta de lámina rolada en frío de 5/32" de espesor. Con 1 flange de 31" de diámetro exterior y 20 agujeros de

7/16" para perno de 3/8" para acoplar a sección "C". Empaque de asbesto grafitado de 1/4" de espesor. Soldadura, aro de esfuerzo superior de 2" de ancho y 1/4" de espesor.

Se pudo determinar que posee el diámetro adecuado y un tiro adecuado para la evacuación de los gases. Este aspecto técnico es importante para evitar contaminación innecesaria del medio ambiente y del hospital. Con frecuencia si las chimeneas no tienen la altura ni el diámetro adecuado, el tiro de humo es defectuoso y esto puede provocar que las emisiones no se evacúen correctamente.

El aspecto más importante que se pudo observar relacionado con la emanación es que el color de humo era de un tono transparente, lo cual indica que la mezcla entre oxígeno y combustible es óptima.

Figura 15. **Chimenea**



Fuente: Centro Médico Militar, zona 16, Guatemala.

2.3. Sistema de distribución de vapor

En el sistema de distribución de vapor, se analizó el estado actual de la tubería principal que conduce el vapor de la caldera, desde que éste sale de la misma hacia el manifold, en el cual se distribuye a las áreas analizadas correspondientes a Central de Equipos, Lavandería y Cocina.

Existen áreas que ya no están en uso, por lo que la llave está cerrada y no hay suministro de vapor para estas líneas correspondientes.

2.3.1. Estado de tubería actual

Se analizó el estado actual de la tubería principal dentro del cuarto de calderas. Se determinó que la tubería está fabricada de hierro negro, cédula 80. Esto significa que en su momento se construyó con materiales de alta calidad por lo cual su funcionamiento ha sido eficaz durante los años de servicio.

Sin embargo, se observaron aspectos físicos inherentes al sistema. Entre ellos, el mal estado de los aislantes que protegen a esta tubería algunas fugas de vapor y anclajes sueltos en el sistema de conducción principal.

En la figura 16, se puede observar el estado del aislante de la tubería saliente de la caldera. Esto indica que desde el inicio del transporte del vapor, existe una deficiencia en el sistema energético.

Figura 16. **Tubería saliente de la caldera con aislante en mal estado**



Fuente: Centro Médico Militar, zona 16, Guatemala.

Se siguió inspeccionando el recorrido de la tubería principal hacia 2 tipos de manifold. Uno de ellos distribuía para lavandería y cocina y el otro, hacia el área de autoclaves.

La derivación de tubería del manifold que conduce hacia lavandería y cocina corresponde a diámetros que van desde 1 pulgada, hasta 3 pulgadas, según lo requiera algún accesorio. La longitud de la tubería que conduce hacia el manifold de la lavandería es de 18 metros y se divide hacia el área de cocina.

Durante el recorrido, se observaron pedazos de tubería completamente visibles. Esto representa peligro para el personal, que puede sufrir quemaduras

si necesitaran realizar alguna reparación en el cuarto donde se encuentra esta tubería. También evidencia un claro punto de deficiencia energética.

Se detectaron fugas de vapor en una estación reductora de presión, en la derivación que conduce hacia la lavandería.

Figura 17. Segmento de tubería expuesta



Fuente: Centro Médico Militar, zona 16, Guatemala.

Los anclajes sueltos que se identificaron se encuentran en esas condiciones debido a una ausencia de mantenimiento preventivo. Como consecuencia, la tubería se ha aflojado debido a que los tornillos que la sujetan han cedido ante las altas velocidades de los fluidos que transporta la tubería.

Es importante tomar en cuenta este aspecto, porque puede provocar vibraciones peligrosas y ruidos con alto nivel de decibeles, además de impedir la transferencia adecuada de vapor en el sistema.

Figura 18. **Anclaje de tubería suelto**



Fuente: Centro Médico Militar, zona 16, Guatemala.

El tramo de derivación de la tubería que conduce hacia el área de autoclaves está en mejor. Sin embargo, también se encontraron pedazos de tubería expuesta y una gran sección de tubería sin funcionamiento. Esta sección cuenta con múltiples accesorios y aislante que podrían ser utilizados para la sustitución de otras partes que no se encuentran en buen estado.

El diámetro de la tubería principal que conduce del cuarto de calderas hacia el manifold que distribuye a central de equipos, corresponde a un segmento de 8 pulgadas y otro de 5 pulgadas y su longitud es de 12 metros de donde distribuye la derivación hacia los equipos de autoclaves.

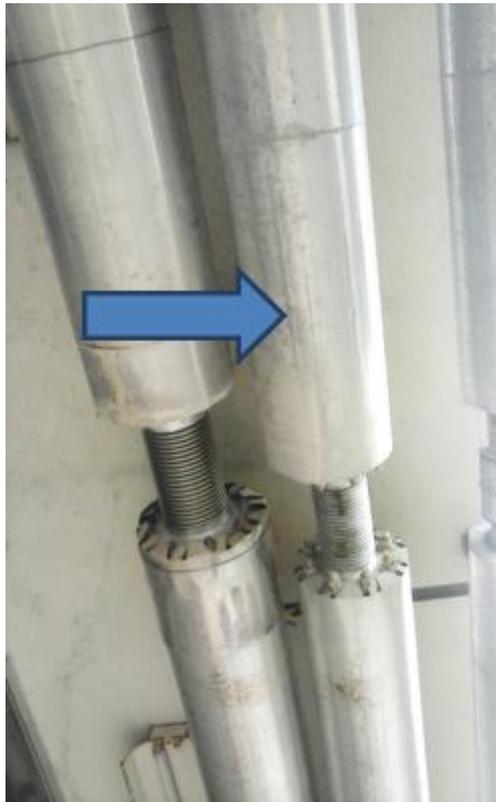
2.3.2. Estado de tubería de retorno de condensado

La tubería que corresponde al retorno de condensado se encontraba en términos generales, en buen estado si se compara con la tubería de transporte de vapor. No obstante, también se identificaron partes de aislantes rotos y probablemente la fuga de agua condensada más importante. Los calderistas no

habían identificado el desperfecto debido a la falta de supervisión. Se notificó a los fontaneros sobre la existencia de ésta fuga.

Se comprobó que algunas trampas de vapor presentaban funcionamiento deficiente dado que se podían escuchar ruidos provenientes de la tubería, a causa de los golpes de ariete. Lo anterior es señal inequívoca de que la función de las trampas de vapor, las juntas de telescópicas y juntas de expansión correspondientes, no estaba realizando su propósito convenientemente.

Figura 19. **Tubería de retorno de condensado**



Fuente: Centro Médico Militar, zona 16, Guatemala.

2.3.3. Accesorios

La mayor cantidad de problemas se identificaron en esta parte del sistema de distribución de vapor. El origen de estos problemas está en la ausencia de un sistema de mantenimiento eficiente para llevar el control de los accesorios en los distintos tramos de la tubería principal y de sus derivaciones.

Las juntas telescópicas presentaron problemas de funcionamiento. Este accesorio reduce el impacto sobre la velocidad del retorno de condensado a través de la tubería.

Muchas de las juntas telescópicas analizadas no se encontraban en óptimas condiciones y el acoplamiento de algunas debieron ser ajustados para instalarlas en el sistema de distribución de vapor. Lo anterior se debe a que se carece de un presupuesto específico para la corrección de estos accesorios. Con frecuencia, se utilizan accesorios que se encuentran distribuidos a lo largo de tubería que ya no está en funcionamiento. Esta medida puede ser eficiente si se verifica el estado en que se encuentran y se lleva un control sobre las partes del sistema donde encuentran instaladas, para crear una programación de supervisión.

Como se muestra en la figura 20, en la que en los accesorios existen fugas al extremo de tener que utilizar una cubeta para recolectar el condensado y evitar el daño a la pared del techo.

Figura 20. **Junta telescópica con fuga**

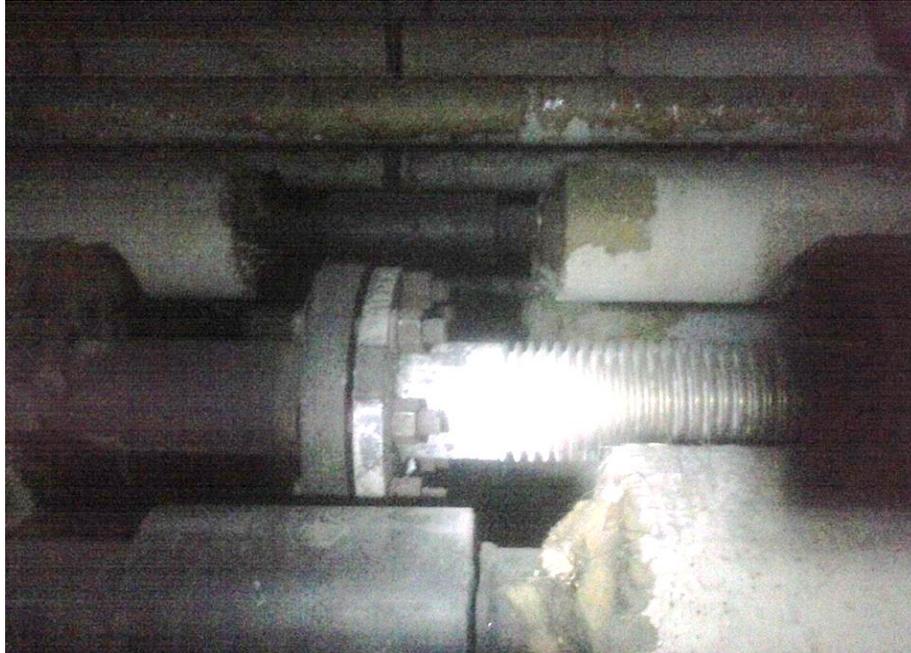


Fuente: Centro Médico Militar, zona 16, Guatemala.

Estas fugas de condensado provocan que la eficiencia de su retorno se vea afectado significativamente. Como consecuencia, esta agua tratada no pueda ser utilizada nuevamente en la caldera y esta debe trabajar con agua de alimentación externa. Como al agua externa, que es dura, no recibe un procedimiento de pre tratamiento se generan incrustaciones en la caldera.

Algunas juntas de expansión ubicadas en la tubería que corresponde al transporte de vapor, denotan buenas condiciones. En este aspecto, se ha llevado un control más riguroso, debido a que, desde el punto de vista de resultados, el vapor sí debe cumplir su cometido con los equipos requeridos y no se puede permitir una gran deficiencia. En la figura 21, se pueden observar las buenas condiciones de la junta de expansión.

Figura 21. **Junta de compresión**



Fuente: Centro Médico Militar, zona 16, Guatemala.

2.3.4. Auditoría energética en tuberías

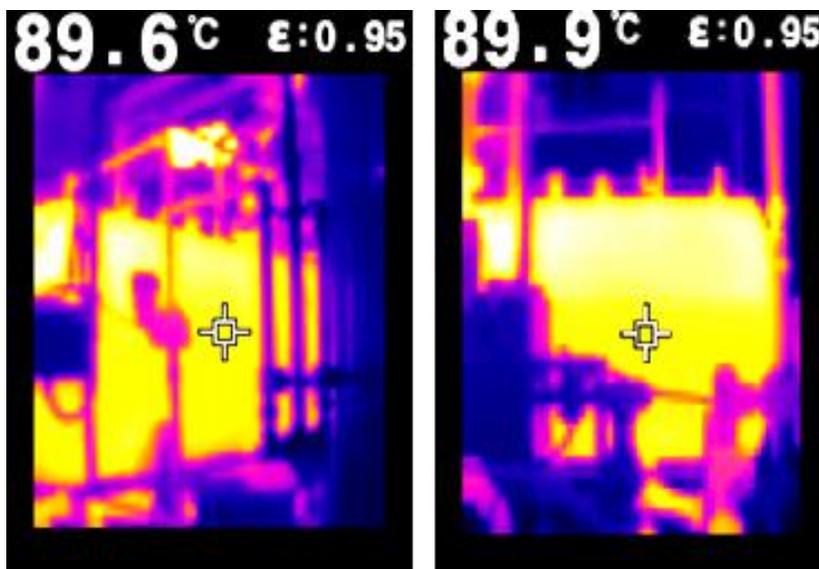
Una vez se conoció el sistema de tuberías y se determinaron las deficiencias en el sistema, se realizó la toma de datos de pérdida de calor a través del sistema de generación y distribución de vapor.

Se utilizó una cámara termográfica para la recolección de datos. Con este instrumento de medición es posible conocer la cantidad de calor que está emanando un cuerpo determinado. Las mediciones de temperatura se realizaron en grados Celsius. Entre las principales pérdidas de calor que afectan al sistema energético, se deben de mencionar las pérdidas por convección, por radiación y conducción. Un factor que involucra directamente este aspecto, es el mal estado de los aislantes térmicos a través del sistema de tuberías. Este es el mayor problema energético en el transporte de vapor.

Para tomar en cuenta el porcentaje de pérdida de calor a través del sistema, se define la cantidad de calor perdido y el número de elementos que lo provocan para determinar un promedio y compararlo en el sistema para conocer el resultado del porcentaje de pérdida energética.

Dentro de la auditoría energética se tomaron datos relacionados con la fuga de calor en la generación de vapor a la carcasa de la caldera y segmentos expuestos de uniones en la tubería principal.

Figura 22. **Foto térmica de carcasa de caldera**

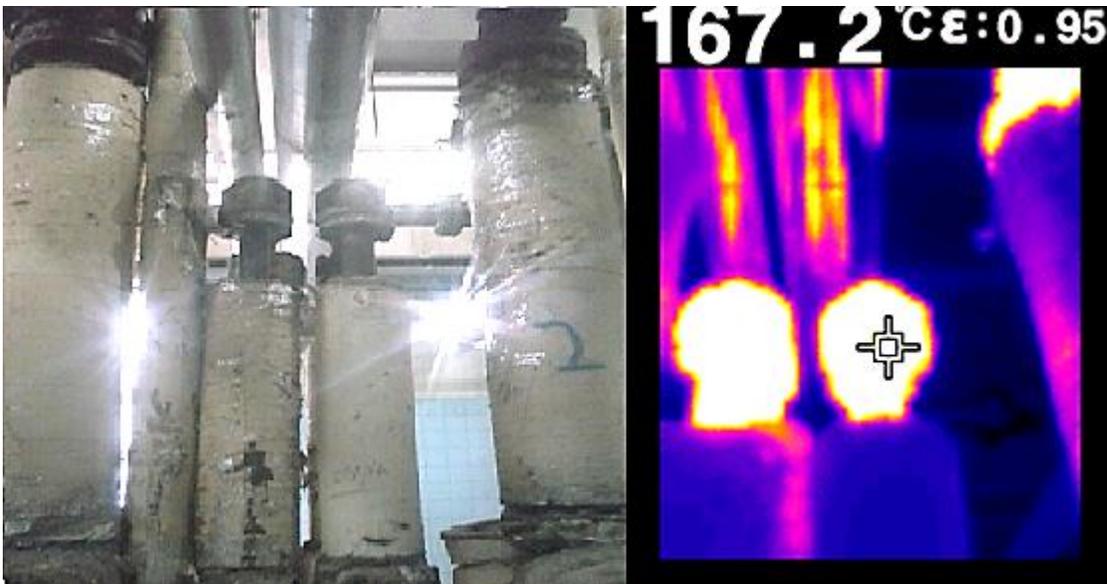


Fuente: Centro Médico Militar, zona 16, Guatemala.

Así mismo, en la figura 23, se puede observar pérdida de calor por convección a través de las uniones, las cuales no están forradas de aislante debido al mantenimiento que se le da a los empaques que se encuentran instalados intermediamente. Estas uniones representadas son utilizadas en la distribución del manifold principal hacia el área de cocina y lavandería.

Aunque sea inevitable el involucramiento de estas uniones por las fugas que puedan generarse, es necesario que se le brinde el mantenimiento pertinente durante el tiempo que no está en uso. El objetivo es determinar la viabilidad del forrado de aislante, para minimizar las pérdidas de calor en el sistema de distribución de vapor.

Figura 23. Pérdida de calor por radiación



Fuente: Centro Médico Militar, zona 16, Guatemala.

Se determinó fuga energética importante dentro del sistema de distribución a través de las tuberías que conducen el vapor hacia el área de lavandería y cocina. Estas no contaban con un aislante térmico que permitiera contener el calor para evitar estas pérdidas.

Las pérdidas de calor ocasionadas a través de la tubería obligan a que la caldera trabaje más de lo necesario para reponer el calor perdido. Además, debe sumarse el trabajo que debe realizar la caldera para superar el grosor de los sedimentos de las incrustaciones. En estos procesos se identifica la mayor

pérdida energética y consumo innecesario de insumos, especialmente de búnker.

Es importante relacionar estos conceptos para inferir un resultado óptimo en la producción de vapor. Muchas veces se trata de solventar alguna avería mediante técnicas no recomendables, con el ánimo de cumplir con la labor.

La eficiencia en el sistema comprende, fundamentalmente, estos factores que se deben tomar en cuenta cuando se formulen proyecciones de inversión. De esta manera se asegura que las instalaciones del sistema de vapor puedan seguir brindando un servicio óptimo para las áreas a los que alimenta. La falta de atención puede ocasionar problemas cuyas consecuencias negativas se pueden magnificar dentro del sistema energético.

La tubería expuesta, además de tener un impacto directo en la pérdida del calor en la movilización del vapor, es una zona insegura para los trabajadores que se ocupan de realizar reparaciones o limpieza en las áreas donde se encuentran estas tuberías expuestas. Una característica descrita en las propiedades de la tubería, es que posee célula 80. Este es un grosor mayor al de las tuberías normales lo cual permite que soporte el ambiente a la que ha sido expuesta y cumpla sus propósitos en el diseño.

A continuación, en la figura 24, se representa la temperatura a la cual se encuentra la tubería expuesta en el sistema de distribución, específicamente, en el ducto que conduce hacia el área de lavandería.

Esto genera una condición insegura para los trabajadores, ya que puede representar un peligro de quemadura grave si entra en contacto con la piel.

Figura 24. **Fuga energética en tubería**



Fuente: Centro Médico Militar, zona 16, Guatemala.

Se debe tomar en cuenta el total de las fugas energéticas para considerar de qué manera y en qué cantidad afecta al sistema energético, la generación y distribución del vapor.

Mediante un análisis financiero, se determina la viabilidad económica de la adquisición del aislante térmico que permita conservar, de mejor manera, el calor en comparación con las cantidades de ahorro de insumos trabajados para la producción del vapor en el Centro Médico Militar.

2.4. Generación de vapor

La generación de vapor que produce la caldera es un índice fundamental para la conceptualización de la eficiencia del sistema en el que se está trabajando. Los requerimientos de las cantidades de vapor generados están en función de las necesidades de los equipos médicos por suministrar. Por eso, se determinará la eficiencia de trabajo actual, tomando en cuenta el nivel de

producción de vapor y los resultados de las características de las emisiones de humo de la caldera que son emitidas hacia el medio ambiente.

2.4.1. Eficiencia de caldera

La eficiencia en una caldera se puede describir como la relación entre la energía absorbida por el agua de alimentación (calor) al convertirse en vapor y la energía total empleada del combustible para lograr esa transformación.

Es importante describir que la eficiencia de una caldera nunca podrá llegar a ser del 100% debido a que son inevitables las pérdidas de calor por diversos fenómenos físicos, como la pérdida de calor por convección, radiación y conducción. Sin embargo, éstas se deben de reducir al mínimo tomando las acciones necesarias.

Generalmente, se pueden establecer las pérdidas de eficiencia de una caldera por cinco factores fundamentales:

- El calor arrastrado en los gases calientes que son evacuados a través de la chimenea.
- El combustible no quemado, consecuencia de una combustión mal equilibrada debido a falta de oxígeno.
- El calor que transporta la purga de la caldera.
- La humedad presente en las emisiones a altas temperaturas de la chimenea.

- La pérdida del calor irradiado en la sala de calderas y el calor perdido por convección al estar en contacto con el medio ambiente, debido a los aislantes que protegen el sistema de generación de vapor.

La eficiencia de una caldera se calcula como la eficiencia de la combustión menos el porcentaje de las pérdidas que se describieron anteriormente.

De esta manera, se establece que la eficiencia de la caldera dependerá del manejo eficiente de los recursos necesarios, lo que permitirá mitigar lo más posible estos efectos indeseados en el proceso.

