



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

**PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y
DISTRIBUCIÓN DE VAPOR EN EL ÁREA DE CALDERAS DEL HOSPITAL
REGIONAL DE COBÁN**

Jorge Luis Arévalo Alvarado

Asesorado por el Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda

Guatemala, abril de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y
DISTRIBUCIÓN DE VAPOR EN EL ÁREA DE CALDERAS DEL HOSPITAL
REGIONAL DE COBÁN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JORGE LUIS ARÉVALO ALVARADO

ASESORADO POR EL ING. EDWIN ESTUARDO SARCEÑO ZEPEDA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, ABRIL 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. Jorgen 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. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. Edwin Antonio Alvarado Cario
EXAMINADOR	Ing. Oscar Eduardo Maldonado de la Roca
EXAMINADOR	Ing. Raymond Ludwing Taylor Cruz
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

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:

PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE VAPOR EN EL ÁREA DE CALDERAS DEL HOSPITAL REGIONAL DE COBÁN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 21 de julio de 2016.

Jorge Luis Arévalo Alvarado



Guatemala, 08 de noviembre de 2016
Ref.EPS.DOC.771.11.16.

Inga. Christa Classon de Pinto
Directora Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimada Ingeniera Classon de Pinto.

Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Jorge Luis Arévalo Alvarado** de la Carrera de Ingeniería Mecánica, con carné No. 8811773, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE VAPOR EN EL ÁREA DE CALDERAS DEL HOSPITAL REGIONAL DE COBÁN.**

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda
Asesor-Supervisor de Prácticas
Área de Ingeniería Mecánica
ASESOR-SUPERVISOR DE EPS
Unidad de Prácticas de Ingeniería y EPS
Facultad de Ingeniería

c.c. Archivo
EESZ/ra



Guatemala, 08 de noviembre de 2016
REF.EPS.D.484.11.16

Ing. Roberto Guzmán
Director Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Presente

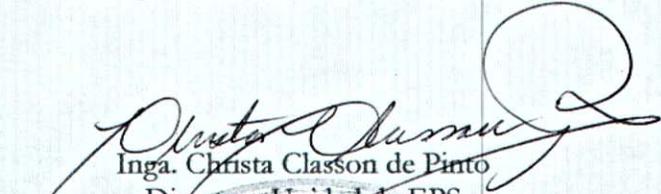
Estimado Ingeniero Guzmán:

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado: **PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE VAPOR EN EL ÁREA DE CALDERAS DEL HOSPITAL REGIONAL DE COBÁN**, que fue desarrollado por el estudiante universitario **Jorge Luis Arévalo Alvarado** quien fue debidamente asesorado y supervisado por el Ingeniero Edwin Estuardo Sarceño Zepeda.

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

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"


Inga. Christa Classon de Pinto
Directora Unidad de EPS



CCdP/ra

Ref.E.I.M.005.2017

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor-Supervisor y del Director de la Unidad de EPS, al trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE VAPOR EN EL ÁREA DE CALDERAS DEL HOSPITAL REGIONAL DE COBÁN** del estudiante **Jorge Luis Arévalo Alvarado**, carné No. **8811773**, procede a la autorización del mismo para su revisión.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, enero de 2017
/aej



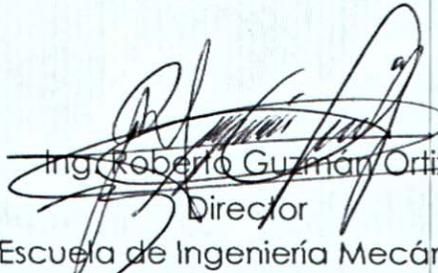
USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.137.2017

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor-Supervisor y del Director de la Unidad de EPS, al trabajo de graduación titulado: **PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE VAPOR EN EL ÁREA DE CALDERAS DEL HOSPITAL REGIONAL DE COBÁN**, del estudiante **Jorge Luis Arévalo Alvarado, CUI No. 1627-06847-0101, Reg. Académico No. 8811773** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Roberto Guzman Ortiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, abril de 2017
/aej

Universidad de San Carlos
de Guatemala

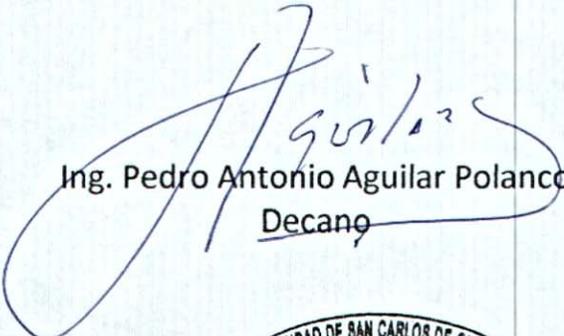


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 175.2017

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, al Trabajo de Graduación titulado: **PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE VAPOR EN EL ÁREA DE CALDERAS DEL HOSPITAL REGIONAL DE COBÁN**, presentado por el estudiante universitario: **Jorge Luis Arévalo Alvarado**, 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, abril de 2017

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser la luz que guía mis pasos, porque me ha dado el entendimiento y sabiduría para concluir mi carrera profesional.
- Mis padres** Margarito Arévalo (q.e.p.d) y Emilia Alvarado. Por su apoyo incondicional, por sus sacrificios y su guía para hacerme una persona de bien.
- Mi esposa** Marta Julia Paz de Arévalo. Por su amor, compañía y apoyo en mi vida, en mi hogar y en mi carrera.
- Mis hijas** Mariana y María Isabel. Por ser los ángeles que me alientan y dan fuerzas para seguir adelante.
- Mis hermanos** Mirna Guadalupe y José Antonio. Por su importante apoyo en mi carrera y vida profesional.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Entidad que me permitió prepararme y desarrollarme profesionalmente para enfrentar los retos de la vida.