Para analizar la eficiencia de la combustión se puede utilizar equipo sofisticado de medición de gases de combustión. Sin embargo, debido a la falta de presupuesto, el Centro Médico Militar carece de dicho equipo. Por eso, se calculó la eficiencia de manera práctica, utilizando las tablas correspondientes.

Los datos analizados comprenden el exceso de aire y porcentaje de oxígeno. Sabiendo que se maneja alrededor de 2% de oxígeno a una temperatura de gases de 600°F, se consulta la tabla de anexo 1, en la cual se puede observar la intersección obteniendo una eficiencia de combustión de 83%.

Esta no es la eficiencia de la caldera, pues aún faltan restarle los elementos de pérdidas por medio del análisis de TDS (Sólidos totales disueltos). Para este análisis, se requiere de un tratamiento químico que permitirán medir los valores que se necesitan saber. Este procedimiento se llevó a cabo en conjunto con una empresa encargada de brindarle este tipo de monitoreo a la caldera del Centro Médico Militar.

A continuación, se presentan los valores del resultado del análisis de TDS llevado a cabo para la caldera Cleaver Brooks.

Tabla II. **Análisis de sólidos totales disueltos**

PARÁMETROS	Agua Cruda	Agua Tratada	Agua de Alimentación	
Alcalinidad parcial	0	--	0	
Alcalinidad total	60	--	40	
Total de sólidos disueltos (TDS)	133	--	94	
Cloruros	11	--	9	
Dureza total	42	--	23	
PH	7.1	--	6.9	
	Caldera	Estándares	Datos Operativos	
Alcalinidad parcial	700	300 - 700	Caldera	500 HP
Alcalinidad total	950	400 - 800	T° de alimentación	60°C
Alcalinidad OH	450	200 - 800	Presión (psi)	125
Dureza total	Trazas	0	Combustible	Búnker
Total de sólidos disueltos (TDS)	2 340	<2 500	%de Retorno	28
Frecuencia de purga, ciclos de concentración	20.89		% de Purga	25

Fuente: elaboración propia.

Por lo tanto, se tiene que:

Tabla III. **TDS Globales**

TDS Retorno de condensado (ppm)	94
--	----

Continuación de la tabla III.

TDS Agua de caldera (ppm)	2 340
TDS Agua suave (ppm)	133
Fracción	8.2%
TDS (ppm)	7,708

Fuente: elaboración propia.

$\% \text{ de Purga} = (\text{TDS Make up} / \text{TDS Agua Caldera}) * 100$

$\% \text{ de Purga} = 0,33\%$

$\% \text{ de Pérdidas por radiación y convección} = 2,5\% \text{ (Dato estimado)}$

$\text{Eficiencia de la caldera} = \text{Eficiencia de la combustión} - (\% \text{ pérdidas de purga} + \%$
 $\% \text{ de pérdidas por radiación y convección})$

$\text{Eficiencia de caldera} = 83\% - (0,33\% + 2,5\%)$

$\text{Eficiencia de caldera} = 80,17\%$

2.4.2. Medición de emisiones de caldera

La composición porcentual de las propiedades de los elementos que forman los gases de combustión marca un índice básico correspondiente a la eficiencia de combustión en el sistema. Este procedimiento de medición permite identificar la cantidad óptima de exceso de aire que se suministra a la cámara de combustión para que las partículas tengan un proceso equilibrado, sin desperdicio de recursos importantes, como el combustible y el calor producido.

Al obtener un elevado exceso de aire, se observan lecturas altas de oxígeno y lecturas bajas de dióxido de carbono. Esto se debe a que el excedente de oxígeno se filtra a través de los gases de combustión, desperdiciando un recurso básico para la combustión eficiente del sistema.

Al contrario, si el suministro de exceso de aire es bajo, proporcionará una lectura baja o nula de oxígeno, puesto que las partículas serán capturadas rápidamente por el combustible y el exceso de las partículas de combustible que prevalecerá se desperdiciará a través de los gases de emanación. Esto arrojará porcentajes altos de monóxido de carbono; además, el color del humo será negro por las partículas de aceite combustible que no se atomizaron en la cámara de combustión de la caldera.

Figura 25. **Calor específico de gases de combustión**

Calor específico de distintos gases de combustión (kJ/m ³ °C)					
Temperatura °C	O ₂	CO ₂	N ₂	H ₂ O	SO ₂
100	1,2156	1,7376	1,2742	1,5706	1,7414
200	1,2910	1,8389	1,2809	1,5811	1,7849
300	1,3408	1,9139	1,2931	1,5936	1,8276
400	1,3764	1,9741	0,8837	1,6079	1,8695
500	1,4036	2,0256	1,3115	1,6233	1,9101

Fuente: *Procedimiento de inspección periódica de eficiencia energética para calderas, Instituto para la diversificación y ahorro de la energía. p.23.*

Las frecuencias de estas revisiones, dependerán de los niveles de mantenimiento y de rendimiento de combustible observado en el trabajo del sistema. Si se presentan aumentos de consumo, y se observa un color de humo negro, son indicios de un exceso de combustible en la mezcla y, como consecuencia, que haya una deficiencia en el suministro de aire. Por lo que se debe de tener especial atención en estos aspectos.

Las pérdidas de gases húmedos de combustión se mantienen en niveles equilibrados en comparación con las variabilidades que sufren las emisiones de

la caldera. La presencia de monóxido de carbono se conserva a un nivel inferior, excepto donde, por causa de niveles reducidos de exceso de aire las propiedades del desgaste del proceso de combustión provocan cambios bruscos negativos.

2.4.3. Nivel de producción de vapor

Para determinar las libras de vapor producidas, es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos técnicos de trabajo.

Tabla IV. **Cantidades de trabajo**

Energía por hora (BTU/h)	2 092 200
Presión de trabajo (psi)	125
Presión absoluta (psia)	139,5
Temperatura de agua de alimentación (°F)	140

Fuente: elaboración propia.

Para calcular las libras de vapor producidas en el sistema que se analiza, se debe utilizar la siguiente fórmula:

$$Mn = \frac{Qn}{(hg - hf)}$$

Donde:

Qn = Energía por hora (BTU/h)

h_g = Entalpía de vapor saturado seco a presión absoluta (BTU/lbm)

h_f = Entalpía de líquido saturado a presión absoluta (BTU/lbm)

M_n = Consumo de vapor en libras/hora

Entonces se determinan las entalpías de trabajo en el sistema utilizando las tablas de vapor para cada caso.

Entalpía de vapor saturado seco

Presión (psia)	H (BTU/lbm)
120	1 191,1
139,5	ΔH
140	1 193,8

$$\Delta H_g = 1\,193,73 \text{ BTU/lbm}$$

Entalpía de líquido saturado

T = 140°F

$$\Delta H_f = 107,96 \text{ BTU/lbm}$$

Por lo tanto, sustituyendo las entalpías encontradas, en la ecuación de consumo de vapor se tiene como resultado:

$$M_n = \frac{2\,092\,200 \text{ BTU/hora}}{(1\,193,73 - 107,96) \text{ BTU/lbm}}$$

$M_n = 1\,926,43 \text{ Lb/hora de vapor.}$

Con este rendimiento se obtiene una mejor dimensión del vapor requerido de los equipos que utiliza este sistema si se comparan con el rendimiento de vapor producido. Se detectará si existe un exceso en la

producción de vapor o bien, una deficiencia que obligue a que la caldera trabaje en exceso para reponer la energía faltante a causa de la escasez de vapor.

2.5. Disminución de vapor

La distribución del vapor a través de las líneas de conducción es un apartado muy importante en el análisis de la eficiencia, debido a que no conviene tener una buena eficiencia en la producción de vapor, si en su distribución existen deficiencias que afectan el proceso y producen desajustes que lleven a la variación de índices y parámetros.

Su diseño debe responder a la satisfacción de la necesidad de los equipos de trabajo en el Centro Médico Militar. Así que, no se discutirá su distribución física a través de la línea de conducción, pero sí sus características mecánicas y condiciones físicas actuales.

2.5.1. Características de tubería principal

Entre las características principales que se denotaron en la distribución de la tubería principal que conduce el vapor hacia los equipos de trabajos se determinaron elementos que, debido a su antigüedad, carecían de eficiencia en su funcionamiento. Esto producía desajustes provocando caídas de presión que la caldera debía reponer para alcanzar los requerimientos del sistema.

En la sección de tubería que conducía hacia el manifold principal, que distribuye hacia diversas zonas del hospital, específicamente al área de autoclaves, se identificaron tuberías con accesorios no aptos que si bien, ayudan al proceso, no se obtienen los resultados necesarios. Esto se debe a que los accesorios se han sometido a diversas adaptaciones para que puedan

ser “funcionales” aunque no necesariamente óptimos. Esto se debe a la escasez de presupuesto para adquirir accesorios nuevos.

Figura 26. **Acoplamiento adaptado**



Fuente: Centro Médico Militar, zona 16, Guatemala.

Se puede observar la manera como fue colocado de manera forzada, de manera que el elemento pudiera ser funcional, pero representa grandes caídas de presión en el sistema que repercuten directamente en la eficiencia del sistema de distribución de vapor. Este no es el único accesorio al que se le ha practicado este tipo de arreglos, aunque tampoco son muchos. Se debe tener en cuenta que no puede seguir realizándose ese tipo de acciones, pues generan altos costos de distribución.

Figura 27. **Manifold de distribución principal**



Fuente: Centro Médico Militar, zona 16, Guatemala.

Según se observa, el manifold de distribución principal, de 4 ramales de distribución, únicamente cuenta con 2 tuberías disponibles que son las que distribuyen hacia el área de autoclaves y hacia otras áreas en las que el vapor no es tan requerido, pero es utilizado ocasionalmente.

En la tubería que distribuye hacia el área de esterilización (autoclaves), se observa el aislante que protege la tubería; sin embargo, carece de su cascarón de lámina que protege al propio aislante. Esto ocasiona que el recubrimiento tenga un desgaste más rápido y gastos innecesarios de reemplazo de material. Por eso, se recomendó el cubrimiento del aislante.

La distribución de la tubería en la sección que conduce hacia el área de cocina y al área de lavandería es subterránea. Cuenta con una elevación adecuada entre el suelo y la parte física del tubo. Esto se debe a que se

encontraron fugas de vapor que producían condensado en el suelo, y provocaba acumulación de agua a sus alrededores.

Además, se encontró tubería expuesta a condiciones ambientales sin aislante esto afecta directamente la vida útil del material, también produce una pérdida de calor en el sistema y un riesgo inminente para los trabajadores encargados de realizar reparaciones en los accesorios que se encuentren cerca de esta tubería ya que alcanza temperaturas muy altas que pueden provocar quemaduras graves si entra en contacto con la piel.

Figura 28. **Sección de tubería expuesta (sin aislante)**



Fuente: Centro Médico Militar, Zona 16, Guatemala.

Tomando en cuenta estas condiciones de la tubería principal, se describen las características técnicas correspondientes para alcanzar la eficiencia en la distribución de vapor.

3. ANÁLISIS DE MEJORA DE EFICIENCIA

3.1. Mejora de diseño en tubería

A continuación, se presenta la propuesta de mejora en el diseño técnico de la tubería que es encargada de la distribución de vapor. Para ello, se toman las consideraciones más importantes en cuanto al estudio de caída de presión y velocidad de vapor corresponden.

3.1.1. Diámetro de la tubería principal

El diámetro correspondiente a la tubería principal, que distribuye hacia los demás espacios, es de 2 pulgadas. Este diámetro permitirá realizar una comparación, de un diámetro teórico obtenido por medio del método de factor de caída de presión, que proporciona un diámetro óptimo según las características de la tubería y de los requerimientos de vapor. De esta forma, se compara y determina si el diámetro actual aún cumple con las necesidades del sistema.

De lo anterior se utilizarán las siguientes ecuaciones:

$$F = \frac{(P_1 - P_2)}{L}$$

Donde:

F= Factor de caída de presión

P₁= Factor basado en la presión inicial

P₂= Factor basado en la presión final

L= Longitud de la tubería

Los factores P1 y P2, se determinan mediante una tabla de factores de presión para tubería. Y el factor de caída de presión, a partir de otra tabla que describe la capacidad de tubería y factores de caída. Estas tablas corresponden a la tabla de anexo 2 y 3, respectivamente.

Lo anterior da como resultado:

Tabla V. **Factor de presión para tubería (P1)**

Presión de entrada (psig)	Factor basado en la presión inicial	Caudal de vapor (pies/lb)
125	14 340	3,3

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Factor de presión para tubería (P2)**

Presión de entrada (psig)	Factor basado en la presión inicial	Caudal de vapor (pies/lb)
20	965	12,1

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la determinación de la longitud de la tubería, tomando en cuenta la tubería de la cocina, lavandería y autoclaves; se estimó que se tiene

un total de 213,25 pies, sin tomar en cuenta la longitud equivalente. Debido a que se carece del número exacto de accesorios en funcionamiento y accesorios dañados, se estimará un valor de 15% de pérdida de energía por fricción debido a los accesorios. Así, se obtiene una longitud de tubería total de 245,23 pies.

$$P1 \text{ (a 125psig)} = 14\,340$$

$$P2 \text{ a (20psig)} = 965$$

$$F = \frac{(1\,430 - 965)}{245,23} = 54,54$$

En la tabla en el anexo 2, se observa que para un tubo de diámetro de 4 pulgadas y un factor de caída de presión de 50, fluye 3 800 lb/h de vapor y para un tubo de diámetro de 3 pulgadas, al mismo factor de caída de presión, fluye 1 420 lb/h de vapor. Al determinarlo por medio de rendimientos de vapor, se obtiene un requerimiento de 1 258 lb/h de vapor. Por lo que, teóricamente, se debe utilizar una tubería de 3 pulgadas de diámetro, para obtener una eficiente distribución de vapor.

3.1.2. Longitud de la tubería

En el análisis de la tubería que se encarga de distribuir el vapor hacia los equipos que así lo requieran se debe contemplar, además de la longitud física de las tuberías, una longitud imaginaria llamada “Longitud equivalente”. Esta constituye la equivalencia de longitud de tubería que se le debe de agregar a la real, debido a las pérdidas de fricción ocasionada por los accesorios que se encuentran distribuidos a lo largo del sistema de distribución vapor.

Si se conocen la cantidad y los tipos de accesorios que se encuentran distribuidos, es posible consultar una tabla de equivalencia de accesorios, que

ofrece una proporción de la longitud de tubería correspondiente al accesorio que se está analizando.

Tabla VII. **Proporciones de longitud equivalente según accesorios**

Accesorio	Le/D
Codo 45°	15
Codo 90° radio standard	32
Codo 90° radio mediano	26
Codo 90° radio grande	20
Codo 90° en escuadra	60
Codo 180°	75
Codo 180° radio mediano	50
TE (usada como codo, con entrada por la parte recta)	60
TE (usada como codo, con entrada por la derivación)	90
Acoplamiento	despreciable
Unión	despreciable
Válvula de compuerta	7
Válvula de asiento (abierta)	300

Fuente: Ing. Roberto Guzmán. Instalaciones Mecánicas, Generación y distribución de vapor, Escuela de ingeniería Mecánica. p. 18.

Cuando no se tenga conocimiento de la cantidad de accesorios distribuidos en el sistema, se puede asumir una pérdida de fricción de 10%. Y si se trata de longitudes muy grandes, este valor puede ascender hasta 20%.

3.1.3. Velocidad de vapor

La velocidad del vapor a través de la línea de distribución se puede calcular contemplando los datos obtenidos en el apartado de diámetro de tubería. Esto es posible porque, conociendo el factor de caída de presión, es posible consultar la Tabla XLIII en la sección de anexos y determinar el valor correspondiente.

Si se sabe que el requerimiento de vapor es de 1 258 lb/h, se le debe considerar una pérdida ocasionada por el efecto de radiación en la línea. Para tuberías que oscilan entre 1 a 4 pulgadas (como en este caso) la pérdida se encuentra alrededor de un 1% de vapor por cada 100 pies de tubería. Una vez se ha determinado que la tubería total (tomando en cuenta la longitud equivalente) es de 245,23 pies, se agrega una pérdida del 2%.

Entonces, se tiene que: $1\ 258 * 1,02 = 1\ 283,16$ lb/h de vapor.

Para calcular la velocidad real en la que debe estar comprendido el manejo del vapor se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Velocidad real} = \frac{(Y)(\text{Volumen})}{V_s},$$

Donde:

Y = Velocidad con volumen de 10 pies³/lb

V = Volumen

Vs= Volumen específico

Por lo que para un diámetro real de tubería de 2 pulgadas y una carga de 1 283,16 lb/h de vapor, la tabla en el anexo 3 indica una velocidad de 180 pie/s con un volumen de 10 pies³/lb.

En la tabla V, se observa que a una presión de 125 psig se tiene un volumen de 3,3 pies/lb; por lo tanto,

sustituyendo,

$$\text{Velocidad de vapor} = \frac{(180 \text{ pie} / \text{s})(3.3 \text{ pie} / \text{lb})}{10 \text{ pie}^3 / \text{lb}} = 59,4 \text{ pie/s}$$

3.1.4. Aislamiento

Como se ha analizado a través del sistema de generación y distribución de vapor, el aislamiento es una parte básica para el funcionamiento óptimo del sistema. Por eso, es muy importante establecer parámetros de verificación de estado de aislante que permitan identificar rápidamente las necesidades que surjan conforme se deteriore la vida útil del aislante.

El aislante tiene la función principal de conservar la energía para evitar que se transfiera al medio ambiente y se conserve lo más posible en el proceso en el cual se está trabajando. Este tipo de material provee resistencia al flujo de calor con lo cual reduce las pérdidas en los sistemas de vapor.

Además, proporciona una capa protectora para evitar el contacto entre la tubería de trabajo y los operarios o las personas que se encuentren realizando alguna actividad en las inmediaciones de la tubería de distribución. Esto es

necesario porque las altas temperaturas en un sistema de vapor pueden producir quemaduras graves. Los factores que inciden en el proceso de aislamiento adecuado y eficiente del sistema son: costo del combustible, diámetro de la tubería, longitud física de la tubería, localización, temperatura de operación, eficiencia de la caldera.

Una característica básica del aislante es la compactación. Un efecto de los espacios compactados en el material del aislante, es una disminución en el flujo de calor. El diámetro de estos espacios debe ser muy pequeño, tanto que deba obstruir el paso del aire para que, de esta forma el porcentaje de pérdida de calor por convección sea mínimo.

Figura 29. **Tubería principal protegida por aislante**



Fuente: Centro Médico Militar, zona 16, Guatemala.

También se debe tomar en cuenta la pérdida de calor por conducción, la cual se encuentra obstruida debido a la compactación del material. Finalmente, el material aislante debe ser suficientemente opaco como para mitigar la radiación que constituye el tercer tipo de pérdida de calor.

La fibra de vidrio, silicato de calcio, uretano y asbesto son los materiales de aislantes más comunes en sistemas de vapor. Sin embargo, el asbesto se ha dejado de utilizar para fabricar elementos que tengan un contacto constante con humanos, debido a sus propiedades cancerígenas.

A continuación, se presenta una tabla con las mayores aplicaciones de los aislantes en la industria.

Tabla VIII. **Propiedades de conductividad y sus aplicaciones**

Materiales de aislantes	Intervalo de temperatura °F	Conductividad Btu-pulg/hpie-°F	Densidad lb/pie ³	Aplicaciones
Espuma de uretano	-270 a 225	0,11 a 0,14	2,0	Tanques y recipientes
Manta de fibra de vidrio	-270 a 450	0,17 a 0,6	0,6 a 3,0	Enfriadores, tanques (calientes y fríos) equipo de proceso
Láminas de elastoméricas	-40 a 220	0,25 a 0,27	4,5 a 6,0	Tanques y enfriadores
Tableros de fibra de vidrio	ambiente a 850	0,23 a 0-36	1,6 a 6,0	Calderas, tanques e intercambiadores

Continuación de la tabla VIII.

Tablas y bloques de silicato de calcio	450 a 1200	0,22 a 0,59	6,0 a 10,0	Calderas, tanques e intercambiadores
Bloques de fibra mineral	hasta 1900	0,36 a 0,90	10,0 a 13,0	Calderas y tanques
Cañuela de fibra de vidrio	-120 a 850	0,2 a 0,31	1,5 a 3,0	tuberías

Fuente: elaboración propia.

El nivel de espesor que contenga el aislante debe ser tal que haya equilibrio entre el costo de pérdidas de calor y los costos de aislamiento; ya que, a medida que el grosor aumenta, las pérdidas de calor disminuyen y los costos de aislamiento aumentan.

Los siguientes factores afectan el costo de aislamiento: costos de materiales, de mantenimiento, de instalación, interés y depreciación.

Los costos de pérdidas de calor se ven afectados por el valor de combustible, de mantenimiento del equipo, horas de operación, interés y depreciación.

3.2. Mejora en el retorno de condensado

A continuación, se analizará el estudio TDS con un análisis enfocado en la manera en que se comporta el agua tratada para medir la eficiencia del retorno, más que la eficiencia de combustión de la caldera. Esto se debe a que es un aspecto que repercute de manera indirecta, pero que es el elemento importante

a tomar en cuenta cuando se delimiten acciones correctivas para aumentar la eficiencia del sistema.

Tabla IX. **Tabla de control de agua (análisis TDS)**

PARÁMETROS	Agua Cruda	Agua Tratada	Agua de Alimentación	
Alcalinidad parcial	0	--	0	
Alcalinidad total	70	--	50	
Total de sólidos disueltos (TDS)	125	--	90	
Cloruros	11	--	9	
Dureza total	46	--	36	
PH	7.1	--		
	Caldera	Estándares	Datos Operativos	
Alcalinidad parcial	600	300 - 700	Caldera	500 HP
Alcalinidad total	850	400 - 800	T° de alimentación	60°C
Alcalinidad OH	350	200 - 800	Presión (psi)	125
Dureza total	Trazas	0	Combustible	Búnker
Total de sólidos disueltos (TDS)	2 225	<2 500	%de Retorno	26
Frecuencia de purga, ciclos de concentración	24,72		% de Purga	25

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar que el porcentaje de purga está por debajo. Esto puede ser por causa de una falta de régimen de purga de trampas de vapor, estaciones reductoras de presión. Esto se debe a que carecían de un programa de mantenimiento que especificara a los operarios las acciones que debían realizar y en qué momento llevarlas a cabo para lograr un porcentaje mayor de purga y aumentar el porcentaje de retorno de condensado, el cual se encontraba en un 26%.

Una vez establecido el porcentaje de retorno de condensado actual, se recomiendan las siguientes acciones para lograr un aumento considerable de este porcentaje.

3.2.1. Acciones correctivas

Las acciones correctivas correspondientes al retorno de condensado se enfocarán en tres aspectos fundamentales para la obtención del retorno, estos temas comprenden:

- El cambio de trampas de vapor en mal estado
- Inclinación de la tubería
- Condensados no recuperados

Ya que debido a la auditoría realizada a través de las tuberías de distribución y retorno se pudieron determinar, en gran parte, el incumplimiento de estas acciones recomendadas.

3.2.1.1. Cambio de trampas de vapor en mal estado

Esta acción es primordial para aumentar el porcentaje de condensado ya las seis trampas de vapor distribuidas en el sistema no estaban cumpliendo su labor eficientemente. Como consecuencia, el condensado no se evacua correctamente hacia el sistema de retorno, sino se distribuya a través de la tubería provocando los golpes de ariete mencionados. Asimismo, la pérdida de éste condensado en el procedimiento de la evacuación de los condensados no recuperados al final del día.

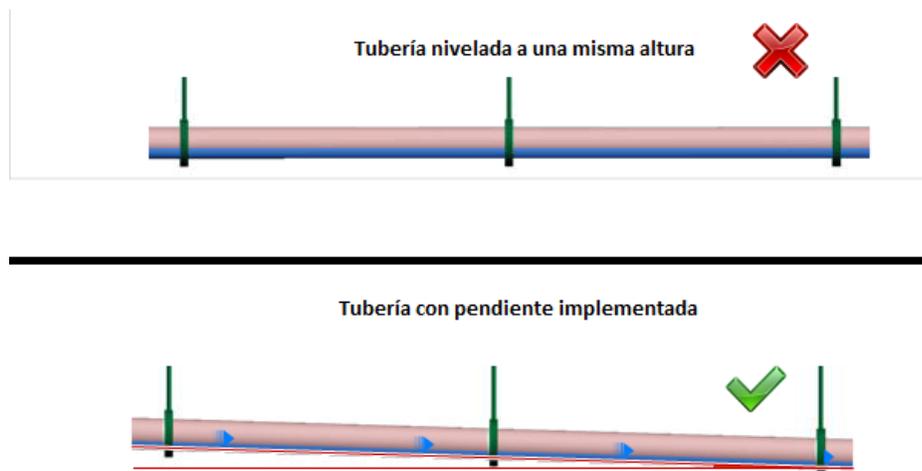
3.2.1.2. Inclinação de tubería

Este aspecto técnico no se tenía contemplado en los diseños de la tubería que distribuye hacia las áreas de autoclaves, lavandería y cocina. Si bien la tubería de las áreas de cocina y lavandería se encuentra subterránea, no se halla a ras de suelo. Por ello, se recomienda brindarle una inclinación con una pendiente mínima de 1% en el sentido del flujo, o bien puede implementarse un declive progresivo de una pulgada y media, por cada 10,05 metros.

Como se obtiene una longitud de tubería real de 64.92 metros, se recomienda establecer 6 declives progresivos con un total de 9 pulgadas de inclinación (1.5" por cada declive). Dado que entre el suelo y la pared superior hay, aproximadamente, 1,5 metros de altura es viable el ajuste de los anclajes para llevar a cabo esta modificación. Con ello, el condensado se establece en la parte inferior de la tubería de vapor, debido a la densidad que contiene. De esta forma, se podrá facilitar el atrape de este condensado a través de las trampas de vapor correspondientes.

Adicionalmente, es conveniente que durante la calibración de los anclajes a su nueva altura, se verifique el estado en que se encuentran, pues se observó que existen anclajes sueltos (por causa del golpe de ariete y ausencia de mantenimiento) y no cumplen su función de sujeción de la tubería. Con ello, se impide que haya declives no requeridos cuyo efecto no se desea en el transporte del vapor y del condensado que en este se encuentre.

Figura 30. **Comparación de tuberías sin pendiente y con ella**



Fuente: *Las mejores prácticas para la remoción de condensado.*

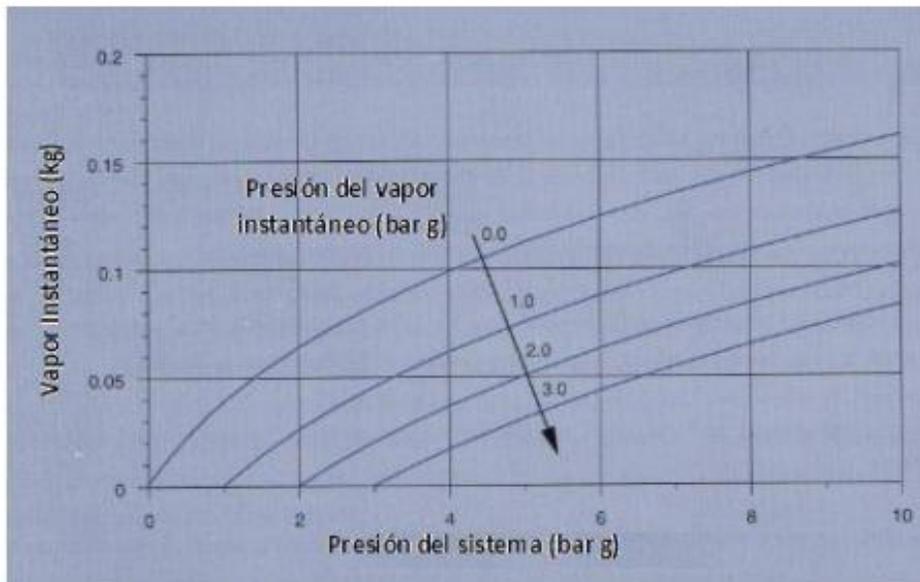
<http://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/steam-lines-best-practices.html>. Consulta: noviembre de 2016.

3.2.1.3. **Condensado no recuperado**

El condensado no recuperado se evacúa a través de la tubería de desagüe que desemboca hacia el medio ambiente. Se pretende recolectar la mayor cantidad de este condensado en un tanque abierto desde donde se le pueda bombear hacia la caldera en intervalos de tiempos determinados. Debido a que se trata de un sistema abierto, se debe contemplar la evaporación

instantánea del condensado empleando la siguiente gráfica que describe la cantidad de masa evaporada en función de la presión del sistema.

Figura 31. **Porcentaje de vapor instantáneo**



Fuente: Carl Hans. *Gentrake-Fachverlag, Brewery Utilities*. p. 40.

3.3. Rendimientos de equipos que utilizan vapor

Los rendimientos de los equipos utilizados en las áreas analizadas corresponden, principalmente, a marmitas (cocina), planchadoras y secadoras (lavandería) y autoclaves (central de equipos). El cálculo de los requerimientos de vapor de las marmitas se realiza mediante el método de energías.

Se establecen horarios estrictos de suministro de vapor para las áreas que lo requieran, de manera que ya están establecidos los límites de tiempos de los procedimientos en las áreas que emplean el vapor. A excepción de fechas de asuetos o eventos especiales, se suministra una dosis extra de vapor al área

que lo requiera, sin embargo, este costo se cargará al área que haga uso extraordinario del vapor.

Para las planchadoras, secadoras y autoclaves, se consultan tablas de consumo que describan sus rendimientos en horario matutino el cual se describe en la siguiente tabla.

Tabla X. **Horario de suministro de vapor**

Horario de suministro de vapor	
Cocina	8:00 – 12: 00
Lavandería	8:00 – 12:00
Autoclaves	5:00 – 10:00

Fuente: elaboración propia.

3.3.1. **Marmitas**

Se cuentan con cuatro marmitas con una capacidad de 40 galones. Trabajan a una presión de 20 psig, alcanzando una temperatura de 176°F. Se observaron dos fugas de vapor, que tienen un impacto directo en la reposición de éste suministro.

Las marmitas, generalmente, se usan para calentar leche. Cuentan con una $C_e = 0.93$ BTU/lb °F, con una temperatura inicial de 68°F y una temperatura final de 176°F. A continuación, se calculan las libras de vapor consumidas en dicho proceso.

$$\rho_{leche} = 1\,029,6 \frac{Kg}{m^3} * \frac{2,2Lb}{1Kg} * \left(\frac{1m}{3,28pie} \right)^3 = 64,19 \frac{lb}{pie^3}$$

$$40 \text{ gal} = 5,34 \text{ pie}^3$$

$$M = 64,19 \frac{lb}{pie^3} * 5,34 \text{ pies}^3 * \frac{1}{0,5h} = 685,55 \frac{lb}{h}$$

$$Q = 685,55 \frac{lb}{h} \left(0,93 \frac{BTU}{lb * ^\circ F} \right) * (176 - 68)^\circ F$$

$$Q = 68\,856,64 \frac{BTU}{hora}$$

Consumo de vapor

$$P = 20 \text{ psig} + 14,5 \text{ psig}$$

$$P = 34,5 \text{ psia}$$

En las tablas de vapor sobrecalentado, Tabla XLIV en la sección de anexos, se busca la entalpía requerida a esa presión. Debido a que no se encuentra para 34,5 psia, se interpola para obtener el valor de la entalpía que se busca.

Tabla XI. **Entalpía de vapor a 34,5 psia**

Presión psia	Entalpía Btu/lb
20	1 156,4
34,5	x
40	1 170

Fuente: elaboración propia.

$$\frac{40 - 20}{34,5 - 20} = \frac{1\ 170 - 1\ 156,4}{x - 1\ 156,4}$$

$$X = 1\ 166,26 \text{ BTU/lb}$$

Ahora, se busca en la tabla de agua saturada, Tabla XLV en anexos, con lo que se obtiene la entalpía requerida para sustituir en la ecuación de consumo de vapor.

Para $T = 68^\circ\text{F}$, tenemos un $H_f = 36,09 \text{ BTU/lb}$

$$M_n = \frac{6\ 885\ 664 \text{ BTU/hora}}{(116\ 626 - 36,09) \text{ BTU/lbm}} * 4 \text{ marmitas}$$

$$M_n = 243,7 \text{ lb vapor/hora.}$$

3.3.2. Planchadoras

Se revisaron las placas de datos de las planchadoras en uso. Algunas placas se encontraban casi ilegibles. En estos casos, se investigaron las tablas de rendimientos de equipos de lavandería utilizados en hospitales.

Tabla XII. **Rendimiento de planchadora, tipo prensa**

Equipo	Secadora Industrial
Marca	AJAX
Modelo	---

Continuación de tabla XII.

Presión de operación	80 psig
Consumo de vapor	50 lb/hr
Cantidad instalada	4

Fuente: elaboración propia.

Las placas base de las lavadoras industriales estaban en mal estado por lo cual se investigó en los manuales de fabricación de modelos similares.

Tabla XIII. **Rendimiento de lavadora industrial**

Equipo	Lavadora industrial
Marca	Milnor
Modelo	---
Presión de operación	80 psig
Consumo de vapor	210 lb/hr
Cantidad Instalada	2

Fuente: Manual de Operación, *MILNOR WASHER-EXTRACTOR*.

Finalmente se agregaron dos secadoras de marca ADC para complementar la carga de vapor total en el área de lavandería.

Tabla XIV. **Rendimiento de secadora industrial**

Equipo	Secadora industrial
Marca	ADC (American dryer corp)
Modelo	ADS120ES
Presión de operación	110 psig
Consumo de vapor	262 lb/hr
Cantidad Instalada	2

Fuente: elaboración propia.

Entonces, tomando en cuenta los requerimientos expuesto, se tiene un requerimiento total de vapor para el área de lavandería de: $(50 \cdot 4) + (210 \cdot 2) + (262 \cdot 2)$ lb vapor/hora = 1 144 lb de vapor /hora.

3.3.3. Autoclaves

Las autoclaves se emplean en el área de Central de Equipos. Con ellas se esterilizan los instrumentos médicos, los cuales se exponen al calor generado

que posee el vapor. De esta manera, las bacterias que puedan encontrarse en las herramientas o instrumentos médicos se eliminan.

Tabla XV. **Requerimientos de autoclave**

Equipo	Autoclave
Consumo de vapor	200 lb/hr
Cantidad Instalada	2

Fuente: elaboración propia.

3.4. Acciones de mejora en generación de vapor

A continuación, se presentan las acciones que se deben tomar en cuenta para mejorar la eficiencia en el proceso de la generación de vapor a través del sistema de suministro de este.

3.4.1. Aumento de exceso de suministro de aire

El nuevo porcentaje de exceso de aire requerido se calcula mediante la siguiente ecuación para llegar a un porcentaje de oxígeno de 5%.

$$\text{Exceso de aire (\%)} = K * \left(\frac{21}{21 - \%O_2} - 1 \right) * 100$$

Donde

K = 0.94 para Fuel-oil

%O₂ = porcentaje de oxígeno requerido

$$\text{Exceso de aire (\%)} = (0,94) * \left(\frac{21}{21-5} - 1 \right) * 100 = 29,37\%$$

Esto representa una disminución de temperatura de humos, ya que las partículas de oxígeno aprovechan mejor las partículas de combustible con lo cual el recurso se aprovecha mejor.

De esta manera se reducen los contaminantes en el medio ambiente y los gases emanados adquieren una tonalidad cercana a la transparencia, en virtud de la reducción del exceso de combustible en el sistema.

3.4.2. Controles de temperatura en gases de combustión

Además de agregar un mayor porcentaje de oxígeno al sistema de combustión, es importante que el aire suministrado lleve una temperatura alta para que la atomización sea más eficiente que la que se tiene en la actualidad. Por eso, en este estudio se contempla la implementación de un precalentador de aire para brindarle la temperatura requerida al aire de suministro.

Con el precalentador, el calor se aprovechará mejor y evitará que se pierda a través de los gases de emisión producidos por la combustión. Para obtener el valor óptimo de temperatura en los gases de emisión se calcula la temperatura a la que el aire debe ser suministrado. De esta forma se calcula la nueva eficiencia de combustión en el siguiente apartado.

Para calcular la temperatura estimada de los gases de salida de la chimenea, se utilizan las siguientes consideraciones promedio del extremo frío, mediante la siguiente ecuación:

$$T_g = 2T_{ce} - T_a$$

Donde:

T_g = Temperatura final de los gases de chimenea. °F

T_{ce} = Promedio recomendado de la temperatura de gases de chimenea enfriados, utilizando precalentadores de aire.

T_a = Temperatura ambiente.

Para encontrar el valor de T_{ce} , se utiliza la Tabla XLVI en la sección de anexos, en la cual, una vez se sabe que el búnker obtiene un porcentaje de azufre máximo de 5%, se obtiene una T_{ce} de 235°F.

Sustituyendo:

$$T_g = 2 (235^\circ\text{F}) - (71,6^\circ\text{F})$$

$$T_g = 398,4^\circ\text{F}$$

Se obtiene una temperatura de salida de gases de combustión de 398,4°F, aproximado a 400°F. Si se compara con la temperatura actual de 600°F, se obtiene un mejor aprovechamiento de 200°F de calor en el proceso de combustión.

3.4.3. Nueva eficiencia

Obtenidos los nuevos parámetros, se calcula el nuevo porcentaje de eficiencia de la caldera en el sistema de generación y distribución de vapor.

En el capítulo 2 se determinó que la eficiencia de combustión actual es de 83%, con 4% de oxígeno en la mezcla y una temperatura de gases de combustión de 600°F.

Por medio de la tabla XLVII tomada del Instituto Tecnológico de Georgia e incluida en la sección de anexos se determina la nueva eficiencia de combustión en el sistema. De acuerdo con los nuevos valores porcentuales de oxígeno y de exceso de aire, correspondientes al 5% y 29,37% respectivamente, y de las acciones de mejora recomendadas para obtener una temperatura de salida de gases de 400°F, se logra una eficiencia de combustión del 87,3%.

Esto permite mejorar notablemente, tomando en cuenta los procedimientos de optimización de recursos de oxígeno. Es un indicador básico para predecir el comportamiento futuro de los elementos de trabajo de la combustión. Por ello, los parámetros de suministro de búnker deben corresponder a los establecidos por el suministro del exceso de aire.

Una vez conocida la nueva eficiencia de combustión, debe restársele el porcentaje de pérdidas correspondientes a la purga y las pérdidas de convección y radiación.

$$\text{Eficiencia de Caldera} = 87,3\% - (0,33\% + 2,5) = 84,47\%$$

La eficiencia de caldera analizada anteriormente era de 80,17 es decir, que tenemos un aumento de 4,3 puntos porcentuales con respecto a la eficiencia de combustión actual. Con estos datos se calcula el ahorro de búnker que esta mejora de eficiencia produce en el apartado de análisis financiero.

3.5. Análisis financiero

El análisis financiero comprende el estudio del valor presente neto de los ingresos proyectados, así como sus índices de rendimiento y su viabilidad económica.

3.5.1. Costos de implementación

Los costos de implementación de los materiales y de las acciones que se deben llevar a cabo para aumentar la eficiencia en la caldera, corresponderán al nuevo porcentaje de eficiencia, produciendo la cantidad de vapor requerida por los equipos y reduciendo la cantidad de búnker necesaria. Este será el índice más importante de productividad.

El nuevo porcentaje de eficiencia es de 84,47%. Este se logra implementando las acciones correctivas recomendadas. Entre ellas está la reposición de las trampas de vapor en mal estado, la implementación de una modificación de los anclajes con una inclinación progresiva de la tubería de una pulgada y media, por cada 10,05 metros de longitud, para que el condensado se ubique en la parte inferior de la tubería debido a su diferencia de densidad con respecto al vapor. Esto permitirá un mejor proceso de atrape de condensado en las trampas de vapor y su posterior vaciado. De ésta forma se evita que los accesorios complementarios en la red de distribución se dañen. También se logrará un incremento en el porcentaje de recuperación de condensado.

Paralelamente, es necesario implementar el sistema de precalentamiento de aire para mejorar el rendimiento en el proceso de generación de vapor, específicamente, en el procedimiento de combustión. Anteriormente, se

describió la necesidad de recalibrar el nivel de suministro de aire proporcionado a la mezcla de combustión para incrementar el porcentaje de oxígeno que se encuentre en el aire suministrado.