**Hospital Regional de
Cobán**

Por la oportunidad de desarrollar el presente proyecto dentro de sus instalaciones.

Lic. Miguel Alvarado Ax

Por su interés y apoyo profesional a lo largo de la realización de este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Descripción de la institución	1
1.1.1. Historia.....	1
1.1.2. Misión.....	2
1.1.3. Visión	2
1.1.4. Estructura organizacional.....	2
1.2. Unidades de servicio que utilizan vapor	3
1.2.1. Servicio de lavandería.....	3
1.2.2. Servicio de cocina	4
1.2.3. Central de equipos.....	5
1.3. Área de calderas y redes de distribución.....	5
1.3.1. Calderas piro-tubulares.....	5
1.3.2. Equipos auxiliares	6
1.3.3. Red de tuberías	7
1.3.4. Distribución de las unidades de servicio	8
2. FASE DE INVESTIGACIÓN.....	9
2.1. Diagnóstico situacional.....	9
2.1.1. Condiciones de operación.....	9

2.1.1.1.	Generación de vapor.....	9
2.1.1.2.	Demanda de vapor.....	10
2.1.2.	Condiciones en área de calderas	10
2.1.2.1.	Calderas y sus fallas.....	10
2.1.2.2.	Caldera 80 BHP.....	12
2.1.2.3.	Caldera 60 BHP.....	13
2.1.3.	Tratamiento del agua.....	13
2.1.3.1.	Incrustaciones.....	14
2.1.3.2.	Corrosión.....	14
2.1.3.3.	Arrastre de espuma y condensados.....	15
2.1.3.4.	Tratamiento químico.....	15
2.1.3.5.	Ablandadores de agua.....	16
2.1.3.6.	Parámetros del agua.....	17
2.1.4.	Redes de distribución	19
2.1.4.1.	Tuberías de vapor.....	19
2.1.4.2.	Aislamiento térmico.....	20
2.1.4.3.	Trapas de vapor.....	21
2.1.5.	Condiciones de mantenimiento.....	22
2.1.5.1.	Mantenimiento preventivo.....	23
2.1.5.2.	Mantenimiento correctivo.....	24
2.1.5.3.	Mantenimiento predictivo.....	25
2.2.	Estudio de ahorro energético	26
2.2.1.	Combustión	26
2.2.1.1.	Combustible.....	27
2.2.1.2.	Tablas de aforo de tanques.....	28
2.2.1.3.	Consumo de combustible.....	30
2.2.2.	Fuentes de pérdidas energéticas.....	32
2.2.2.1.	Incrustación y corrosión en tubos de humo.....	33
2.2.2.2.	Fugas en tuberías y accesorios	34
2.2.2.3.	Fallas de trampas de vapor.....	36

2.2.2.4.	Aislamiento térmico de tuberías	39
2.2.2.5.	Exceso de purgas.....	41
2.2.2.6.	Temperatura de gases en chimenea.....	43
2.2.2.7.	Resumen de pérdidas energéticas.....	44
3.	FASE DE SERVICIO TÉCNICO PROFESIONAL	47
3.1.	Propuesta de optimización en la generación y distribución de vapor.....	47
3.1.1.	Calderas.....	47
3.1.1.1.	Tratamiento de calderas inactivas.....	49
3.1.1.2.	Mantenimiento de quemadores.....	50
3.1.1.3.	Limpieza de tubos lado de humos.....	51
3.1.1.4.	Análisis de gases de combustión.....	52
3.1.2.	Redes de distribución.....	55
3.1.2.1.	Tuberías y accesorios.....	55
3.1.2.2.	Trampas de vapor.....	58
3.1.2.3.	Selección del aislamiento térmico	60
3.1.3.	Tratamiento del agua de alimentación	62
3.1.3.1.	Análisis del agua.....	63
3.1.3.2.	Tratamiento externo.....	64
3.1.3.3.	Tratamiento interno.....	64
3.2.	Análisis de costo-beneficio	65
3.3.	Propuesta del plan de mantenimiento	69
3.3.1.	Rutinas diarias	69
3.3.2.	Rutinas semanales.....	69
3.3.3.	Rutinas mensuales.....	70
3.3.4.	Rutinas semestrales.....	70
3.3.5.	Rutinas anuales	71
3.4.	Análisis de resultados.....	71

4.	FASE DE DOCENCIA.....	73
4.1.	Capacitación del personal.....	73
4.2.	Operación eficiente de las calderas	73
4.3.	Registros de operación	74
4.4.	Seguridad en el área de calderas	75
4.5.	Importancia del mantenimiento preventivo	77
4.6.	Fichas de mantenimiento	77
	CONCLUSIONES.....	79
	RECOMENDACIONES	81
	BIBLIOGRAFÍA.....	83
	APÉNDICES.....	85
	ANEXOS.....	95

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Organigrama de la subdirección de servicios generales y mantenimiento, Hospital Regional de Cobán	3
2.	Vista en planta del área de calderas y servicios a vapor.....	8
3.	Área de calderas	12
4.	Cambio de tubos en caldera	13
5.	Equipo ablandador de agua	17
6.	Trampa con fuga de vapor al exterior.....	22
7.	Configuración de tanques de combustible	28
8.	Diagrama para el cálculo de volumen de un tanque cilíndrico horizontal.....	29
9.	Falta de aislamiento o en malas condiciones.....	41
10.	Eficiencia contra temperatura de gases de la combustión	44
11.	Diferentes tipos de cepillos para limpieza de tubos de humo.....	52
12.	Escala de Bacharach para medición de opacidad de gases	54
13.	Erosión en tuberías	56
14.	Costo del aislamiento en función del espesor	61