Empleando los cálculos correspondientes en el apartado 3.4.1, se determinó mediante la ecuación

$$\text{Exceso de aire (\%)} = K * \left(\frac{21}{21 - \%O_2} - 1 \right) * 100$$

Donde:

K = 0,94 para Fuel-oil

%O₂ = porcentaje de oxígeno requerido

Que sería requerido un 29,37% de exceso de aire en la combustión, para obtener un 5% de oxígeno en la mezcla. Esto se consigue recalibrando el compresor encargado de suministrar el aire a la cámara.

Junto con estos resultados, si se aplica el precalentador de aire, se reducirá la temperatura de salida de gases de combustión cuyo valor de 600°F a 398.4°F se calculó en el apartado 3.4.2. Esto implicaría, aproximadamente, 200°F más de aprovechamiento en el procedimiento de generación de vapor.

Esta disminución de temperatura de humos implica que las partículas de oxígeno aprovechan mejor el combustible y se reduce la cantidad de contaminantes vertidos en la atmósfera. Además la tonalidad de los gases de emanación un color casi transparente. Todo ello, es el resultado de que las partículas de combustible compaginen de mejor manera con las partículas de oxígeno y esa temperatura extra, que ya no se estaría desperdiciando, no se concentraría en calentar la mezcla para lograr compensar la deficiencia del aire suministrado en un proceso sin precalentador de aire.

De esta manera, empleando las tablas proporcionadas por el Instituto Tecnológico de Georgia (tabla de anexo 7) se determinó la nueva eficiencia establecida, cumpliendo con las implementaciones de cambios de trampas, implementación de inclinación en la tubería de transporte de vapor, así como logrando el incremento de la cantidad porcentual del retorno de condensado, el cual se logró con el cambio de trampas (para un mayor atrapamiento del condensado), así como de la implementación del mejoramiento del método de recolección del condensado que se evacua hacia el medio ambiente, tal y como se describió en el apartado 3.2.1.3.

A la nueva eficiencia de combustión, se le debe restar el porcentaje de pérdidas correspondientes a la purga y las pérdidas por convección y radiación.

$$\text{Eficiencia de caldera} = 87,3\% - (0,33 + 2,5)\% = 84,47\%$$

De esta manera, se obtiene un aumento de 4,3 puntos porcentuales con respecto a la eficiencia de caldera actual. Luego, se calcula el ahorro de bunker que esta mejora de eficiencia produce.

Se estableció que se consumen alrededor de 10 000 galones mensuales. Por lo tanto, en un mes comercial de 30 días, se consumen 333,33 galones al día. Si el sistema trabaja de 5:00 am a 12:00 am, son 7 horas al día, el resultado es de 47,62 gal/hr con un precio para Centro Médico Militar de Q14,75/gal

$$\text{Ahorro de galones de bunker} = 47,62 \frac{\text{gal}}{\text{hora}} * \left(\frac{84,47\% - 80,17\%}{84,5\%} \right) * \frac{Q14,75}{\text{gal}} * 7 \text{hr}$$

$$\text{Ahorro de bunker al día} = Q 250,29$$

$$\text{Ahorro de bunker mensual} = Q 7 508,00$$

$$\text{Ahorro de bunker anual} = Q 90 104,80$$

A continuación, se presenta una serie de costos estimados para la mejora de la eficiencia energética a través del sistema de distribución de vapor, para las áreas analizadas.

Tabla XVI. **Costo de equipo y mejoras**

Descripción	Unidades	Precio unitario (Q.)	Precio Total (Q.)
Trampas de vapor	8	2 700, 00	21 600,00
Instalación de trampas de vapor	8	400, 00	3 200,00
Aislante	13,61 m	6 000, 00	6 000,00
Filtros de 2"	2	375,08	750,16
Total			31 550,16

Fuente: elaboración propia.

3.5.2. **Período de retronó de inversión**

El período de retorno de inversión es un índice importante para el inversionista que le interesa saber la cuantificación del tiempo que tomará el proyecto para alcanzar el equilibrio y tomar un punto de partida para comenzar a obtener ganancias.

Dado que a la división de Ingeniería del Centro Médico Militar se le asigna un presupuesto mensual para la adquisición del combustible, este será su ingreso mensual y el egreso, el pago por el combustible que debe adquirir para el funcionamiento del equipo. El ahorro es la fuente de ingreso que la división

tendrá a partir de la fecha de la implementación de las mejoras. El flujo de efectivo se puede representar de la siguiente forma

Si la inversión requerida es de Q31 550,16 y se obtiene un ahorro de energía de bunker de Q7 508,00 mensuales, significa que en cuatro meses se recuperará la inversión.

Esto se puede observar en la siguiente tabla de flujo de efectivo.

Tabla XVII. **Flujo de efectivo para un año calendario**

Num.	Ingresos	Inversión	Egresos	Flujo Neto
0		Q 31 550,16		- Q 31 550,16
1	Q 147 500,00	0	Q 139 999,10	Q 7 500,90
2	Q 147 500,00	0	Q 139 999,10	Q 7 500,90
3	Q 147 500,00	0	Q 139 999,10	Q 7 500,90
4	Q 147 500,00	0	Q 139 999,10	Q 7 500,90
5	Q 147 500,00	0	Q 139 999,10	Q 7 500,90
6	Q 147 500,00	0	Q 139 999,10	Q 7 500,90
7	Q 147 500,00	0	Q 139 999,10	Q 7 500,90
8	Q 147 500,00	0	Q 139 999,10	Q 7 500,90
9	Q 147 500,00	0	Q 139 999,10	Q 7 500,90
10	Q 147 500,00	0	Q 139 999,10	Q 7 500,90
11	Q 147 500,00	0	Q 139 999,10	Q 7 500,90
12	Q 147 500,00	0	Q 139 999,10	Q 7 500,90

Fuente: elaboración propia.

El flujo de efectivo representado corresponde a un año calendario para efectos de análisis en este estudio. En este caso, el Centro Médico Militar

contaría con el capital para realizar la inversión requerida, evitando tener algún tipo de préstamo con algún banco.

Esto significa que, para el cálculo de la TMAR (tasa mínima atractiva de rendimiento) correspondiente al proyecto, únicamente se tomaron en cuenta la tasa pasiva, tasa de inflación y tasa de ganancia. Debido a que no se cuenta con un préstamo, la tasa ponderada es igual que TMAR calculada.

Tabla XVIII. **Tasas promedio**

Inversión	Q 31 550,16
%Capital Propio	100%
%De préstamo	0%
Tasa pasiva (anual)	4%
Tasa de inflación (anual)	4%
Tasa de ganancia (anual)	20%
TMAR (Anual)	28%
TMAR (Mensual)	2,33%

Fuente: elaboración propia.

3.5.3. Valor presente neto

El valor presente neto en un proyecto representa el valor del dinero en el momento actual a través de un tiempo estudiado. Se trabaja mediante un flujo de caja que permite describir los ingresos y egresos, a lo largo de un tiempo

estipulado, para obtener una cuantificación de la diferencia entre los ingresos y egresos, para que el proyecto sea analizado adecuadamente.

Para el cálculo del valor presente neto se utilizaron los datos de las tablas XVII y XVIII.

Tabla XIX. **Valor presente neto**

Valor presente neto (VPN)	Q 46 174,55
---------------------------	--------------------

Fuente: elaboración propia.

Se obtuvo un valor de presente neto positivo, lo cual indica que el proyecto es factible. El valor es considerablemente alto por lo que se recomienda la ejecución de este proyecto.

3.5.4. Tasa interna de retorno (TIR)

La tasa interna de retorno, conocida como TIR, es una tasa porcentual en el cual, los beneficios y costos se hacen cero. Es decir, se encuentran en equilibrio. Lo que permitirá medir el nivel de rentabilidad que llegue a obtener el proyecto que se está analizando.

Se considera que entre más alta sea esta tasa, más rentable es el proyecto. Esta tasa se puede comparar con alguna otra tasa establecida arbitrariamente para esclarecer el nivel de rentabilidad.

Para calcular la TIR se utilizaron los valores de las tablas XVI, XVII y XVIII. A continuación se muestra el valor obtenido del cálculo de la tasa interna de retorno.

Tabla XX. **Tasa interna de retorno**

Tasa interna de retorno (TIR)	21%
-------------------------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar que el valor de la TIR es mayor que el valor de la tasa ponderada, por lo que se puede anticipar un buen rendimiento en la retribución de las ganancias del proyecto.

4. PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN

4.1. Procedimientos para mejora en la generación de vapor

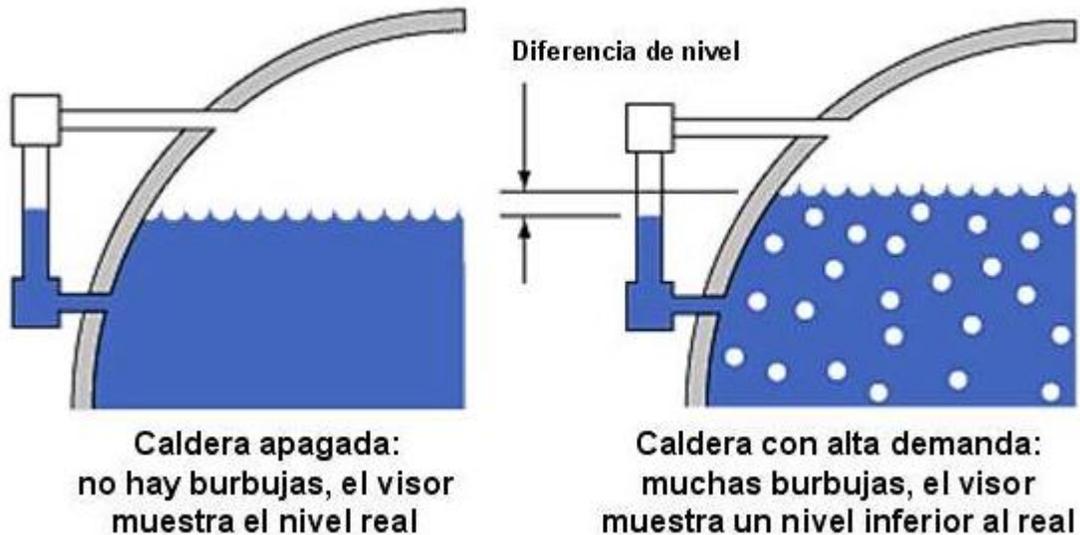
Después de implementar las mejoras en el sistema, es necesario ser congruentes con las acciones a tomar en cuanto al mejoramiento del sistema. Si no se corrigen los errores que se han cometido en el pasado, después de un tiempo, se volverán a tener los mismos problemas. Por eso, se requiere que los operarios y los jefes encargados del funcionamiento del sistema de generación y distribución de vapor tengan conocimiento de los conceptos de calidad y optimización de recursos.

4.1.1. Control de nivel de agua

El control del nivel de agua es un apartado que muchas veces no se toma en cuenta cuando se trata de una supervisión de eficiencia en la caldera. Sin embargo, es importante mencionar este aspecto ya que si bien, la caldera cuenta con controladores que de cierta forma regulan las mediciones de alimentación de la caldera, es determinante verificar que se encuentre bien calibrado, para evitar que exista un exceso de alimentación de agua hacia la caldera.

Sobre todo, porque en el sistema de generación y distribución de vapor del Centro Médico Militar, no se cuenta con un pretratamiento de agua, que suavice este recurso al entrar en contacto con el sistema. Por esta razón, un exceso de este suministro puede causar incrustaciones, y generar alta acumulación de sólidos en las purgas de fondo que se le realicen a la caldera.

Figura 32. **Diferencia de nivel de agua**



Fuente: Nivel de agua en caldera. <http://www.termodinamica.cl/profiles/blogs/elementos-para-eficiencia-de>. Consulta: agosto de 2016.

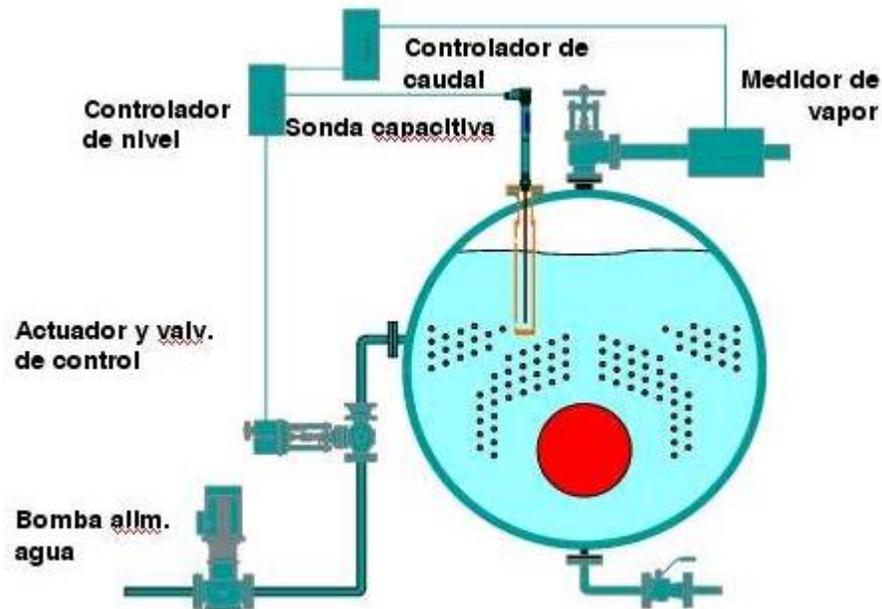
En la figura 32 se observa porqué una lectura de nivel es poco fiable cuando la caldera se encuentra en funcionamiento. En ese caso interfieren diversos aspectos que distorsionan las lecturas de los datos. Por ello, el sistema de controladores debe estar en buenas condiciones ya que si emite señales electrónicas se obtiene una mejor certeza de las mediciones del nivel de agua analizada.

Existen mecanismos para detectar cuándo la caldera está trabajando con un nivel de agua peligrosamente bajo para su funcionamiento. En este caso, emite una señal para el controlador que regula el suministro de combustible, y si el agua es muy escasa, corta el flujo para evitar daños en los tubos interiores por las altas temperaturas a las que serían sometidos.

Existen tres tipos de controladores de cortes de combustible por bajo nivel de agua:

- Flotador magnético: tiene un flotador tipo boya, hecho de material de hierro y se ubica en un extremo de una varilla. Este flotador se desliza a través de una cubierta no ferrosa. Debido a que trabaja con imán permanente, cuando los niveles de agua son normales, el flotador se encuentra por arriba y fuera del alcance del campo magnético. Cuando el nivel de agua decae, también lo hace el flotador, y cuando los niveles son muy bajos, el flotador llega al nivel del elemento magnético, el cual provoca que el imán bascule abriendo de esta forma el circuito del quemador.
- Tipo embielaje y flotador: este es un mecanismo de funcionamiento más simple, en el cual el flotador está conectado a través de un embielaje a una chapa que soporta un elemento basculante. Cuando el nivel del agua es normal, el flotador se encuentra en posición horizontal; si el nivel de agua desciende, también lo hace el flotador, pero como tiene el mecanismo conectado con ella, al mismo tiempo bascula el mecanismo de control del circuito de quemador.
- Electrodo sumergido: este método utiliza el agua propia de la caldera para cerrar el circuito del quemador. Se maneja por medio de flujos de corrientes, pues si el nivel de agua cae por debajo del electrodo, éste emite una señal eléctrica interrumpida que ocasiona que el quemador se cierre.

Figura 33. Sistema de control de agua



Fuente: Termodinámica. <http://www.termodinamica.cl/profiles/blogs/elementos-para-eficiencia-de>. Consulta: agosto de 2016.

Aquí se observa un sistema completo de control de nivel de agua. Incluye una bomba de alimentación de agua encargada del suministro de este recurso, el actuador y válvula de control de suministro, el controlador de nivel, controlador de caudal y finalmente el medidor de vapor producido.

4.1.2. Controles de purga

La purga es el procedimiento en el cual se lleva a cabo un control de la concentración de sólidos disueltos y de sólidos suspendidos dentro de la caldera. Utiliza el método de remoción del agua de la caldera para reemplazarla

con agua de alimentación, generalmente, tratada para que el índice de sólidas sea bajo.

Existen dos tipos de métodos de purga en una caldera. El primer método se trata de la purga de fondo. Se concentra en los sólidos disueltos que, debido a su densidad, se ubican en el fondo de la caldera. El vaciado mediante la apertura de una válvula permite que estos sólidos sean desechados hacia la tubería del desagüe.

El segundo método de purga, consiste en la purga de superficie o también llamada de tipo continua. Consiste en el vaciado de elementos sólidos que tienen una densidad menor que la del agua de la caldera, por ello, se mantienen en suspensión en el área superior de la caldera.

En el sistema del Centro Médico Militar, aplicando las pruebas de TDS (ver tabla II) se determinó que el porcentaje de purga correspondiente a la caldera analizada era de 25%. Este porcentaje de purga es bajo, por lo que junto al experto encargado de brindar los químicos para el tratamiento de agua, se les recomendó a los operarios encargados, realizar un máximo de 4 purgas de fondo a la semana, los días lunes, miércoles, viernes y sábado. El objetivo es disminuir la cantidad de sólidos disueltos, el cual era de 2 225 ppm. De esta manera se logra una reducción permisible para normalizar las purgas a 3 veces por semana.

Se debe de tener un número óptimo de purgas, según sea el comportamiento del sistema de generación de vapor. Pues si se llevan a cabo recurrentes purgas puede llegar a afectarse la eficiencia de la caldera, debido a que se deben de tomar en cuenta los químicos que se pierden en el agua que se va en el vaciado de sólidos. Esto generaría que la caldera admitiera más

agua proveniente del exterior (que no está pre tratada), que agua proveniente del tanque de retorno de condensado, que en este aspecto ya se trata de agua con ciertos porcentajes de químicos de tratamiento.

En la siguiente tabla se observan los límites admisibles de los sólidos disueltos determinados a partir del proceso de purga. Estos límites responden, expresamente, al nivel de presión de trabajo de la caldera.

Tabla XXI. Límites de sólidos en agua de calderas

Presión de salida de la cadera, psig	Sólidos totales, ppm	Alcalinidad (total), ppm	Sólidos suspendidos, ppm	Sílice, ppm
0-300	3 500	700	300	125
301-450	3 000	600	250	90
451-600	2 500	500	150	50
601-750	2 000	400	100	35
751-900	1 500	300	60	20
901-1 000	1 250	250	40	8
1 001-1 500	1 000	200	20	2,5

Fuente: Mejoramiento de la eficiencia de operación de calderas de vapor, Estación experimental de ingeniería del Instituto Tecnológico de Georgia. p. 24.

Para aumentar la eficiencia de purgas en la caldera del Centro Médico Militar, se recomienda recuperar la máxima cantidad de condensado en el sistema, ya que es agua tratada y facilita la optimización de recursos en los empleos de los químicos que se le proporcionan al sistema de generación de vapor. Un efecto inmediato del aumento de porcentaje de retorno de condensado, es que permitirá reducir el número de purgas realizadas a la caldera.

Otro aspecto que se debe tener en cuenta en la purga de la caldera es la energía térmica que se desperdicia a través del agua desechada. Dado que conserva calor que se desprende del sistema puede representar una cantidad significativa, si se abusa de la aplicación de purgas.

Una gran parte de la energía térmica que se pierde en el proceso de purga podría recuperarse mediante un proceso de extracción superficial del elemento que está siendo purgado. De manera que el vapor generado por el agua recuperada de la purga, podría representar un ahorro de combustible, que podría llegar a tener una injerencia en la eficiencia de la caldera en general, no así en la eficiencia de combustión.

4.1.3. Mantenimiento preventivo de caldera

Una de las mayores deficiencias que se pudieron detectar en el sistema de generación y distribución de vapor, corresponde al apartado de mantenimiento preventivo. No han establecido un sistema de prevención de los fallos que pudieran ocasionarse en el sistema.

Orientan sus acciones hacia una actitud “correctiva”, lo cual genera un mayor costo, debido a que, generalmente, cuando sucede una falla, no es posible repararla porque los accesorios son delicados y su función es tan específica que difícilmente puedan reemplazarse por algún otro accesorio de función similar. Dado lo anterior, recurren a la adquisición accesorios nuevos con un alto costo.

Carecen de un plan de mantenimiento y supervisión de tuberías de distribución de vapor. Esto se evidenció durante el proceso de auditoría energética. Se encontraron accesorios que no estaban funcionando con toda su

capacidad, poseían fugas, o bien, los operarios desconocían que no estaban funcionando correctamente.

Para contar con un mantenimiento enfocado hacia la eficiencia, es necesario establecer un sistema funcional de mantenimiento preventivo para identificar y predecir fallos en el sistema. De esta forma se evitarán efectos negativos trascendentales en la eficiencia de caldera. Se establecerán fichas de control de parámetros para que los operarios tengan una idea clara de los elementos que deben inspeccionar en su funcionamiento.

Fichas de lecturas específicas que se deben tomar en cuenta en el sistema de generación de vapor:

Tabla XXII. **Formato de datos generales para establecer producción de vapor**

Fecha:		Nombre	Código
Equipo			
Flujo de vapor (lb/h)		Observaciones	
Presión de vapor (psig)			
Temperatura del agua de alimentación (°F)			
Temperatura del vapor sobrecalentado (°F)			

Fuente: elaboración propia.

Estos datos pueden ser medidos semanalmente de manera que se tenga el control de los parámetros y su comportamiento para que se puedan detectar o predecir anomalías en el sistema.

Tabla XXIII. **Datos del sistema de fuego**

Fecha:		Nombre	Código
Equipo			
Régimen de flujo de combustible		Observaciones	
Presión de abastecimiento de combustible (psig)			
Presión en los quemadores (psig)			
Temperatura del combustible (°F)			
Presión diferencial del aire entre caja de ventilación y chogar (psig)			

Fuente: elaboración propia.

Los datos en la tabla XXII son importantes para controlar el proceso de suministro del combustible en la combustión del sistema. Estos parámetros permitirán identificar nivel de funcionamiento de bombas y pre calentadores de combustible. Con ellos se determinará el tiempo necesario para su bombeo eficiente y el suministro de caudal de bunker en relación al suministro de aire en el hogar.

Tabla XXIV. **Control de emisiones de caldera**

Fecha:		Nombre	Código
Equipo			
Gas de salida de caldera		Observaciones	
Gas de salida del calentador de aire			
Temperatura del gas de salida (°F)			
Medición de CO (%)			
Apariencia del humo de chimenea			
Apariencia de la llama			

Fuente: elaboración propia.

De esta manera el operario podría apoyarse en sus fichas de información para determinar qué acción tomar. Por ejemplo, si se hallaran altos índices de gas O₂ en la chimenea, el operario sabría que tendría que inspeccionar la presión en el suministro de combustible.

Otros de los aspectos básicos los que se les debe aplicar control preventivo en el sistema de generación de vapor son los elementos del sistema que se encuentran en los alrededores del cuarto de calderas, como los que se presentan a continuación:

Tabla XXV. **Condiciones anormales**

Fecha:		Nombre	Código
Equipo			
Fugas de vapor		Observaciones	
Vibraciones o ruidos anormales			
Equipos que no funcionan			
Exceso de agua de restitución			

Fuente: elaboración propia.

Si surgen dificultades para obtener las condiciones de cargas, se debe disminuir el énfasis en el registro de los datos con enfoque al mantenimiento de eficiencia, para reorientar los procedimientos hacia el mantenimiento preventivo.

Una vez se alcance la estabilidad del funcionamiento y los parámetros deseados, se deben retomar las acciones enfocadas al mantenimiento de eficiencia.

4.2. Procedimientos para mejora de distribución de vapor

Habiendo establecido las acciones preventivas correspondientes a la generación, es momento de brindarle el enfoque que requiere el otro aspecto importante: la distribución.

4.2.1. Tubería principal

Se deben establecer rutinas de revisión de tuberías y accesorios, para estudiar el estado de los aislantes que contienen las tuberías de distribución, así como las fugas existentes en el sistema.

Durante la auditoría energética se pudieron identificar 4 fugas importantes de vapor y 3 fugas de condensado. Estos aspectos tienen un efecto directo en la medición de la eficiencia, pues la caldera se obliga a trabajar más de lo necesario para reponer las cantidades de calor pérdidas, generando un mayor consumo de búnker.

Durante el chequeo de tuberías de distribución, se determinó que existe tubería de conducción de vapor que ya no es utilizada debido a la discontinuación de los equipos que la requerían. En esa área se identificaron accesorios en buen estado por lo que se recomendó su desinstalación y limpieza para distribuirlos a través de la tubería que sí es funcional, de manera que se pudieran ahorrar costos de adquisición o reparación de accesorios.

Figura 34. **Junta telescópica sin utilizar**



Fuente: Centro Médico Militar, zona 16, Guatemala.

Durante la inspección y la auditoría energética a través de la tubería de distribución principal, también se encontró aislante en malas condiciones. Esto genera que se pierda calor durante el tiempo de trabajo de suministro de vapor.

Estimado el costo de metro de aislante en el presupuesto, se recomendó el cambio de este material en la tubería que corresponde a la distribución de lavandería, ya que poseía el nivel de aislante más dañado.

De la misma forma y en un orden prioritario, se recomendó el cambio del material aislante perteneciente a la estación reductora de presión del sistema de generación de vapor. Esto además de brindarle una mejor eficiencia, proporcionará un ambiente más seguro de trabajo para los operarios, debido que al ser parte del sistema de generación, esta se encuentra en el cuarto de calderas, ubicada en frente de la caldera de trabajo.

Figura 35. **Aislante en mal estado**



Fuente: Centro Médico Militar, zona 16, Guatemala.

Acciones recomendadas para el aumento de conservación de energía en el sistema de distribución.

Tabla XXVI. **Acciones de conservación de energía**

Longitud de la tubería	Evaluar la posibilidad de la reducción de la longitud en función de una redistribución adecuada de los elementos que requieren el vapor, con el objetivo de obtener una reducción de pérdidas de calor, así como reducción de caídas de presión ocasionadas por la fricción con los accesorios distribuidos en la línea de vapor.
-------------------------------	---

Continuación de tabla XXVI.

<p>Tubería subterránea</p>	<p>En el caso de la tubería de distribución hacia las áreas de lavandería y cocina, debido a que se encuentran de manera subterránea, se recomienda una supervisión más estricta enfocada en la preservación y aumento de vida del material aislante, pues al presentarse fugas de vapor y de condensado, se generan condiciones ambientales muy adversas que contribuyen a un deterioro más avanzado que el tiempo normal de vida del material.</p>
<p>Evaluaciones de equipo que utiliza vapor</p>	<p>Revisar y verificar los requerimientos del suministro de vapor en el sistema de distribución, para evaluar la posible disminución de vapor de manera que existan procedimientos estandarizados en las áreas que requieren de este recurso.</p>
	<p>Medir la temperatura perteneciente a los tanques calentados por medio del suministro de vapor, de manera que no exista un exceso de temperatura necesaria, y lograr de esta manera, una optimización del uso del vapor, para su suministro a otras líneas de vapor conducidas hacia las áreas que así lo requieran.</p>
	<p>Evaluar la posibilidad de la instalación de mecanismos que ayuden en la mejora de eficiencia de generación de vapor, tales como precalentadores de aire, de forma que se obtenga un mayor aprovechamiento del calor y un menor consumo de búnker en el momento de combustión. Esto permitiría una dotación de vapor uniforme hacia la línea principal de distribución.</p>

Fuente: elaboración propia.

4.2.2. Retorno de condensado

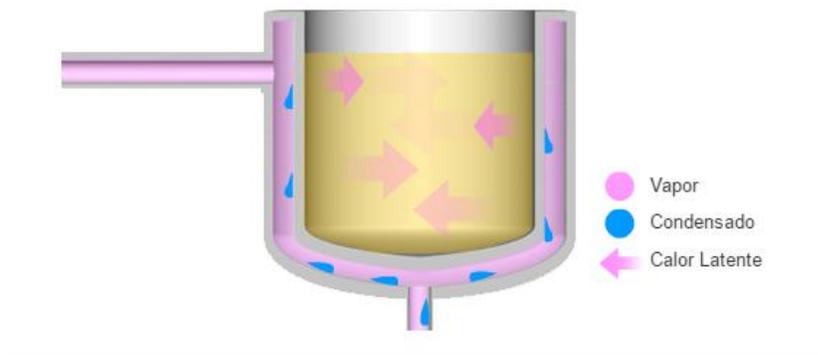
El retorno de condensado es un procedimiento fundamental en el sistema de vapor, pues su recuperación permite optimizar los recursos, tanto de los químicos de tratamiento, como de la recuperación de calor del sistema. El

condensado obtenido por medio de las trampas de vapor, retorna hacia un tanque alimentador, llamado tanque de retorno de condensado, el cual se encarga de bombear este condensado de vuelta hacia la caldera para que ésta pueda tener una mejor eficiencia en el proceso.

Según los datos obtenidos en el procedimiento de revisión de condensado, se estimó que, en el sistema, el porcentaje de retorno de condensado es de 25%.

Este porcentaje, es un tanto bajo, lo que ocasiona que la caldera deba de consumir mayor cantidad de búnker para el calentamiento del agua, pues esto significa que el 75% restante, está constituido por agua del exterior.

Figura 36. **Funcionamiento de tanque de retorno de condensado**



Fuente: Condensado. <http://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/introduction-to-condensate-recovery.html>. Consulta: septiembre de 2016.

A continuación se calcula el ahorro que se generaría si se pudiera obtener un retorno de condensado de 80% con respecto a la situación actual.

Se genera vapor a 125 psig, para utilizarlo en equipos que calentamiento de marmitas a 20 psig. El retorno de condensado actual es de 25% a una temperatura de 200°F. El resto del 75% de agua de alimentación entra a temperatura ambiente de 75.2°F, la caldera produce 1 926,43 lb de vapor/hora, durante 2 520 h/año de operación.

Se calcula la cantidad proporcionada por el tanque de retorno de condensado y el agua de alimentación.

$$\text{Energía de retorno y agua de alimentación} = 0,25 (200-32) \text{ Btu/lb} + 0,75 (75,2-32) \text{ Btu/lb} = 74,4 \text{ Btu/lb}$$

La entalpía del vapor a 139 psia (125psig) es de 1 193,73 Btu/lb, por lo tanto:

$$\text{Costo de generación} = (1 193,73-74,4) \text{ Btu/lb} * 1 926,43 \text{ lb vapor/hora} * 2 520 \text{ h/año} * 14,75 \text{ Q/galón} * 1 \text{ galón Bunker/} 150 000 \text{ Btu}$$

$$\text{Costo de generación de vapor} = \text{Q } 534 333,84/\text{año}$$

El ahorro debido a la alta temperatura del condensado, siendo un 80% de retorno de condensado es:

$$\text{Energía de retorno y agua de alimentación} = 0,8 (200-32) \text{ Btu/lb} + 0,2 (75,2 - 32) \text{ Btu/lb} = 143,04 \text{ Btu/lb}$$

$$\text{Nuevo costo de generación} = (1 193,73-143,04) \text{ Btu/lb} * 1 926,43 \text{ lb vapor/hora} * 2 520 \text{ h/año} * 14,75 \text{ Q/galón} * 1 \text{ galón Bunker/} 150 000 \text{ Btu}$$

Nuevo costo de generación de vapor = Q 501 567,2/año

Ahorro anual = Q 543 333,84 – Q 501 567,2 = Q 41 766,64

Tenemos un ahorro anual de Q 41 766,64 que representa el 7.81% del costo original.

4.2.3. Distribución adecuada de accesorios a través de la tubería

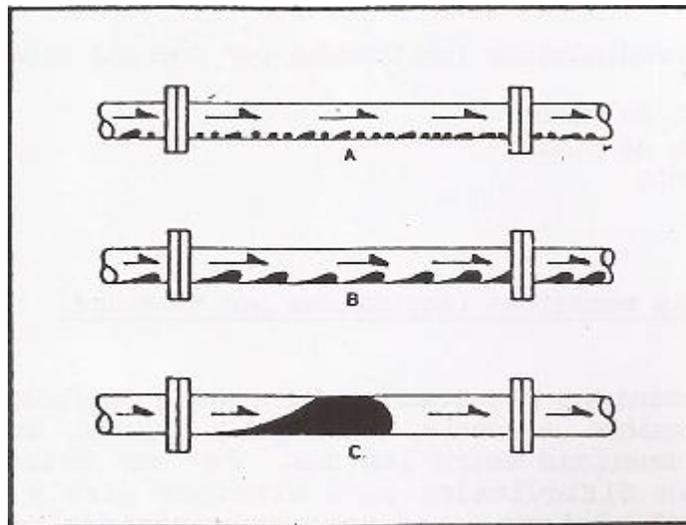
Los accesorios se encuentran distribuidos de forma uniforme a través de la tubería principal de conducción de vapor. Se verificaron las distancias a las cuales las trampas de vapor se encontraban ubicadas. Generalmente, puestas en una estación reductora de presión, esta distribución no depende del diámetro de la tubería que se está empleando, sino de la presión inicial de trabajo y la presión reducida a la que se quiere llegar.

Una trampa de vapor se puede explicar como un mecanismo automático encargado de permitir el paso del condensado que es generado por las caídas de presión y pérdidas de calor a través del sistema. También funcionan para la remoción de aire o gases no deseados dentro de la distribución de vapor.

Si no se tiene un sistema eficiente de descarga del condensado, la acumulación de este, sumado con las altas velocidades de flujo, provocará golpes de alto impacto en las tuberías produciendo ruido muy alto, así como debilitación de anclajes que soporten las tuberías.

Además, los golpes de ariete representan un riesgo, debido a que si se sufre un golpe a una muy alta velocidad, puede desprenderse la tubería y ocasionar alguna lesión a las personas que se encuentren alrededor.

Figura 37. **Acumulación de golpe de ariete**



Fuente: *Ahorro de energía en sistema de vapor, Instituto Centroamericano de investigación y tecnología industrial. p.117.*

Existen 3 tipos de trampas de vapor, de los cuales se desprenden diversos diseños para distintas aplicaciones y cargas de trabajo. Entre los tipos de trampas de vapor están:

- Trampas mecánicas: estas trampas de vapor son accionadas mediante la densidad del elemento que se requiera retener. Por lo general, son de dimensiones grandes y pueden soportar cargas altas, aunque su nivel de rapidez es menor que los otros 2 tipos de

trampas. Entre estas se encuentran: trampas de flotador y termostato, y trampas de cubeta invertida.

Una de las ventajas de este tipo de trampas es que pueden accionarse a los cambios de nivel sometidos, sin depender de la temperatura o presión del condensado.

Figura 38. **Trampa de vapor mecánica**



Fuente: Trampas de vapor. <http://www.tlv.com/global/LA/products/080100.html>.

Consulta: septiembre de 2016.

- Trampas termostáticas: estos mecanismos son accionados mediante la temperatura del elemento de trabajo. Tienen un nivel de respuesta más rápida que las trampas mecánicas, y son recomendables para cargas medias y de trabajo intermitente. Dentro de este grupo podemos encontrar: Trampas de tipo bimetálicas, trampa de fuelle y finalmente, trampa de expansión.

Las trampas que funcionan mediante elementos bimetálicos se caracterizan por ser altamente resistentes a la pérdida de calor, al efecto de golpe de ariete y al exceso de calor en el sistema de

trabajo. A pesar de tener un nivel de respuesta más rápida que las trampas mecánicas, éstas responden a un nivel más tardado que las termodinámicas, cuando se refiere a condiciones cambiantes. Se puede aislar la trampa para mejorar este tiempo de respuesta, pero se deben de tener las consideraciones de diseño necesarias para evitar sorpresas en el funcionamiento del sistema de vapor.

Figura 39. **Trampa de vapor termostática**



Fuente: Trampas de vapor. <http://www.tlv.com/global/LA/products/080300.html>.

Consulta: septiembre de 2016.

- Trampas termodinámicas: Son las más empleadas en las industrias que trabajan cargas de vapor media-alta. Se caracterizan, principalmente, porque se accionan mediante la energía cinética. Por eso, son altamente efectivas, aunque requieren de un buen régimen de mantenimiento para evitar disfuncionalidades en el sistema, ya que su nivel de accionamiento es más severo que los 2 tipos descritos anteriormente. Entre este grupo de trampas se puede encontrar los siguientes diseños: trampas de disco, trampa de pistón y trampas de orificio.

Este tipo de trampas de vapor se caracterizan por ser detectoras de fase. Es decir, pueden diferenciar entre líquido y gas, pero no diferencia tipo de gas.

Figura 40. **Trampa de vapor termodinámica**



Fuente: Trampas de vapor. <http://www.tlv.com/global/LA/products/080200.html>.

Consulta: septiembre de 2016.

4.3. Medidas de mitigación de reducción de impacto ambiental

El mejoramiento de la conservación del medio ambiente se refleja en la conservación de recursos, ya que, para el funcionamiento eficiente de una línea de generación de vapor, correspondiente a la alimentación de la caldera se utiliza el recurso hídrico proveniente del exterior, además del agua expulsada hacia el ambiente en los procesos de purga. Si se cuenta con un sistema eficiente de tratamiento de agua, el desecho de agua no provocará contaminación en las cuencas o ríos donde se vierta.

Las emisiones de gases que produce el proceso de combustión, también debe ser amigable con el medio ambiente a medida que se logre alcanzar el equilibrio térmico deseable en la cámara de combustión. Asimismo, uso del combustible para generar el calor necesario debe adaptarse a las normas medioambientales.

4.3.1. Consumo de bunker

Entre los combustibles aceites empleados para el funcionamiento de calderas, se encuentran el aceite bunker No.5 y No.6. El tipo de bunker utilizado en el Centro Médico Militar, corresponde al No.6. Esto significa que se utiliza un combustible muy pesado, que reviste mayor relevancia de manejo de sus características físicas y químicas, para el suministro hacia la caldera.

A continuación, se presenta una tabla con las características de los aceites más utilizados en esta industria.

Tabla XXVII. **Características de aceites combustibles**

Grado	Punto de inflamabilidad °F	Punto de escurrimiento °F	Gravedad Grados API	Densidad lb/gal	Viscosidad (Sabolt Univ)	Contenido promedio de azufre %	Poder calorífico Btu/galón
No.1	100	0	38 – 45	6.95 – 6.68	28 – 33	0.081	137 000 – 132 900
No.2	100	15	30 – 38	7.30 – 6.96	33 – 38	0.25	141 800 – 137 000
No.3	130	20	20 – 28	7.79 – 7.40	45 – 125	0.87	148 100 – 143 100
No.4	130	45	17 – 22	7.94 – 7.69	150 – 300	1.35	150 000 – 146 800
No.5	130	50	14 – 18	8.08 – 7.89	350 – 750	1.52	152 000 – 149 400
No.6	150	75	8 -15	8.45 – 8.05	900 – 9000	1.6	155 900 – 151 300

Fuente: elaboración propia.

Se debe de llevar a cabo un proceso de pre calentado de combustible para que la viscosidad adquiera un índice menor y su bombeo sea fluido a través de las líneas de suministros.

Además, de esta manera la vida útil de las bombas se prolonga, ya que realizan un trabajo para las capacidades a las que fueron diseñadas.

Figura 41. **Relación viscosidad de combustible y temperatura**

Original	Después del calentamiento a la temperatura dada								
	100° F	120° F	140° F	160° F	180° F	200° F	220° F	240° F	260° F
100	74	60	52	46	42	40	38	36	35
200	130	90	68	57	49	45	41	39	36
300	170	110	78	62	52	46	42	40	37
400	230	140	98	74	60	52	47	43	40
500	290	180	120	87	69	58	51	46	43
600	340	215	140	100	78	64	56	49	45
700	400	240	160	120	82	67	57	50	46
800	440	265	170	125	88	70	58	47	43
900	480	290	180	130	90	72	60	53	47
1000	540	300	190	140	92	76	64	55	48
1500	750	420	250	160	110	82	67	57	51
2000	1020	575	350	220	150	110	85	70	60
2500	1248	680	390	260	165	117	89	72	61
3000	1400	750	415	285	175	122	92	74	62
3500	1640	850	475	300	187	128	95	76	63
4000	1800	900	500	315	190	132	98	77	64
4500	2040	1020	565	330	208	142	104	80	66
5000	2200	1100	600	350	220	150	108	83	68
6000	2600	1250	657	380	240	160	115	88	71
7000	2900	1400	750	420	260	175	125	93	74
8000	3200	1550	820	460	280	185	138	97	77
9000	3600	1700	875	500	296	195	145	102	79
10,000	4000	1900	950	555	312	210	150	106	82

Fuente: *Mejoramiento de la eficiencia de operación de calderas de vapor, Estación experimental de ingeniería del Instituto Tecnológico de Georgia.* p. 111.