TABLAS

I.	Especificaciones de las calderas	6
II.	Consumo de vapor por equipo	10
III.	Requerimientos, agua de alimentación según norma BS 2486.....	18
IV.	Requerimientos, agua de la caldera según norma BS 2486.	18
V.	Pérdida de energía según el espesor de la incrustación.....	33

VI.	Pérdidas por fugas de vapor por diámetro de orificio.....	35
VII.	Inventario y condiciones de trampas de vapor.....	37
VIII.	Resumen de pérdidas anuales.	45
IX.	Patrones para selección de trampas.....	59
X.	Materiales aislantes, ventajas y desventajas	62
XI.	Tratamiento recomendado del agua de alimentación.	65
XII.	Costo-beneficio del tratamiento del agua.....	66
XIII.	Costo-beneficio en el cambio de trampas de vapor con fallas	66
XIV.	Costo-beneficio del aislamiento de tuberías	67
XV.	Costo-beneficio del mantenimiento del sistema de combustión	67
XVI.	Balance de la inversión contra los beneficios de la propuesta.....	68
XVII.	Datos de consumo de combustible de la caldera de 80 BHP	72

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H₂S	Ácido sulfhídrico
H₂O	Agua
BHP	Caballos de potencia de caldera
C	Carbono
cm	Centímetro
SO₂	Dióxido de azufre
CO₂	Dióxido de carbono
gal	Galón
gpm	Galones por minuto
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
H₂	Hidrógeno
hr	Hora
kg	Kilogramo
lb	Libra
PSI	Libras por pulgada cuadrada
l	Litro
μS	Micro-Siemens
mg	Miligramo
mm	Milímetro
CO	Monóxido de carbono
N₂	Nitrógeno
ppb	Partes por billón
ppm	Partes por millón

%	Porcentaje
“	Pulgada
Q	Quetzales
BTU	Unidad térmica británica (cantidad de calor para aumentar 1 °F de una libra de agua destilada)

GLOSARIO

Alcalinidad	Es la capacidad de una sustancia química en solución acuosa para neutralizar ácidos.
Autoclave	Equipo utilizado para esterilizar material médico y de laboratorio por medio del calor transmitido por el vapor.
Carbonatos	Son las sales del ácido carbónico, poco solubles en el agua, forman parte de muchos minerales y rocas.
Carcasa	Conjunto de piezas duras y resistentes que dan soporte o protegen a otras partes de un equipo en su interior.
Comburente	Sustancia que provoca o favorece la combustión de otras sustancias.
Cédula 40	Medida de grosor o espesor de las paredes de una tubería, es el tipo de tubería utilizada para transmisión de fluidos y gases a presión.
Condensado	Fluido que debido a su enfriamiento pasa de estado gaseoso (vapor) a estado líquido (agua condensada).

Fosfatos	Químicos que previenen la formación de incrustaciones y óxido, se utilizan para controlar el pH y la dureza del agua.
Fotocelda	Interruptor eléctrico que sirve para detectar la luz de la llama producida por el quemador.
Galafateo	Acción de sellar juntas o costuras en estructuras, como ciertos tipos de tuberías.
Gel de sílice	También conocido como sílica gel, es catalogado como el producto de mayor absorción que se conoce.
Hollín	Partículas sólidas muy finas de color negro, producto de una combustión incompleta.
Hogar	Parte de la caldera donde se quema el combustible.
Golpe de ariete	Choque violento en una tubería debido al incremento instantáneo de presión, a cauda del cambio repentino de dirección o velocidad del vapor y condensado.
Hidrazina	Compuesto químico con olor similar al amoníaco, productor de espumas en el agua.
Índice de opacidad	Es el nivel de oscuridad con que salen los humos de la combustión, está compuesta por partículas sólidas y hollín sobrantes de dicha combustión.

Marmita	Equipo utilizado para calentar productos líquidos por medio de la transferencia de calor del vapor, sin entrar en contacto con el producto.
Manómetro	Instrumento utilizado para medir la presión de un equipo, sistema o medio.
<i>Manifold</i>	Sistema que agrupa todas las válvulas de distribución de vapor en un solo conjunto.
Material refractario	Materiales cerámicos cuyas propiedades permiten soportar temperaturas muy elevadas.
Norma BS-2486	Norma británica sobre requerimientos del agua de alimentación de las calderas.
pH	Índice que expresa el grado de acidez o alcalinidad del agua (concentración de hidrógeno).
Poder calorífico	Es la cantidad de energía por unidad de masa o volumen que se puede desprender al producirse una reacción química de oxidación.
Presostato	Es un dispositivo automático que detecta y utiliza la presión de un fluido para cerrar o abrir un circuito.
Resina catiónica	Material sintético utilizado para el ablandamiento del agua mediante el intercambio de iones de calcio y magnesio por iones de sodio.

Secuestrantes de oxígeno	Productos químicos encargados de extraer el oxígeno del agua con el fin de evitar la oxidación del metal.
Sulfito de sodio	Es un producto químico incoloro, por sus propiedades incoloras se utiliza para la protección de tuberías o para eliminar el cloro libre en el agua.
Tablas de aforo	Tablas que muestran la capacidad de un tanque a diferentes alturas de líquido contenido en él.
Taninos	Sustancias orgánicas en el agua provenientes de las plantas.
Válvula de alivio	Es un dispositivo empleado para evacuar un fluido de tal forma que no se sobrepase una presión determinada en el sistema.
Vapor flash	Vapor que se obtiene de la evaporación instantánea del condensado al pasar a una zona de menor presión.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación fue realizado en el Hospital Regional de Cobán, el cual trata sobre una propuesta para la optimización del proceso de generación y distribución de vapor, tomando en cuenta las condiciones actuales de operación y mantenimiento de los equipos en el área de calderas.

La falta de recursos económicos hace que los equipos trabajen en condiciones de bajo o nulo mantenimiento enfocándose más en un mantenimiento correctivo por fallas que en un mantenimiento preventivo o predictivo, lo que causa que los equipos se deterioren y provoquen gastos excesivos en reparaciones y altos consumos energéticos.

La primera parte de este trabajo trata sobre las generalidades del uso del vapor en el hospital y la demanda de vapor y los equipos que hacen uso del mismo para sus procesos.

La segunda parte trata sobre el diagnóstico y las condiciones de funcionamiento de los equipos, principalmente las dos calderas: de 80 y 60 BHP respectivamente, sus equipos auxiliares y la red de distribución de vapor; también; se hace un cálculo del ahorro energético que podría obtenerse al prevenir las causas que provocan gastos excesivos de los recursos.

La tercera parte muestra una propuesta para la optimización en la generación y distribución del vapor, las condiciones en que los equipos en el área de calderas deberían estar operando, una propuesta del mantenimiento preventivo mínimo que se debería seguir según las condiciones de operación, y por último, la capacitación que los operarios y personal de mantenimiento deben

tener para asegurar una operación eficiente, segura y rentable del área de calderas.

OBJETIVOS

General

Presentar una propuesta para la optimización del proceso de generación y distribución de vapor en el área de calderas con el fin de lograr ahorros en recursos para el hospital.

Específicos

1. Realizar un diagnóstico del estado actual del sistema de generación y distribución de vapor.
2. Identificar las áreas donde pueda haber una oportunidad para obtener ahorros de energía.
3. Hacer un cálculo del ahorro de energía que se obtendría al atacar las áreas de oportunidad.
4. Proponer las mejoras al sistema para obtener el ahorro energético y compararlo contra el gasto que se tendría que efectuar.
5. Proponer un programa de mantenimiento preventivo de acuerdo con las condiciones actuales de operación.

INTRODUCCIÓN

El Hospital Regional de Cobán cuenta con un área de calderas donde se genera vapor por medio de dos calderas piro-tubulares marca York Shipley de 60 y 80 BHP; el vapor es distribuido al hospital y utilizado en servicios como lavandería, cocina, central de equipos; en procesos de secado de ropa, producción de agua caliente y esterilización de instrumental médico.

El vapor es una fuente de energía muy eficiente pues se considera limpia, segura y rentable; sin embargo, si este no es generado y distribuido bajo ciertas condiciones de operación se puede volver todo lo contrario llegando a ser una operación de mucho riesgo.

Dadas las condiciones de operación actuales se detectan muchas oportunidades para hacer de la generación y distribución de vapor un proceso más eficiente, optimizando el uso de los recursos y obteniendo ahorros de energía que redundan en ahorros monetarios importantes para una institución como el hospital con recursos económicos limitados.

Por lo anterior, el presente trabajo de graduación hace un estudio de las condiciones actuales de los equipos, de las áreas donde se puede obtener ahorros de energía, de las mejoras que se deben implementar y del plan de inspección y mantenimiento preventivo necesario para una operación con mínimo de fallas.

1. GENERALIDADES

1.1. Descripción de la institución

El Hospital Regional de Cobán es una entidad gubernamental que forma parte del Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social; está ubicado en la 8° calle 1-24 zona 11 de la ciudad de Cobán Alta Verapaz, aproximadamente a 220 kilómetros de la ciudad de Guatemala. Su cobertura abarca el departamento de Alta Verapaz, área norte de Baja Verapaz, sur de Petén, oriente y nororiente de Quiché y oeste de Izabal; el hospital cuenta con especialidades en medicina interna, traumatología, cirugía general, neurología, pediatría, ginecología y obstetricia.

1.1.1. Historia

El hospital fue fundado durante el gobierno del General Justo Rufino Barrios en el año de 1879; años más tarde, durante el gobierno del Lic. Manuel Estrada Cabrera en 1905, el hospital fue trasladado al edificio ubicado en la 3° calle y 5° avenida de la zona 3 de la ciudad de Cobán, donde actualmente funciona la Escuela Nacional de Enfermería.

Debido a la creciente demanda de servicios, en el año de 1976 siendo Presidente de la República el General Kjell Eugenio Laugerud García, se inició la construcción de las actuales instalaciones del hospital y en 1977 fue inaugurado con el nombre de Hospital Regional Hellen Lossi de Laugerud, en honor a la entonces primera dama de la nación. Desde entonces, se ha convertido en una institución pública de beneficio social que proporciona asistencia médica gratuita las 24 horas del día para aproximadamente un millón y medio de la población.

1.1.2. Misión

Somos una institución que da asistencia médica permanente de calidad para los usuarios, con calidez en el contexto de igualdad de derechos y oportunidades, para mejoramiento del estado del bienestar de la población indígena de la región norte del país, con servicios de hospitalización, emergencias y ambulatorio, contribuyendo a la recuperación, rehabilitación y promoción de la salud, con principios de humanidad, unidad y ética.