En la figura 41 se puede observar el rango de los valores que la viscosidad adquiere según vaya cambiando la temperatura.

Actualmente, se consume un promedio de 10 000 galones de bunker mensuales a una eficiencia de 80,17%. Si se logra alcanzar la eficiencia de 84,47% se podría obtener un ahorro de combustible:

$$\text{Ahorro de combustible} = 10\,000 * \left(\frac{88,87\% - 80,17\%}{84,87} \right) 553,78 \text{ gal/mensual.}$$

4.3.2. Pretratamiento de agua

En este apartado se debe establecer la diferencia entre tratamiento de agua y pretratamiento de agua a la caldera de trabajo. El pretratamiento de agua le suministra suavizadores al agua que está ingresando del exterior, mientras que en el tratamiento se le aplican, al agua de alimentación, los químicos necesarios para el secuestro de oxígeno y dureza.

El objetivo es prevenir la corrosión que ocasionan el sílice-magnesio, oxígeno y diversos minerales que se encuentran en el agua proveniente del exterior. La corrosión es uno de los efectos más fuertes que sufren los tubos interiores de la caldera. Cuando un tubo sufre de este tipo de daño, es imposible reconstruirlo, y debe reemplazarse por uno nuevo. Este proceso conlleva de mucho trabajo y la caldera tendría que estar sin producir calor y generando costos altos mientras se instalan nuevos tubos.

No se recomienda cortar las partes dañadas y reemplazarlas con la soldadura de pedazos de tubos sin corrosión porque las condiciones a las que se someten los tubos internos, pueden ocasionar fallas y generar gastos aún mayores.

Figura 42. **Tubería afectada por la corrosión**



Fuente: <http://norese.com/publicaciones/Tratamiento%20Agua%20Calderas.pdf>.

Consulta: septiembre de 2016.

En la figura 42, se observa claramente el nivel de daño que genera la corrosión en las tuberías internas. Esta corrosión fue generada por las partículas de oxígeno presentes en el agua de alimentación de la caldera.

Se recomienda que el agua de alimentación se someta a pre tratamiento para evitar las grandes acumulaciones de partículas de oxígeno, magnesio, y otros minerales no deseados.

Figura 43. **Tubería incrustada**



Fuente: <http://norese.com/publicaciones/Tratamiento%20Agua%20Calderas.pdf>.

Consulta: septiembre de 2016.

El Centro Médico Militar posee un sistema de pretratamiento en des uso. Por esta razón, el impacto sobre la caldera es muy fuerte y se deben realizar una gran cantidad de purgas para evacuar los sólidos disueltos que se formen. Además, los tubos internos de la caldera deben recibir mantenimiento para combatir las incrustaciones que provocan los minerales que no han sido suavizados.

Tabla XXVIII. **Químicos utilizados en tratamiento de agua**

Nombre de Químico	Componente	Función
BS10	Sulfito	Secuestro de partículas de oxígeno

Continuación de tabla XXVIII.

AS16	Dispersante	Ayuda para el proceso de desincrustación
AP13	Aditivo	Reducir alcalinidad

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presentan los requerimientos básicos de los niveles de químicos y alcalinidad que debe poseer el agua de alimentación de caldera para obtener un manejo eficiente de su aprovechamiento en el tanque de retorno de condensado.

Tabla XXIX. Requerimientos de agua de caldera

PARÁMETRO	VALOR RECOMENDADO
pH a 25 °C	10.5 - 11.8
Alcalinidad Total CaCO ₃	< 700 ppm
Alcalinidad Cáustica	> 350 ppm
Secuestrantes de Oxígeno:	
□ Sulfito de Sodio	30 – 70 ppm
□ Hidrazina	0.1 – 10 ppm
□ Taninos	120 – 180 ppm
□ Dietilhidroxilamina	0.1 – 1.0 ppm (en agua alimentación)
Fosfato Na ₃ PO ₄	30 - 60 mg/l
Hierro	< 3.0 ppm
Sílice	150 ppm
Sólidos disueltos	< 3500 ppm
Sólidos en suspensión	< 200 ppm
Conductividad	< 7000 uS/cm
Condición general	Incoloro, claro y libre de agentes insolubles.

Fuente: Caldera. <http://norese.com/publicaciones/Tratamiento%20Agua%20Calderas.pdf>.

Consulta: septiembre de 2016.

Es importante la aplicación del pre tratamiento al agua con la que se alimenta la caldera para evitar una deficiencia significativa en el uso de insumos, y un alto porcentaje de energía que se deba producir.

Se sugiere que una parte del presupuesto generado por los ahorros que se obtengan en el aumento de la eficiencia, se invierta en la reactivación del sistema de pretratamiento, para obtener réditos positivos a largo plazo. Entre los beneficios está la prolongación de la vida útil de las calderas. De esta forma se evitará incurrir en gastos elevados en la compra de calderas nuevas, dado el presupuesto asignado a la División de Ingeniería.

Figura 44. **Tubería de distribución de agua suavizada**



Fuente: Centro Médico Militar, zona 16, Ciudad de Guatemala.

La evaluación de la tubería que transportaría el agua suavizada denota que se encuentra en buenas condiciones. Esto es importante ya que el

presupuesto para la implementación de los suavizadores sería menor que si se tuviera que incluir en el proyecto.

Figura 45. **Sistema de control de suavizadores**



Fuente: Centro Médico Militar, zona 16, Guatemala.

Con las acciones anteriores, la caldera rendirá mejor, se reducirá el grosor de las capas de incrustación en la tubería y la transferencia de calor será más eficiente de los tubos internos hacia el agua de la caldera. Todo ello, también dará como resultado mayor rendimiento de bunker y una minimización de costos en combustible.

4.3.3. Precalentamiento de aire

El precalentamiento de aire es un método de mejora de eficiencia utilizado para que el aire penetre la cámara de combustión con una temperatura alta y así sea posible una atomización más efectiva cuando tenga contacto con las partículas del combustible.

Actualmente, el sistema no cuenta con este tipo de mecanismo, por lo que su implementación tendría un impacto directo en el nivel de eficiencia de combustión.

El exceso de aire que deba brindarse a la cámara de combustión, debe ser tal, que la temperatura de los gases de emisión serían bajos. Esto indicaría una eficiente atomización de las partículas de combustible, ya que no se estaría utilizando energía extra para el calentamiento de los gases de combustión.

Es decir que, el precalentamiento de aire proporciona un acercamiento importante en el proceso de combustión. Sin embargo, su implementación debe ir de la mano con un plan de mantenimiento que le permita brindar la temperatura necesaria al aire del compresor. El costo de implementación de este método, se refleja en el ahorro de aceite utilizado para la atomización requerida en el sistema.

Un método de precalentamiento de aire puede consistir en la implementación de un intercambiador de calor instalado en la salida de la chimenea para calentar el aire que se suministre.

Pueden emplearse pre calentadores de aire regenerativos y no regenerativos. Generalmente, en la industria de calderas se utilizan los pre

5. SEGUIMIENTO Y MEJORA CONTINUA

5.1. Mediciones

Una vez establecido el sistema y se apliquen las nuevas acciones, se tendrán que poner en práctica nuevos procedimientos de mediciones que sirvan como indicadores para determinar nuevos niveles de trabajo.

Es importante, establecer los parámetros necesarios para evitar cometer los errores del pasado y no caer de nuevo en el problema de la deficiencia que neutralice cada intento de mejora que requiera realizar al sistema.

5.1.1. Controles de contaminantes en emisiones

Los gases de escape contienen una gran variedad de subproductos a causa de los químicos, minerales, componentes químicos del combustible y gases que puedan irse añadiendo en el proceso de generación y distribución de vapor. Se considera que algunos de estos gases contaminan el medio ambiente, por lo que su control es determinante para la responsabilidad social de la reducción del impacto social.

Seis tipos de contaminantes son los que generan mayor problema en los gases de emisión: partículas del material, oxidantes, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, hidrocarburos, monóxido de carbono.

A continuación, se presentan niveles aceptables de partículas en la emisión de gases de combustión de la chimenea.

Tabla XXX. **Niveles recomendables de emisión de gases**

	Nitrógeno	CO ₂	SO ₂	Agua	Oxígeno
Aire estequiométrico/base seca	83,6	16,1	0,20	0	0
Aire estequiométrico/base húmeda	74,7	14,4	0,18	10,7	0
25% exceso aire/base seca	82,8	12,7	0,15	0	4,4
25% exceso aire/base húmeda	75,6	11,6	0,14	8,7	4

Fuente: Gases de combustión. <http://www.tiemporeal.es/archivos/optimizacioncombustion.pdf>

Consulta: septiembre de 2016.

5.1.2. **Control de presión de trabajo**

No es posible trabajar la caldera a una presión igual a la presión de trabajo de los equipos. Es inevitable que en el proceso de distribución existan caídas de presión debido a la fricción de los accesorios. Por ello, es necesario trabajar la caldera a una presión mayor de manera que sea la presión requerida, al llegar a los equipos de trabajo.

La reducción de la presión de trabajo, una vez alcanzado el nivel de eficiencia requerido, es una alternativa viable para la optimización de insumos, pues las pérdidas que se obtienen de caídas de presión a través de la tubería de distribución, se reducen considerablemente permitiendo un mejor flujo de presión hacia los equipos que lo requieran. El ahorro puede estar entre el 1% y el 2% del costo de combustible.

Otros beneficios que se obtiene del funcionamiento de una caldera a presiones reducidas, es la menor pérdida de calor por radiación, menor fuga en las bridas y los empaques, entre otros.

Siempre debe controlarse que el nivel de presión producida sea el óptimo para el funcionamiento de los equipos. El equipo que necesite mayor presión de trabajo es el que regirá el valor de presión de trabajo de la caldera. Se recomienda no reducir la presión a más de 20% de la original.

5.1.3. Insumos

El control en los insumos concierne a la temperatura del agua de alimentación, la temperatura del aire de combustión, las consideraciones de la optimización del bunker se tomaron en cuenta en el apartado de mitigación de reducción de impacto ambiental.

La eficiencia de la caldera aumenta con la elevación de la temperatura del agua de alimentación. Generalmente, se instalan precalentadores no regenerativos, que transfieren el calor de los gases de emisión hacia el agua que está siendo suministrada a la caldera.

Una vez instalado el precalentador de aire, se conserva el aumento de eficiencia de la combustión.

Los aumentos son cercanos al 2% por cada 100°F de incremento en el aire previo proceso de combustión.

5.2. Mejora continua

La mejora continua es un procedimiento que ánima al operario y a los jefes encargados para no conformarse y buscar siempre maneras de innovar y optimizar el sistema. Los siguientes parámetros pueden servir de guía para la

consecución de los objetivos planteados en la conservación y mejoramiento de la eficiencia del sistema.

5.2.1. Evaluación de parámetros óptimos

La evaluación de parámetros involucrará aspectos técnicos y operacionales dentro de la generación y distribución de vapor. Estos procedimientos establecidos deben adoptarlos los operarios para predecir fallas y proponer mejoras. De esta manera serán partícipes del proceso. En la actualidad, el régimen militar impide una participación más activa y el empoderamiento de los calderistas.

Tales procedimientos comprenderán aspectos como:

- Presión de vapor
- Temperatura de vapor
- Nivel de agua
- Presión de agua de alimentación
- Tiro del horno
- Procedimientos y estandarización

Los procedimientos y la estandarización son muy importantes para que los operarios cuenten con la guía para realizar acciones concretas. Esto ayudará a que los procedimientos se lleven a cabo sin enfrentar la excesiva burocracia por la que debe pasar una orden. Además, los intervalos con la consecuente eficiencia del sistema y la actitud proactiva de los operarios.

5.2.1.1. Inspecciones periódicas a caldera de trabajo

Se recomiendan que los operarios desarrollen las siguientes acciones para conservar la mejora en el sistema de generación y distribución de vapor.

- Realizar un programa de limpieza con mayor frecuencia cuando los rendimientos correspondientes al intercambiador de calor sufran de una disminución, debido a la quema de combustible en mal estado.
- Realizar un análisis de oxígeno en los gases de emisión que permitan compararse con registradores gráficos, para establecer parámetros de trabajo.
- Mantener los niveles congruentes de exceso de aire, para evitar el sobrecalentamiento de los gases de combustión.
- Establecer un plan de procedimientos de limpieza basado en la experiencia, el tiempo óptimo de limpieza y el reemplazo de accesorios a través de la tubería principal de distribución.
- Procurar examinar semanalmente la realización de la operación correspondiente al ventilador para ejecutar los ajustes que sean requeridos para la obtención del nivel de exceso de aire óptimo.

Así también, se especifican acciones preventivas en el intervalo de tiempo necesario para la conservación del equipo en buenas condiciones.

Tabla XXXI. **Conjunto de quemador**

FUNCIÓN	Período de revisión				
	Semanal	Mensual	Trimestral	Semestral	Anual
Chequeo de funcionamiento					
Revisión de boquillas					
Limpieza del cuerpo del quemador					
Electrodos de ignición					
Aisladores de electrodos de ignición					
Cables de ignición					
Combustión					

Fuente: División de Ingeniería y Mantenimiento, Departamento de Planeación.

Tabla XXXII. **Control de nivel de agua**

FUNCIÓN	Período de revisión				
	Semanal	Mensual	Trimestral	Semestral	Anual
Tubo de nivel					
Niveles de operación					
Limpieza de flotador					
Diafragma de flotador					
Válvulas de purga de nivel					

Fuente: División de Ingeniería y Mantenimiento, Departamento de Planeación.

Tabla XXXIII. **Bomba y tubería de alimentación de agua**

FUNCIÓN	Período de revisión				
	Semanal	Mensual	Trimestral	Semestral	Anual
Temperatura de cojinetes					
Lubricación de cojinetes					
Alineación de motor y bomba					
Revisión de impulsor					
Accesorios de tubería					

Fuente: División de Ingeniería y Mantenimiento, Departamento de Planeación.

Tabla XXXIV. **Cuerpo de caldera**

FUNCIÓN	Período de revisión				
	Semanal	Mensual	Trimestral	Semestral	Anual
Limpieza del lado de agua					
Conexiones y tubería					
Limpieza del lado de fuego					
Fugas en los tubos					
Revisión de material refractario					
Cambio de empaques					
Revisión de pernos y puertas					
Fugas de agua, vapor, gases de combustión					

Fuente: División de Ingeniería y Mantenimiento, Departamento de Planeación.

Tabla XXXV. **Sistema de combustible**

FUNCIÓN	Período de revisión				
	Semanal	Mensual	Trimestral	Semestral	Anual
Revisión de línea de alimentación					
Filtro de línea de alimentación					
Filtro de la bomba del quemador					
Fajas de transmisión					
Revisión de bomba de recirculación de combustible					

Fuente: División de Ingeniería y Mantenimiento, Departamento de Planeación.

Tabla XXXVI. **Tanque de condensado**

FUNCIÓN	Período de revisión				
	Semanal	Mensual	Trimestral	Semestral	Anual
Limpieza de tubería de ventilación					
Válvula de flotador					
Filtro de la descarga a la bomba de alimentación					
Limpieza de tanque					

Fuente: División de Ingeniería y Mantenimiento, Departamento de Planeación.

El jefe de mantenimiento debe fomentar en los operarios el hábito del cumplimiento de las acciones preventivas dentro de estos procedimientos establecidos.

5.2.1.2. Nivel óptimo de dureza del agua

El nivel óptimo de dureza del agua, una vez instalado el equipo de pre tratamiento, se interpretará a medida que exista una reducción de la capa de incrustación.

Los niveles de óptimos de dureza dependerán de la composición química con la que el agua del exterior sea suministrada a la caldera. Entre mayor alcalinidad posea el agua cruda, mayor será la necesidad de un químico que contrarreste los efectos corrosivos.

En la tabla XXXVII se observan los niveles óptimos en las que el agua debe trabajar en el sistema.

Tabla XXXVII. **Índices de dureza del agua**

<i>Denominación</i>	ppm de CaCO₃
Muy suaves	0-15
Suaves	16-75
Medias	76-150
Duras	150-300
Muy duras	Mayor a 300

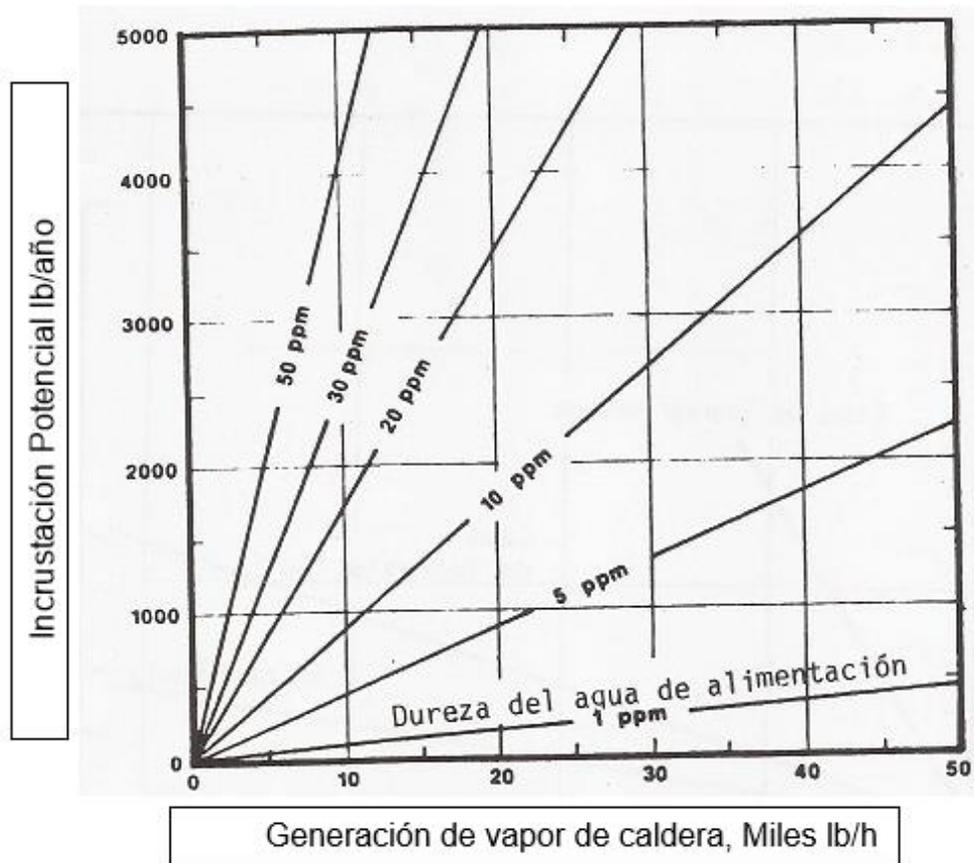
Fuente: Índices. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documento_s/leip/valenzuela_m_td/capitulo3.pdf. Consulta: septiembre de 2016.

Cualquier incrustación que se provoque en la caldera es indeseable porque no cumple función productiva alguna en el proceso de generación de vapor. El grosor de una incrustación crea una barrera que dificulta la transferencia de calor hacia el elemento de trabajo. Además, incrementa los costos de mantenimiento y de reparación.

Tomando en cuenta las consideraciones técnicas del manual operativo de la caldera Cleaver Brooks, se procede a estimar la incrustación potencial según los niveles de trabajo de la caldera.

A continuación, se presenta una gráfica que permite relacionar el nivel de incrustación potencial versus la generación del vapor en la caldera. Cuando se aplique el mantenimiento a los tubos internos, se debe medir el grosor de la capa de incrustación y comparar su valor para obtener el resultado.

Figura 47. **Incrustación potencial de la caldera**



Fuente: *Mejoramiento de la eficiencia de operación de calderas de vapor, Estación experimental de ingeniería de ITG. p.144.*

5.2.1.3. Nivel de producción de vapor óptimo

El nivel de producción óptimo de vapor, tomando en cuenta las mejoras en el sistema, se obtiene con una presión de trabajo de 112psig (que representa una reducción del 10% de 125psig), con una temperatura de agua de alimentación de 158°F, con el sistema de pre calentamiento de agua.