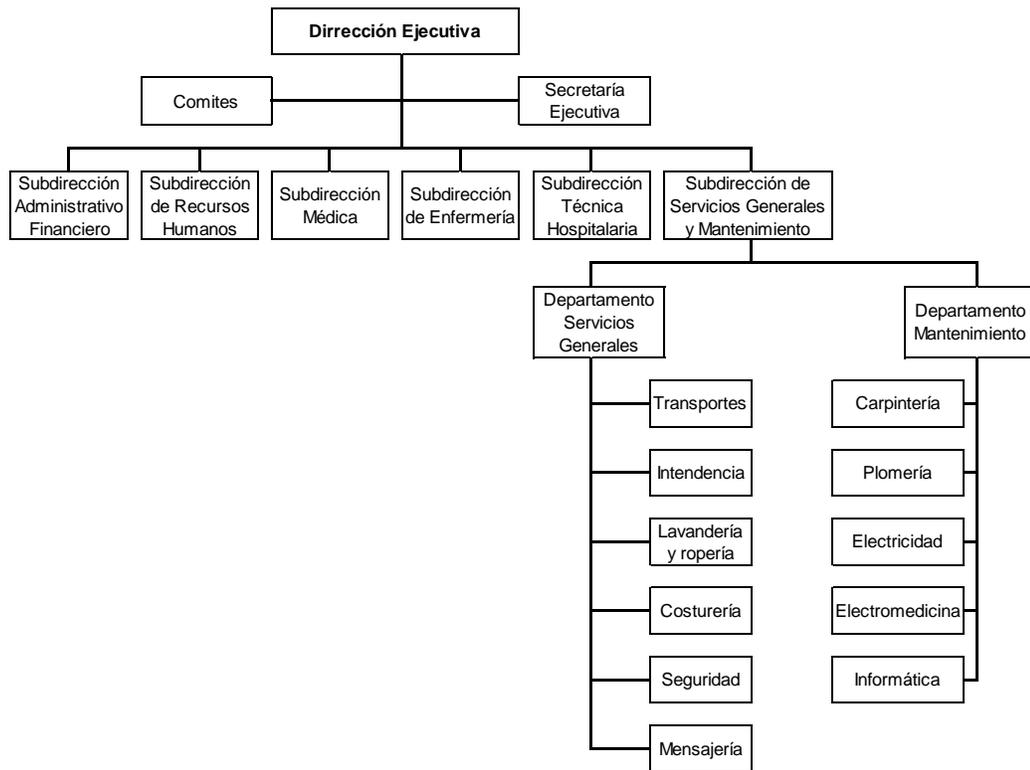
1.1.3. Visión

Guatemala en el año 2020, todas y todos los guatemaltecos en las diferentes etapas del ciclo de vida tienen acceso equitativo a servicios de salud integrales e integrados, con enfoque humano de calidad y pertinencia cultural a través de una efectiva coordinación interinstitucional e intersectorial.

1.1.4. Estructura organizacional

El hospital está organizado en forma horizontal, donde seis subdirecciones reportan a un director ejecutivo, las subdirecciones se dividen en departamentos, y estos a su vez se dividen en los diferentes servicios. En la figura 1 se describe la estructura organizacional, sin embargo, en esta solo se ha detallado el departamento de la subdirección de servicios generales y mantenimiento por ser el área de interés para este trabajo.

Figura 1. **Organigrama de la Subdirección de Servicios Generales y Mantenimiento, Hospital Regional de Cobán**



Fuente: elaboración propia.

1.2. Unidades de servicio que utilizan vapor

1.2.1. Servicio de lavandería

La disponibilidad de vapor en el área de lavandería es muy importante para el secado de la ropa; se cuenta con dos secadoras industriales que trabajan 5 horas diarias y que, sin embargo, no son suficientes para el secado de toda la ropa que el hospital utiliza.

- Secadora marca Continental CG115-125
 - Capacidad: 125 lb
 - Conexión de vapor: 3/4"
 - Consumo de vapor a 100PSI: 11,7 BHP
 - Calentamiento a 100 PSI: 405 000 BTU/hr

- Secadora marca Cissel LR50CD425
 - Capacidad: 150 lb
 - Conexión de vapor: 3/4"
 - Consumo de vapor a 100PSI: 18,8 BHP
 - Calentamiento a 100 PSI: 648 000 BTU/hr

Como parte del proyecto, a ambas secadoras se les cambiaron las trampas de vapor porque presentaban fallas en su mecanismo interior, las mismas permitían el paso de vapor vivo hacia la tubería de condensado. También fue reparada una de las tuberías de ingreso de vapor al intercambiador de calor de la secadora Continental por fugas de vapor.

1.2.2. Servicio de cocina

En el área de cocina el vapor se utiliza para el calentamiento de agua, esta operación se hace por medio de 2 marmitas idénticas cuyas especificaciones se detallan a continuación.

- Marca: Legión
- Modelo: LP-40
- Capacidad: 40 gal
- Presión de operación: 30 PSI

Dichas marmitas fueron reactivadas como parte del proyecto, conectándolas a las redes de distribución de vapor, probando y calibrando los equipos auxiliares como reguladores de presión, válvulas de alivio y trampas de vapor, logrando las condiciones adecuadas de operación.

1.2.3. Central de equipos

La central de equipos cuenta con 2 autoclaves a vapor; estos son utilizados para la esterilización de equipos e instrumentos quirúrgicos usados en salas de operaciones y cirugía ambulatoria.

- Marca: Vernitron
- Modelo: R2038CPY-1
- Serie: 58781 y 58782

Ambos autoclaves carecen de tubería para retorno de condensados, por lo que el mismo es drenado hacia los desagües pluviales, lo que genera pérdidas de recursos e ineficiencias en el proceso.

1.3. Área de calderas y redes de distribución

1.3.1. Calderas piro-tubulares

En este tipo de calderas, el humo caliente proveniente del hogar circula por el interior de los tubos; el calor liberado en el proceso de combustión es transferido a través de las paredes de los tubos al agua que los rodea, quedando todo el conjunto encerrado dentro de la carcasa de la caldera. A través del recorrido, el humo cede gran parte de su calor al agua, parte del agua es vaporizada acumulándose en la parte superior del cuerpo de la caldera en forma

de vapor saturado; esta vaporización parcial del agua es la que provoca el aumento de presión que puede visualizarse en el manómetro de la caldera.

El hospital cuenta con 2 calderas piro-tubulares marca York Shipley de 80 y 60 BHP respectivamente cuyas especificaciones de detallan a continuación.

Tabla I. **Especificaciones de las calderas**

Caldera	80 BHP	60 BHP
Marca	York Shipley	York Shipley
Modelo	SPHV-80-2 94220	SPHV-60-2 9394
Año	1976	1976
Presión de diseño	150 PSI	150 PSI
Capacidad	2 678 000 BTU	2 009 000 BTU
Producción de vapor	2 760 lb/hr	2 070 lb/hr
Pasos de humo	3	3

Fuente: elaboración propia.

1.3.2. Equipos auxiliares

Además de las partes propias de las calderas, estas cuentan con los siguientes equipos auxiliares en el área de calderas:

- Tanque de condensados de 250 gal
- Bomba para aplicación de químicos que se encuentra fuera de uso

- Bomba de alimentación de agua, 12 gpm, 275 °F, 300 PSI
- Tanque ablandador de agua de 1 pie cúbico de resina catiónica
- Tanque de salmuera para ablandador
- 2 tanques de combustible con capacidad total de 1 764 gal

1.3.3. Red de tuberías

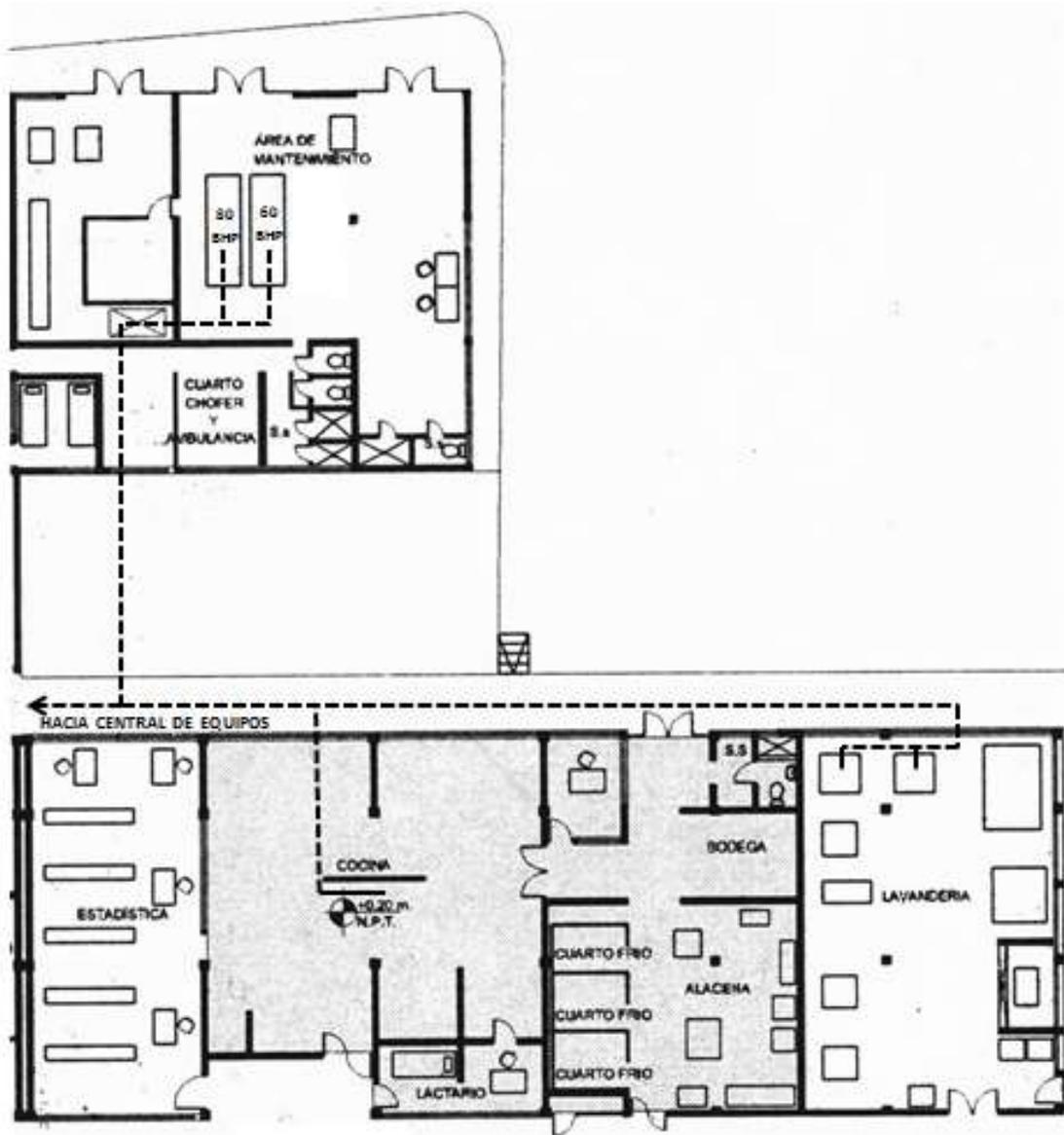
El sistema de generación y distribución de vapor cuenta aproximadamente con las siguientes cantidades de tubería para la distribución del vapor:

- 113 metros de tubería de 2" de hierro negro cédula 40 para vapor.
- 113 metros de tubería de 2" de hierro negro cédula 40 para retorno de condensados.
- 10 metros de tubería de 3/4" de hierro negro cédula 40 para conexión de vapor a lavandería.
- 10 metros de tubería de 3/4" de hierro negro cédula 40 para retorno de condensados de lavandería.
- 20 metros de tubería de 3/4" de hierro negro cédula 40 para conexión de vapor a central de equipos.
- 15 metros de tubería de 3/4" de acero galvanizado para conexión de vapor a las marmitas.
- 15 metros de tubería de 3/4" de acero galvanizado para retorno de condensados de marmitas.