Entonces se tiene que,

$$P \text{ de trabajo} = 112 \text{ psig} + 14,5 \text{ psig} = 127 \text{ psia.}$$

Interpolando se encuentra el valor de la entalpía para 127 psia.

Tabla XXXVIII. **Entalpía para 127 psia**

Presión	Entalpía
120 psia	1 191,1
127 psia	x
140	1 193,8

Fuente: elaboración propia.

El resultado $H_g = 1\,192,04 \text{ Btu/lb}$

Ahora, se calcula la entalpía correspondiente al agua de alimentación.

Tabla XXXIX. **Entalpía para 158°F**

Temperatura	Entalpía
140°F	107,96
158°F	x
160°F	127,96

Fuente: elaboración propia.

Se obtiene el resultado $H_f = 125,96 \text{ Btu/lb}$. Se calculan las libras de vapor óptimas en este sistema, utilizando la fórmula:

$$Mn = \frac{Qn}{(hg - hf)}$$

Donde:

Qn = Energía por hora (BTU/h)

hg = Entalpía de vapor saturado seco a presión absoluta (BTU/lbm)

hf = Entalpía de líquido saturado a presión absoluta (BTU/lbm)

Mn = Consumo de vapor en libras/hora

$$Mn = \frac{2\,092\,200}{(1\,192,04 - 125,96)} = 1\,962,52 \text{ lb vapor/hora}$$

Tabla XL. **Comparación de producción de vapor**

Cantidad de vapor producido anteriormente lb/h	Nueva cantidad de vapor producido lb/h
1 926,93	1 962,51

Fuente: elaboración propia.

Se tiene como resultado un incremento en la producción de vapor de 1,84%, lo que permitirá realizar las operaciones que requieran calentamiento en un menor tiempo. Al disminuir los recursos, se obtuvo un mayor incremento de producción.

CONCLUSIONES

1. La eficiencia de la caldera en el sistema correspondía a un 80,17%, incluyendo fugas térmicas, fugas de vapor y temperatura de los gases de emisión. Las acciones recomendadas, lograron el objetivo de aumentar la eficiencia de la caldera en un 4,3%, cumpliendo ampliamente la hipótesis planteada de lograr el incremento de la eficiencia en un intervalo 1% a 4%. Dicho aumento de eficiencia generaría ahorros de hasta Q 90 096,00 anuales en combustible bunker.
2. Actualmente, se emplea un alto consumo de bunker para la generación de vapor, debido a la baja calidad de oxígeno presente en el exceso de aire suministrado a la cámara de combustión más las deficiencias en las fugas energéticas presentes en la red de distribución de vapor, si bien estas no representan el principal problema en la deficiencia, contribuyen en un segundo lugar a la deficiencia de los recursos.
3. El diseño de la red de distribución de vapor cuenta con el espaciamiento adecuado de los accesorios; sin embargo, se determinó que existen accesorios que no están en buen estado y provocan fricción en el flujo de vapor, ocasionando caídas de presión que la caldera debe compensar con la presión de trabajo actual, por lo que existe un desgaste mayor.
4. El nivel de impacto ambiental de los procedimientos de la generación de vapor contiene un índice medio-alto, debido a la baja recuperación de retorno de condensado, en las purgas se pierde una cantidad significativa de agua que puede ser reutilizable en el proceso y que,

además, conllevan químicos utilizados para la suavización del agua. Los niveles de oxígeno en la emanación de gases provocan altas temperaturas de emanación y conllevan partículas dióxido de carbono y monóxido de carbono, como efecto de la combustión deficiente realizada en el hogar de la caldera.

5. Se establecieron parámetros óptimos que se deben tomar en cuenta para el mejoramiento continuo del sistema para incentivar a los operarios y a los jefes encargados para buscar siempre la manera de mejorar sus procesos y no conformarse con los resultados básicos obtenidos.

RECOMENDACIONES

1. Con la mejora alcanzada de la eficiencia se recomienda establecer un plan de ahorro en el presupuesto generado, de manera que se pueda identificar un monto específico destinado a la evolución del sistema, para evitar que se cometan los errores que provocaron el decaimiento de la eficiencia y mantener el nivel alcanzado con los esfuerzos realizados.
2. Al implementar el precalentador de aire, se recomienda que se le brinde el mantenimiento correspondiente a las bombas encargadas de suministrar bunker hacia la caldera, de manera que puedan corresponder a las nuevas exigencias operacionales. Asimismo, se deben verificar los aislantes que se encuentran en mal estado y que provocan las fugas de energía calorífica. Esto, además de incidir en la eficiencia, representan una condición insegura para los operarios encargados de realizar reparaciones en los alrededores de donde se encuentra la tubería expuesta.
3. El reemplazo inmediato de los accesorios que cuentan con adaptaciones técnicas no efectivas que, si bien pueden cumplir una función determinada, el costo del cumplimiento de esta acción es mayor por cada día que siguen funcionando estos accesorios ineficientes. El precio que se deja de invertir en la adquisición de nuevos accesorios, se paga con el aumento del uso del combustible.

4. Realizar mediciones periódicas de dióxido y monóxido de carbono, para controlar los niveles de contaminación de la emanación de humos provenientes del proceso de combustión. También se sugiere aprovechar mejor el condensado evacuado para reducir el porcentaje de uso de alimentación de agua cruda proveniente del medio ambiente.

5. Capacitar a los operarios para que conozcan los conceptos de eficiencia e incluirlos en el proceso. Así también, se debe verificar la calibración de los instrumentos que se poseen para la medición de los parámetros que se requieren actualmente, ya que se hallaron indicios de que algunos instrumentos pueden estar mal calibrados debido a la falta de mantenimiento.

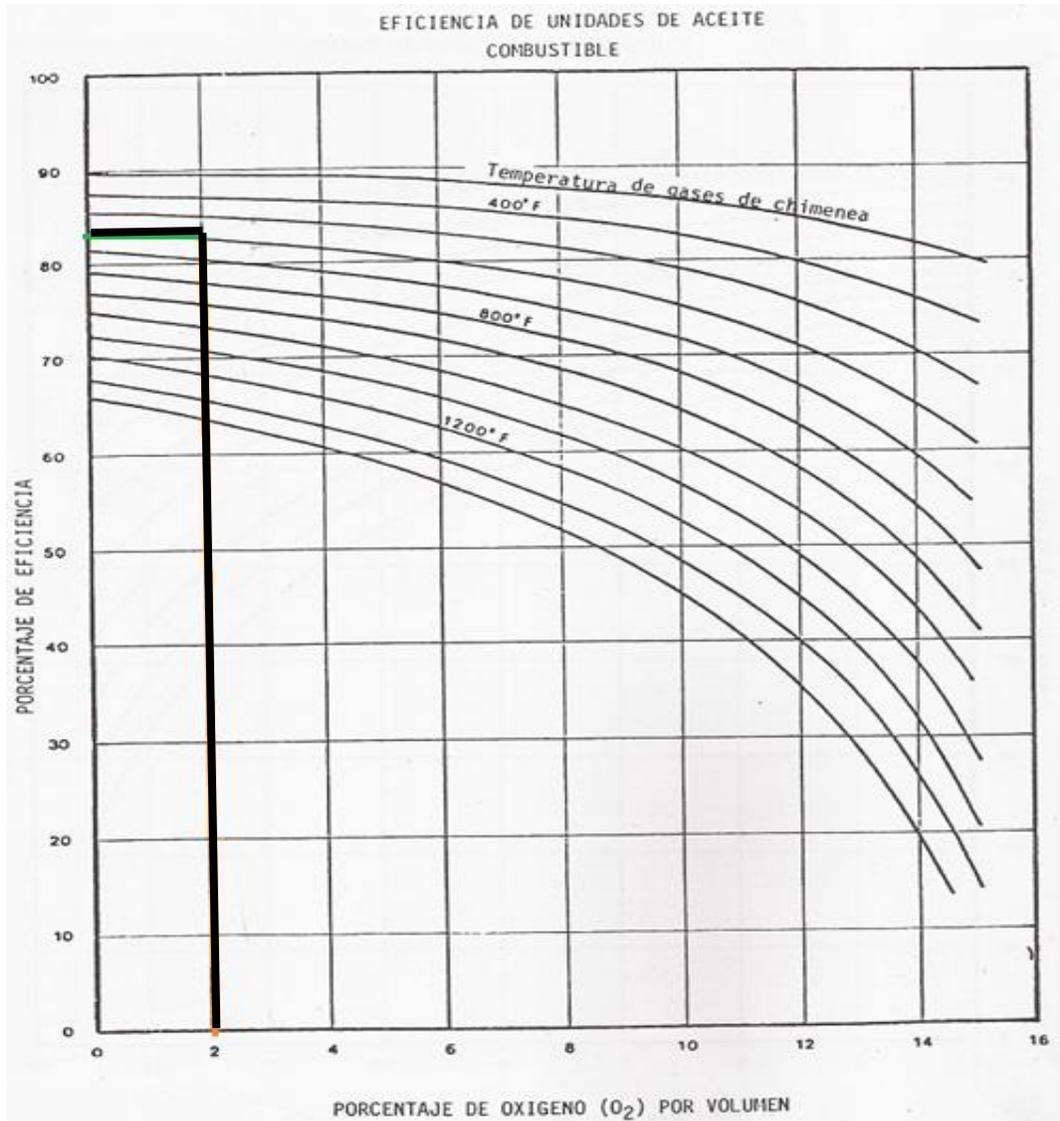
BIBLIOGRAFÍA

1. CENGEL, Yunis Boles. *Termodinámica*. México: McGraw-Hill, 1990. 1028 p.
2. GAFFERT, Gustave. *Centrales de Vapor*. España: Reverté, S.A. 1981. 528 p.
3. GARCÍA FERRER, Carlos Alberto. *Vapor de agua: teoría y aplicaciones*. México: Limusa, 1998. 146 p.
4. LIFSCHITZ, Eduardo A. *Control de la Combustión*. AADECA No.4, Vol 2. *Cuadernos Profesionales*, 1994. 75 p.
5. MOLINA IGARTUA, Luis Alfonso & ALONSO GIRÓN, Juan Antonio. *Calderas de Vapor en la Industria, CADEM. Ente Vasco de la Energía (EVE)*. Bilbao, 1996. 473 p.
6. MORENO, Eduardo. *Recopilación de detalles típicos para instalaciones industriales de vapor*. Caracas, 1998. 342 p.

7. PRIAS CAICEDO, Omar. *Eficiencia energética en la generación y distribución de vapor*. Trabajo de graduación de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Occidente. 36 p.

ANEXOS

Anexo 1.



Fuente: *Mejoramiento de la eficiencia de operación de calderas de vapor, Estación experimental de ingeniería del Instituto de Georgia.* p.61

Anexo 2.

FACTORES DE PRESION PARA TUBERIA

Inch of Vacuum	Volume cu ft/lb	Pressure Factor	Pressure psig	Volume cu ft/lb	Pressure Factor	Pressure psig	Volume cu ft/lb	Pressure Factor	Pressure psig	Volume cu ft/lb	Pressure Factor	Pressure psig	Volume cu ft/lb	Pressure Factor
26	173.0	4	48	5.2	3040	116	3.5	12610	183	2.3	28090			
24	118.0	9	49	6.8	3130	117	3.4	12900	184	2.3	28380			
22	91.0	15	50	6.7	2725	118	3.4	12990	185	2.3	28650			
20	74.8	22	51	6.6	3325	119	3.4	13180	186	2.3	28920			
18	62.0	31	52	6.5	3425	120	3.4	13370	187	2.3	29200			
16	53.0	41	53	6.4	3525	121	3.3	13560	188	2.3	29480			
14	47.5	54	54	6.3	3625	122	3.3	13750	189	2.3	29770			
12	43.0	67	55	6.2	3725	123	3.3	13940	190	2.3	30040			
10	39.0	83	56	6.1	3825	124	3.3	14140	191	2.2	30340			
9	36.8	92	57	6.1	3935	125	3.3	14340	192	2.2	30630			
8	35.3	100	58	6.0	4045	126	3.2	14540	193	2.2	30910			
7	34.0	110	59	5.9	4155	127	3.2	14740	194	2.2	31200			
6	32.8	120	60	5.8	4265	128	3.2	14940	195	2.2	31490			
5	31.6	130	61	5.8	4370	129	3.2	15140	196	2.2	31770			
4	30.4	140	62	5.7	4485	130	3.1	15350	197	2.2	32070			
3	29.3	150	63	5.6	4600	131	3.1	15560	198	2.2	32370			
2	28.2	160	64	5.6	4720	132	3.1	15770	199	2.2	32660			
1	27.3	170	65	5.5	4840	133	3.1	15980	200	2.2	32810			
.5	27.0	178	66	5.4	4950	134	3.1	16190	201	2.2	32950			
Pressure psig			67	5.4	5080	135	3.0	16400	202	2.1	33560			
0	26.7	183	68	5.3	5200	136	3.0	16620	203	2.1	33860			
1	25.1	210	69	5.2	5320	137	3.0	16840	204	2.1	34170			
2	23.7	235	70	5.2	6440	138	3.0	16960	205	2.1	34450			
3	22.4	265	71	5.1	5560	139	3.0	17180	206	2.1	34760			
4	21.3	295	72	5.1	5690	140	2.9	17470	207	2.1	35080			
5	20.3	325	73	5.0	5820	141	2.9	17680	208	2.1	35390			
6	19.4	355	74	5.0	5950	142	2.9	17910	209	2.1	35700			
7	18.6	390	75	4.9	6080	143	2.9	18130	210	2.1	35990			
8	17.8	425	76	4.9	6210	144	2.9	18360	211	2.1	36320			
9	17.1	460	77	4.8	6350	145	2.8	18580	212	2.1	36630			
10	16.5	500	78	4.8	6490	146	2.8	18790	213	2.0	36940			
11	15.9	540	79	4.7	6630	147	2.8	19020	214	2.0	37260			
12	15.3	580	80	4.7	6770	148	2.8	19250	215	2.0	37570			
13	14.8	625	81	4.6	6910	149	2.8	19480	216	2.0	37890			
14	14.3	670	82	4.6	7050	150	2.8	19710	217	2.0	38210			
15	13.9	715	83	4.6	7190	151	2.8	19950	218	2.0	38550			
16	13.5	760	84	4.5	7330	152	2.7	20180	219	2.0	38880			
17	13.1	810	85	4.5	7470	153	2.7	20510	220	2.0	39160			
18	12.7	860	86	4.4	7610	154	2.7	20650	221	2.0	39510			
19	12.4	910	87	4.4	7750	155	2.7	20890	222	2.0	39830			
20	12.1	965	88	4.4	7910	156	2.7	21130	223	2.0	40150			
21	11.7	1020	89	4.3	8060	157	2.7	21380	224	2.0	40490			
22	11.4	1078	90	4.3	8210	158	2.7	21610	225	1.9	40820			
23	11.1	1135	91	4.2	8360	159	2.6	21850	226	1.9	41110			
24	10.8	1195	92	4.2	8510	160	2.6	22110	227	1.9	41440			
25	10.6	1255	93	4.2	8660	161	2.6	22350	228	1.9	41780			
26	10.4	1318	94	4.1	8820	162	2.6	22590	229	1.9	42100			
27	10.1	1385	95	4.1	8980	163	2.6	22850	230	1.9	42450			
28	9.9	1445	96	4.1	9140	164	2.6	23150	231	1.9	42790			
29	9.7	1525	97	4.0	9300	165	2.6	23350	232	1.9	43100			
30	9.5	1595	98	4.0	9460	166	2.5	23500	233	1.9	43470			
31	9.3	1665	99	4.0	9620	167	2.5	23840	234	1.9	43810			
32	9.1	1735	100	3.9	9790	168	2.5	24110	235	1.9	44150			
33	8.9	1805	101	3.9	9960	169	2.5	24350	236	1.9	44490			
34	8.7	1875	102	3.9	10130	170	2.5	24520	237	1.9	44830			
35	8.6	1945	103	3.8	10300	171	2.5	24880	238	1.8	45200			
36	8.4	2020	104	3.8	10470	172	2.5	25140	239	1.8	45530			
37	8.2	2100	105	3.8	10640	173	2.5	25400	240	1.8	45870			
38	8.1	2180	106	3.7	10810	174	2.4	25670	241	1.8	46270			
39	8.0	2260	107	3.7	10980	175	2.4	25930	242	1.8	46580			
40	7.8	2340	108	3.7	11155	176	2.4	26200	243	1.8	46935			
41	7.7	2420	109	3.6	11335	177	2.4	26450	244	1.8	47272			
42	7.6	2500	110	3.6	11515	178	2.4	26730	245	1.8	47632			
43	7.4	2590	111	3.6	11695	179	2.4	27010	246	1.8	47995			
44	7.3	2680	112	3.6	11875	180	2.4	27280	247	1.8	48362			
45	7.2	2770	113	3.5	12055	181	2.4	27540	248	1.8	48707			
46	7.1	2860	114	3.5	12235	182	2.3	27830	249	1.8	49072			
47	7.0	2950	115	3.5	12420									

Fuente: Material de apoyo curso Instalaciones Mecánicas, Ing. Roberto Guzmán, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Anexo 3.

CAPACIDAD DE TUBERIA Y FACTORES DE CAIDA DE PRESION

P	N"	N"	1"	1 1/2"	2"	Pieces											
						2 1/2"	3"	4"	5"	6"	8"	10"	12"				
0.008						113	185	406	775	1770	1815	2600	3500	4750	6150	7750	
0.010						8	10	12	15	18	20	25	30	35	40	45	
0.012						33	40	48	60	75	90	110	130	150	170	190	
0.014						8	10	12	15	18	20	25	30	35	40	45	
0.020						29	36	44	55	68	82	100	120	140	160	180	
0.025						10	12	14	18	22	26	32	38	45	52	60	
0.030						11	14	17	21	26	31	38	45	53	62	72	
0.035						12	15	18	23	28	34	42	50	59	69	80	
0.040						13	16	20	25	31	38	46	55	65	76	88	
0.050						14	17	21	27	33	41	50	60	71	83	96	
0.060						15	18	23	29	36	44	53	63	75	88	102	
0.070						16	19	24	31	38	47	56	67	80	94	109	
0.080						17	20	25	32	40	49	59	70	83	98	114	
0.090						18	21	26	34	42	51	61	73	87	102	119	
0.10						19	22	27	35	44	53	64	76	90	106	124	
0.12						20	23	29	37	46	55	66	79	93	110	129	
0.14						21	24	30	39	48	58	69	82	97	115	135	
0.20						23	26	33	42	51	61	73	87	102	120	141	
0.25						24	27	34	44	53	63	76	90	106	125	146	
0.30						25	28	35	45	54	64	77	91	108	128	150	
0.35						26	29	36	46	55	65	78	92	110	131	153	
0.40						27	30	37	47	56	66	79	93	111	133	155	
0.45						28	31	38	48	57	67	80	94	112	135	157	
0.50						29	32	39	49	58	68	81	95	113	137	159	
0.60						30	33	40	50	59	69	82	96	114	139	161	
0.70						31	34	41	51	60	70	83	97	115	141	163	
0.80						32	35	42	52	61	71	84	98	116	143	165	
1.00						33	36	43	53	62	72	85	99	117	145	167	
1.2						34	37	44	54	63	73	86	100	118	147	169	
1.4						35	38	45	55	64	74	87	101	119	149	171	
1.6						36	39	46	56	65	75	88	102	120	151	173	
2.0						37	40	47	57	66	76	89	103	121	153	175	
2.4						38	41	48	58	67	77	90	104	122	155	177	
2.8						39	42	49	59	68	78	91	105	123	157	179	
3.2						40	43	50	60	69	79	92	106	124	159	181	
3.6						41	44	51	61	70	80	93	107	125	161	183	
4.0						42	45	52	62	71	81	94	108	126	163	185	
4.8						43	46	53	63	72	82	95	109	127	165	187	
5.6						44	47	54	64	73	83	96	110	128	167	189	
6.4						45	48	55	65	74	84	97	111	129	169	191	
7.2						46	49	56	66	75	85	98	112	130	171	193	
8.0						47	50	57	67	76	86	99	113	131	173	195	
9.0						48	51	58	68	77	87	100	114	132	175	197	
10.0						49	52	59	69	78	88	101	115	133	177	199	
12.0						50	53	60	70	79	89	102	116	134	179	201	
14.0						51	54	61	71	80	90	103	117	135	181	203	
16.0						52	55	62	72	81	91	104	118	136	183	205	
18.0						53	56	63	73	82	92	105	119	137	185	207	
20.0						54	57	64	74	83	93	106	120	138	187	209	
24.0						55	58	65	75	84	94	107	121	139	189	211	
28.0						56	59	66	76	85	95	108	122	140	191	213	
32.0						57	60	67	77	86	96	109	123	141	193	215	
36.0						58	61	68	78	87	97	110	124	142	195	217	
40.0						59	62	69	79	88	98	111	125	143	197	219	
48.0						60	63	70	80	89	99	112	126	144	199	221	
56.0						61	64	71	81	90	100	113	127	145	201	223	
64.0						62	65	72	82	91	101	114	128	146	203	225	
72.0						63	66	73	83	92	102	115	129	147	205	227	
80.0						64	67	74	84	93	103	116	130	148	207	229	
90.0						65	68	75	85	94	104	117	131	149	209	231	
100.0						66	69	76	86	95	105	118	132	150	211	233	
120.0						67	70	77	87	96	106	119	133	151	213	235	
140.0						68	71	78	88	97	107	120	134	152	215	237	
160.0						69	72	79	89	98	108	121	135	153	217	239	
180.0						70	73	80	90	99	109	122	136	154	219	241	
200.0						71	74	81	91	100	110	123	137	155	221	243	
240.0						72	75	82	92	101	111	124	138	156	223	245	
280.0						73	76	83	93	102	112	125	139	157	225	247	
320.0						74	77	84	94	103	113	126	140	158	227	249	
360.0						75	78	85	95	104	114	127	141	159	229	251	
400.0						76	79	86	96	105	115	128	142	160	231	253	
480.0						77	80	87	97	106	116	129	143	161	233	255	
560.0						78	81	88	98	107	117	130	144	162	235	257	
640.0						79	82	89	99	108	118	131	145	163	237	259	
720.0						80	83	90	100	109	119	132	146	164	239	261	
800.0						81	84	91	101	110	120	133	147	165	241	263	
900.0						82	85	92	102	111	121	134	148	166	243	265	
1000.0						83	86	93	103	112	122	135	149	167	245	267	
1200.0						84	87	94	104	113	123	136	150	168	247	269	
1400.0						85	88	95	105	114	124	137	151	169	249	271	
1600.0						86	89	96	106	115	125	138	152	170	251	273	
1800.0						87	90	97	107	116	126	139	153	171	253	275	
2000.0						88	91	98	108	117	127	140	154	172	255	277	
2400.0						89	92	99	109	118	128	141	155	173	257	279	
2800.0						90	93	100	110	119	129	142	156	174	259	281	
3200.0						91	94	101	111	120	130	143	157	175	261	283	
3600.0						92	95	102	112	121	131	144	158	176	263	285	
4000.0						93	96	103	113	122	132	145	159	177	265	287	
4800.0						94	97	104	114	123	133	146	160	178	267	289	
5600.0																	

Anexo 4.