Se encontraron 30,5 metros de tubería de 3/4" y 21 metros de tubería de 2" sin aislamiento térmico o deteriorado.

1.3.4. Distribución de las unidades de servicio

Figura 2. Vista en planta del área de calderas y servicios a vapor



Fuente: elaboración propia.

2. FASE DE INVESTIGACIÓN

2.1. Diagnóstico situacional

Las condiciones actuales de los equipos en el área de calderas, han sufrido gran desgaste a través del tiempo debido a las condiciones de operación y bajo nivel de mantenimiento, que incluyen un inadecuado tratamiento del agua; es por esto que todo el sistema presenta un gran deterioro.

2.1.1. Condiciones de operación

2.1.1.1. Generación de vapor

La generación de vapor de agua en una caldera es un proceso que requiere grandes cantidades de energía; se produce mediante la transferencia de calor de un proceso de combustión hacia el agua dentro de la caldera donde la temperatura y la presión son elevadas, lo cual convierte la misma en vapor saturado.

En el hospital, el vapor es generado por dos calderas piro-tubulares horizontales que trabajan por turnos de 5 horas al día y cuyas capacidades teóricas de producción de vapor son:

- Caldera de 80 BHP 2 760 lb/hr
- Caldera de 60 BHP 2 070 lb/hr

2.1.1.2. Demanda de vapor

La demanda de vapor está definida por el consumo de los equipos dentro de las unidades de servicio de lavandería, cocina y central de equipos.

Tabla II. Consumo de vapor por equipo

Unidad de servicio	Equipo	kBTU/hr	Kg/hr	lb/hr
Lavandería	Secadora Cissel	539	252	556
	Secadora Continental	405	189	418
Cocina	Marmitas LP-40 (1)	108	51	111
	Marmitas LP-40 (2)	108	51	111
Central de equipos	Autoclave (1)	31	14	32
	Autoclaves (2)	31	14	32
Demanda de vapor		1 222	571	1 260

Fuente: elaboración propia.

Por lo que el consumo máximo de vapor, asumiendo que todos los equipos trabajen al mismo tiempo sería de 1 260 lb/hr o 1 222 kBTU/hr que es el calor aprovechado por la caldera; con esto se deduce que ambas calderas son capaces de abastecer la demanda de vapor.

2.1.2. Condiciones en área de calderas

2.1.2.1. Calderas y sus fallas

La caldera es un sistema diseñado para transmitir el calor generado por un proceso de combustión a un fluido contenido en la caldera que por lo general es

agua, con el objetivo de producir vapor. La caldera se compone básicamente de: el hogar o cámara de combustión; el quemador que se encarga de realizar la mezcla: combustible, oxígeno y calor; el intercambiador de calor donde se realiza la transferencia de energía térmica producida por la combustión al agua y la salida de humos que es el conducto que conduce los gases de combustión hacia la chimenea.

La caldera es el equipo principal en un sistema de producción de vapor, y es muy importante que las fallas sean detectadas a tiempo para prevenir accidentes y gastos innecesarios. A continuación se enumeran las causas más comunes de fallas en las calderas:

- Falta de normas de mantenimiento
- Fallas en la ejecución del mantenimiento
- Inadecuado tratamiento del agua de alimentación
- Mal control del nivel de agua
- Limpieza inadecuada
- Mala graduación de combustión
- Abusos o descuidos de operación
- Inadecuado régimen de purgas

Debido a limitaciones económicas, ambas calderas en el hospital han estado trabajando durante mucho tiempo sin el mantenimiento ni el tratamiento de agua adecuados, generando con esto incrustaciones y corrosión en sus partes internas, además de otras fallas en sus equipos auxiliares.

Figura 3. **Área de calderas**



Fuente: elaboración propia.

2.1.2.2. Caldera 80 BHP

Al inicio del proyecto esta caldera se encontraba parada a la espera de ser reparada debido a incrustaciones y corrosión severas en sus tubos; durante la realización del proyecto fue reparada y puesta en funcionamiento: se cambiaron 46 tubos de la parte inferior de la caldera, lugar donde más afectados estaban por la corrosión. La corrosión era tal que el agua que rodeaba los tubos ingresaba a su interior mezclándose con el humo de la combustión que corre a través de ellos.

Figura 4. **Cambio de tubos en caldera**



Fuente: elaboración propia.

2.1.2.3. Caldera 60 BHP

Esta caldera presenta condiciones similares a la de 80 BHP, incrustaciones y corrosión en tubos, aunque en menor grado. Actualmente la caldera se encuentra parada por problemas en su sistema de combustión, específicamente el quemador que necesita cambio de varias piezas incluyendo el ventilador. Se esperan fondos para realizarle las reparaciones requeridas y que la caldera quede en buenas condiciones de operación.

2.1.3. Tratamiento del agua

El tratamiento del agua de alimentación es fundamental para alargar la vida de una caldera, manteniéndola libre de problemas operacionales, reparaciones de importancia y de accidentes.

El agua en condiciones naturales siempre tiene algún grado de impurezas y contaminantes: sedimentos, ácidos, minerales, etc.; el nivel de contaminación dependerá de las condiciones atmosféricas y climáticas, de las características geológicas de la región y de la distribución de las aguas entre superficiales y subterráneas.

La falta de un adecuado tratamiento para atacar las impurezas en el agua puede resultar en problemas graves para las calderas por la generación de incrustaciones, corrosión y arrastres de espuma y condensados hacia las redes de distribución.

2.1.3.1. Incrustaciones

Las incrustaciones corresponden a depósitos de carbonatos y silicatos de sodio y magnesio en las superficies en contacto con el agua y el vapor, produciendo los siguientes efectos.