TABLA A-14
Propiedades del agua: tabla de vapor sobrecalentado
 $v, ft^3/lb; u, Btu/lb; h, Btu/lb; s, Btu/(lb \cdot ^\circ R)$

Temp., °F	v	u	h	s	v	u	h	s
		1 psia ($T_{sat} = 101.1^\circ F$)				5 psia ($T_{sat} = 162.2^\circ F$)		
Sat.	333.6	1044.0	1105.8	1.9779	73.53	1063.0	1131.0	1.8441
150	362.6	1060.4	1127.5	2.0151				
200	392.5	1077.5	1150.1	2.0508	78.15	1076.0	1148.6	1.8715
250	422.4	1094.7	1172.8	2.0839	84.21	1093.8	1171.7	1.9052
300	452.3	1112.0	1195.7	2.1150	90.24	1111.3	1194.8	1.9367
400	511.9	1147.0	1241.8	2.1720	102.24	1146.6	1241.2	1.9941
500	571.5	1182.8	1288.5	2.2235	114.20	1182.5	1288.2	2.0458
600	631.1	1219.3	1336.1	2.2706	126.15	1219.1	1335.8	2.0930
700	690.7	1256.7	1384.5	2.3142	138.08	1256.5	1384.3	2.1367
800	750.3	1294.4	1433.7	2.3550	150.01	1294.7	1433.5	2.1775
900	809.9	1333.9	1483.8	2.3932	161.94	1333.8	1483.7	2.2158
1000	869.5	1373.9	1534.8	2.4294	173.86	1373.9	1534.7	2.2520
	10 psia ($T_{sat} = 193.2^\circ F$)				14.7 psia ($T_{sat} = 212.0^\circ F$)			
Sat.	38.42	1072.2	1143.3	1.7877	26.80	1077.6	1150.5	1.7567
200	38.85	1074.7	1146.6	1.7927				
250	41.95	1092.6	1170.2	1.8272	28.42	1091.5	1168.8	1.7832
300	44.99	1110.4	1193.7	1.8592	30.52	1109.6	1192.6	1.8157
400	51.03	1146.1	1240.5	1.9171	34.67	1145.6	1239.9	1.8741
500	57.04	1182.2	1287.7	1.9690	38.77	1181.8	1287.3	1.9263
600	63.03	1218.9	1335.5	2.0164	42.86	1218.6	1335.2	1.9737
700	69.01	1256.3	1384.0	2.0601	46.93	1256.1	1383.8	2.0175
800	74.98	1294.6	1433.3	2.1009	51.00	1294.4	1433.1	2.0584
900	80.95	1333.7	1483.5	2.1393	55.07	1333.6	1483.4	2.0967
1000	86.91	1373.8	1534.6	2.1755	59.13	1373.7	1534.5	2.1330
1100	92.88	1414.7	1586.6	2.2099	63.19	1414.6	1586.4	2.1674
	20 psia ($T_{sat} = 228.0^\circ F$)				40 psia ($T_{sat} = 267.3^\circ F$)			
Sat.	20.09	1082.0	1156.4	1.7320	10.50	1093.3	1170.0	1.6767
250	20.79	1090.3	1167.2	1.7475				
300	22.36	1108.7	1191.5	1.7805	11.04	1105.1	1186.8	1.6993
350	23.90	1126.9	1215.4	1.8110	11.84	1124.2	1211.8	1.7312
400	25.43	1145.1	1239.2	1.8395	12.62	1143.0	1236.4	1.7606
500	28.46	1181.5	1286.8	1.8919	14.16	1180.1	1284.9	1.8140
600	31.47	1218.4	1334.8	1.9395	15.69	1217.3	1333.4	1.8621
700	34.47	1255.9	1383.5	1.9834	17.20	1255.1	1382.4	1.9063
800	37.46	1294.3	1432.9	2.0243	18.70	1293.7	1432.1	1.9474
900	40.45	1333.5	1483.2	2.0627	20.20	1333.0	1482.5	1.9859
1000	43.44	1373.5	1534.3	2.0989	21.70	1373.1	1533.8	2.0223
1100	46.42	1414.5	1586.3	2.1334	23.20	1414.2	1585.9	2.0568

Fuente: WARK, Keneth. *Termodinámica*. Tablas y figuras complementarias p.877

Anexo 5.

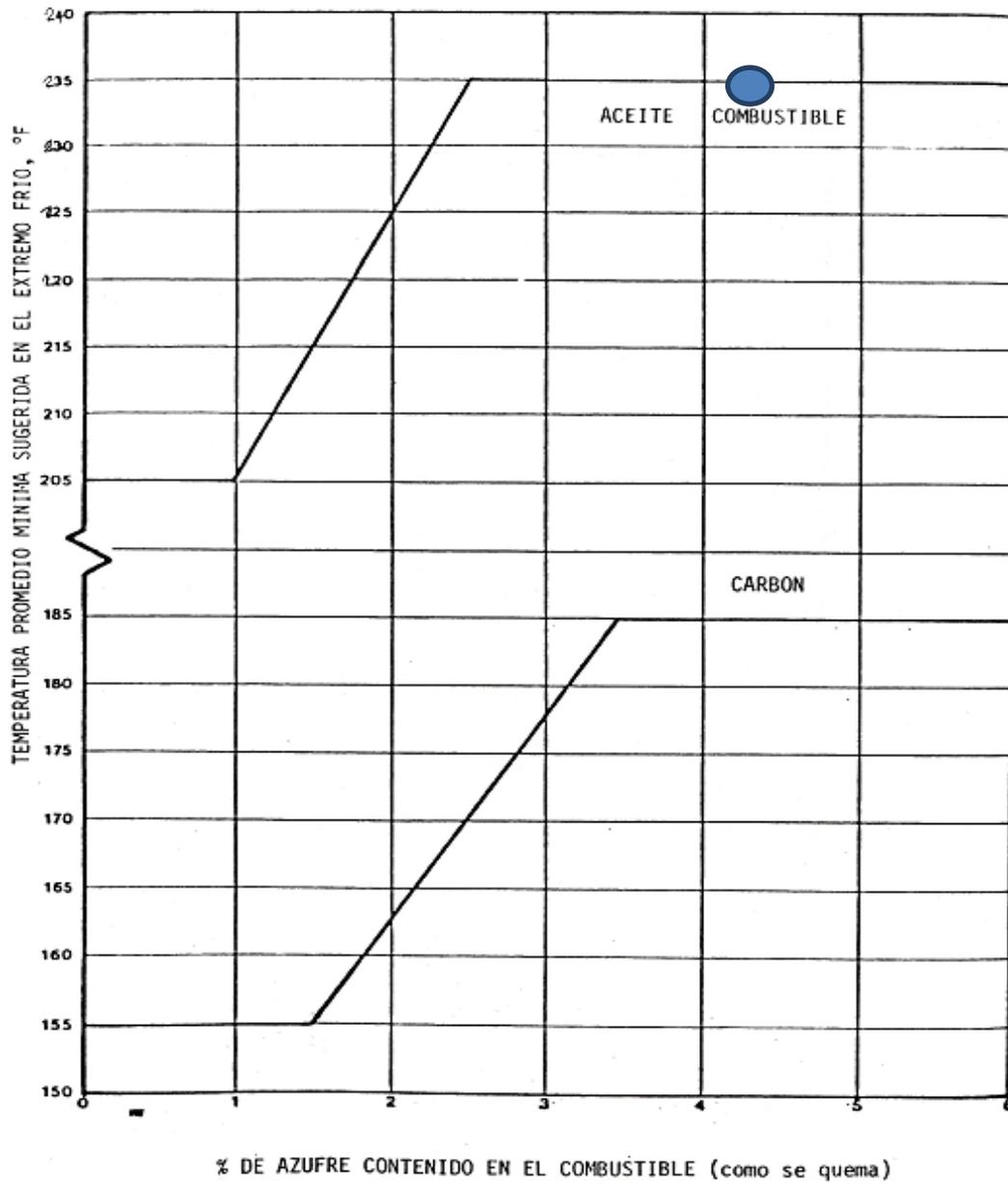
TABLA A-12
Propiedades del agua saturada: tabla de temperatura
 v , ft³/lb; u , y h , Btu/lb; s , Btu/(lb·°R)

Temp., °F T	Presión psia P	Volumen específico		Energía interna		Entalpía			Entropía	
		Líquido sat. v_f	Vapor sat. v_g	Líquido sat. u_f	Vapor sat. u_g	Líquido sat. h_f	Evap. h_{fg}	Vapor sat. h_g	Líquido sat. s_f	Vapor sat. s_g
32	0.0886	0.01602	3305	-.01	1021.2	-.01	1075.4	1075.4	-.00003	2.1870
35	0.0999	0.01602	2948	2.99	1022.2	3.00	1073.7	1076.7	0.00607	2.1764
40	0.1217	0.01602	2445	8.02	1023.9	8.02	1070.9	1078.9	0.01617	2.1592
45	0.1475	0.01602	2037	13.04	1025.5	13.04	1068.1	1081.1	0.02618	2.1423
50	0.1780	0.01602	1704	18.06	1027.2	18.06	1065.2	1083.3	0.03607	2.1259
52	0.1917	0.01603	1589	20.06	1027.8	20.07	1064.1	1084.2	0.04000	2.1195
54	0.2064	0.01603	1482	22.07	1028.5	22.07	1063.0	1085.1	0.04391	2.1131
56	0.2219	0.01603	1383	24.08	1029.1	24.08	1061.9	1085.9	0.04781	2.1068
58	0.2386	0.01603	1292	26.08	1029.8	26.08	1060.7	1086.8	0.05159	2.1005
60	0.2563	0.01604	1207	28.08	1030.4	28.08	1059.6	1087.7	0.05555	2.0943
62	0.2751	0.01604	1129	30.09	1031.1	30.09	1058.5	1088.6	0.05940	2.0882
64	0.2952	0.01604	1056	32.09	1031.8	32.09	1057.3	1089.4	0.06323	2.0821
66	0.3165	0.01604	988.4	34.09	1032.4	34.09	1056.2	1090.3	0.06704	2.0761
68	0.3391	0.01605	925.8	36.09	1033.1	36.09	1055.1	1091.2	0.07084	2.0701
70	0.3632	0.01605	867.7	38.09	1033.7	38.09	1054.0	1092.0	0.07463	2.0642
72	0.3887	0.01606	813.7	40.09	1034.4	40.09	1052.8	1092.9	0.07839	2.0584
74	0.4158	0.01606	763.5	42.09	1035.0	42.09	1051.7	1093.8	0.08215	2.0526
76	0.4446	0.01606	716.8	44.09	1035.7	44.09	1050.6	1094.7	0.08589	2.0469
78	0.4750	0.01607	673.3	46.09	1036.3	46.09	1049.4	1095.5	0.08961	2.0412
80	0.5073	0.01607	632.8	48.08	1037.0	48.09	1048.3	1096.4	0.09332	2.0356
82	0.5414	0.01608	595.0	50.08	1037.6	50.08	1047.2	1097.3	0.09701	2.0300
84	0.5776	0.01608	559.8	52.08	1038.3	52.08	1046.0	1098.1	0.1007	2.0245
86	0.6158	0.01609	527.0	54.08	1038.9	54.08	1044.9	1099.0	0.1044	2.0190
88	0.6562	0.01609	496.3	56.07	1039.6	56.07	1043.8	1099.9	0.1080	2.0136
90	0.6988	0.01610	467.7	58.07	1040.2	58.07	1042.7	1100.7	0.1117	2.0083
92	0.7439	0.01611	440.9	60.06	1040.9	60.06	1041.5	1101.6	0.1153	2.0030
94	0.7914	0.01611	415.9	62.06	1041.5	62.06	1040.4	1102.4	0.1189	1.9977
96	0.8416	0.01612	392.4	64.05	1041.2	64.06	1039.2	1103.3	0.1225	1.9925
98	0.8945	0.01612	370.5	66.05	1042.8	66.05	1038.1	1104.2	0.1261	1.9874
100	0.9503	0.01613	350.0	68.04	1043.5	68.05	1037.0	1105.0	0.1296	1.9822
110	1.276	0.01617	265.1	78.02	1046.7	78.02	1031.3	1109.3	0.1473	1.9574
120	1.695	0.01621	203.0	87.99	1049.9	88.00	1025.5	1113.5	0.1647	1.9336
130	2.225	0.01625	157.2	97.97	1053.0	97.98	1019.8	1117.8	0.1817	1.9109
140	2.892	0.01629	122.9	107.95	1056.2	107.96	1014.0	1121.9	0.1985	1.8892
150	3.722	0.01634	97.0	117.95	1059.3	117.96	1008.1	1126.1	0.2150	1.8684
160	4.745	0.01640	77.2	127.94	1062.3	127.96	1002.2	1130.1	0.2313	1.8484
170	5.996	0.01645	62.0	137.95	1065.4	137.97	996.2	1134.2	0.2473	1.8293
180	7.515	0.01651	50.2	147.97	1068.3	147.99	990.2	1138.2	0.2631	1.8109
190	9.343	0.01657	41.0	158.00	1071.3	158.03	984.1	1142.1	0.2787	1.7932
200	11.529	0.01663	33.6	168.04	1074.2	168.07	977.9	1145.9	0.2940	1.7762

Fuente: WARK, Keneth. *Termodinámica*. Tablas y figuras complementarias p.867

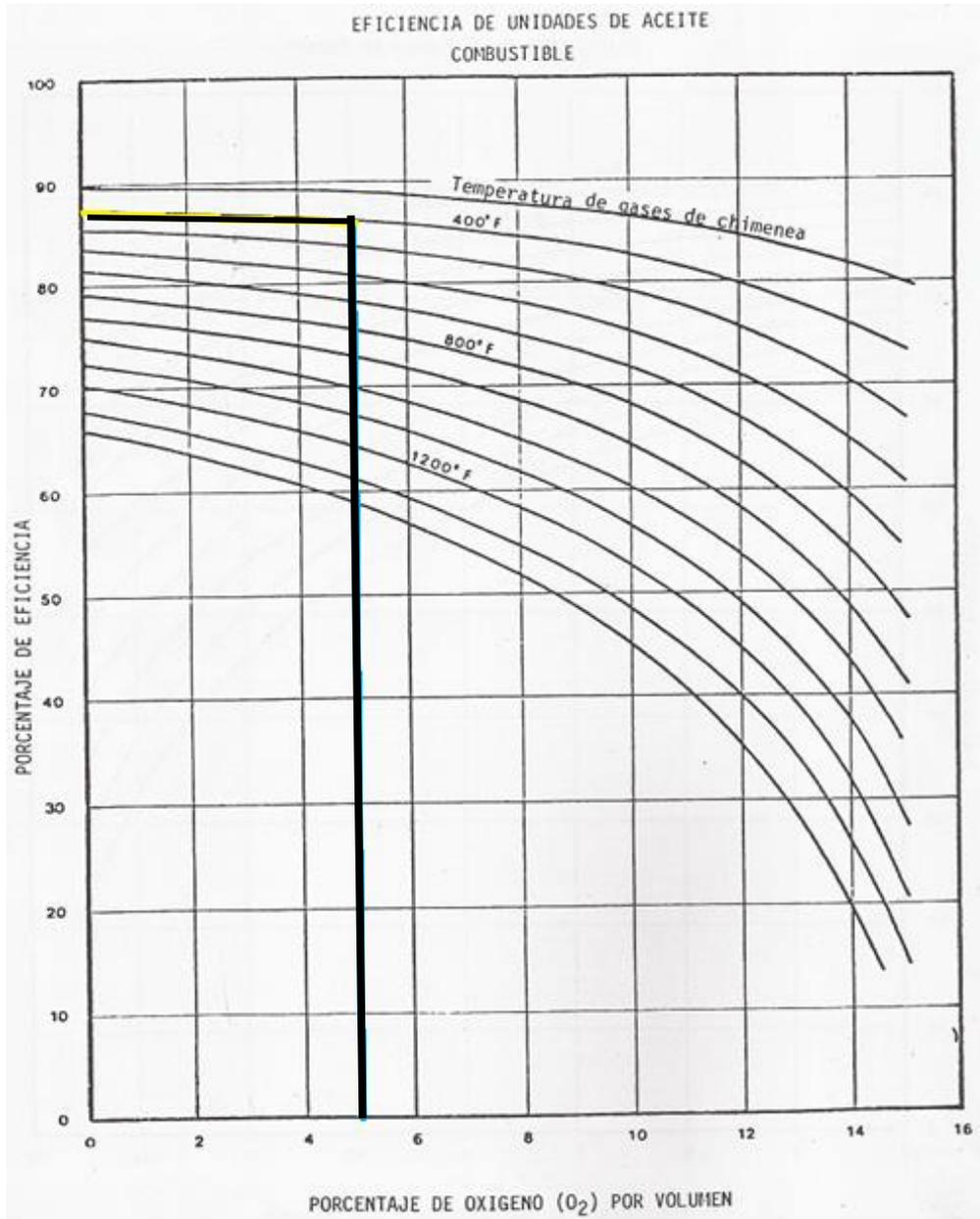
Anexo 6.

GUIA PARA SELECCIONAR PRECALENTADORES DE AIRE CON GASES DE COMBUSTION



Fuente: *Mejoramiento de la eficiencia de operación de calderas de vapor, Estación experimental de ingeniería del Instituto de Georgia.* p.134

Anexo 7.



Fuente: *Mejoramiento de la eficiencia de operación de calderas de vapor, Estación experimental de ingeniería del Instituto de Georgia. p.61.*