- Reducción de la cantidad de calor transmitido al agua por medio de los tubos de la caldera.
- Obstrucción en redes de distribución y en los equipos que utilizan el vapor para sus procesos.
- Pérdidas caloríficas por purgas frecuentes.
- Costos excesivos de combustible, al ser necesaria más energía para la evaporación del agua en el interior de la caldera.
- Costos elevados de limpieza, reparaciones e inspecciones.

2.1.3.2. Corrosión

Las principales fuentes de corrosión se deben a la reacción del oxígeno con los componentes metálicos de la caldera y a la sobre concentración de sales

alcalinas en zonas de elevadas cargas térmicas; la corrosión produce los siguientes efectos:

- Fragilidad del acero que afecta la integridad de los tubos y la carcasa de la caldera.
- Filtración de vapor hacia el lado de humos en el interior de los tubos.
- Fugas de vapor en tuberías de distribución y accesorios por picaduras, lo cual también provoca pérdidas de vapor.
- Ineficiencias energéticas del sistema de generación y distribución de vapor.
- Costos elevados por remoción de tuberías y accesorios.

2.1.3.3. Arrastre de espuma y condensados

El arrastre de condensado en una caldera se relaciona con el suministro de vapor húmedo hacia la red de distribución, y son provocados por una excesiva alcalinidad, sólidos disueltos y contenido de sílice en el agua, produciendo los siguientes efectos:

- Mala calidad de vapor por exceso de humedad
- Bajo poder calorífico del vapor generado
- Mal rendimiento de los equipos que usan el vapor

2.1.3.4. Tratamiento químico

Este tratamiento se hace aplicando productos químicos al agua de alimentación en una dosis que depende de las condiciones del agua; antes de utilizar estos productos debe hacerse un análisis del agua fuera y dentro de la caldera; generalmente estos productos químicos son llamados secuestradores de oxígeno, dispersantes, anti incrustantes, protectores y neutralizantes.

Actualmente no se hace el tratamiento químico al agua de alimentación, por lo que las calderas y sus partes, tuberías y demás equipos que se sirven del vapor para realizar sus procesos, están seriamente expuestos a las impurezas del agua que pueden ocasionar todos los problemas mencionados anteriormente.

2.1.3.5. Ablandadores de agua

La función de los ablandadores es remover la dureza del agua. Es decir, los minerales que producen la dureza en el agua como el calcio y magnesio son removidos casi por completo del agua a ser tratada. Los ablandadores por intercambio iónico son el método más eficiente y económico para eliminar la dureza del agua. El principio sobre el que opera es simple: el ablandador por intercambio iónico reemplaza los iones de calcio y magnesio por iones de sodio.

El uso de ablandadores para remover la dureza del agua es importante para evitar incrustaciones y obstrucciones que generan gastos excesivos por costosas reparaciones y altos consumos de combustible.

Durante el proyecto se reactivó el equipo ablandador de agua bajando considerablemente la dureza del agua, este equipo comprende un tanque de resina catiónica de 1 pie cúbico, un tanque para salmuera que sirve para regenerar la resina y un sistema de control automático.

Figura 5. **Equipo ablandador de agua**



Fuente: elaboración propia.

2.1.3.6. Parámetros del agua

Las siguientes tablas muestran los requerimientos del agua de alimentación para evitar incrustaciones y corrosión en la caldera. Estos parámetros son tomados con base en la norma británica BS-2486 para calderas de menos de 145 PSI.

Tabla III. **Requerimientos, agua de alimentación según norma BS 2486**

PARÁMETRO	VALOR REQUERIDO
Dureza total	< 2 ppm
Contenido de oxígeno	< 8 ppb
Dióxido de carbono	< 25 mg/l
Contenido total de hierro	< 0,05 mg/l
Contenido de cobre	< 0,01 mg/l
Alcalinidad total	< 25 ppm
Contenido de aceite	< 1 mg/l
pH a 25°C	8.9 - 9.5
Condición general	Incoloro, claro y libre de agentes insolubles

Fuente: Thermal engineering.

http://www.thermal.cl/prontus_thermal/site/edic/base/port/documentos.html. Consulta: 6 de agosto de 2016.

Tabla IV. **Requerimientos, agua de la caldera según norma BS 2486**

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 µS/cm
Condición general	Incoloro, claro y libre de agentes insolubles

Fuente: Thermal engineering.

http://www.thermal.cl/prontus_thermal/site/edic/base/port/documentos.html. Consulta: 6 de agosto de 2016.

2.1.4. Redes de distribución

La red de distribución de vapor es el conjunto de elementos que conectan al generador de vapor con los equipos que lo utilizan para realizar sus respectivos procesos; entre los elementos que se encuentran en una red de distribución se encuentran los siguientes:

- Red de tuberías principales y secundarias
- Aislamientos térmicos
- Válvulas reguladoras de presión
- Válvulas de seguridad
- Purgadores de vapor
- Red de retorno de condensados
- Sistema de trampas para evacuación de condensado
- Soportes, anclajes, abrazaderas, etc.
- Instrumentos de medición de presión y temperatura

2.1.4.1. Tuberías de vapor

El vapor es la forma más eficaz de transferir energía de una fuente central a diversos puntos de uso; la presión del vapor actúa como la fuerza motriz para mover el vapor a los puntos requeridos siendo un buen medio para transferir y controlar el flujo de energía a lo largo de una instalación; la clave es lograr que sea tan efectiva y eficiente como sea posible.

El vapor se distribuye por medio de tuberías y es necesario diseñar el sistema con el fin de lograr las condiciones requeridas y reducir lo más posible las pérdidas.

La edad de las tuberías, las condiciones de operación, la falta de inspección y mantenimiento, así como el pobre tratamiento del agua, hicieron que las tuberías estén en muy malas condiciones: corrosión y erosión, fugas en varios puntos, lo que hace que el consumo de vapor sea excesivo; por estas razones, el proyecto incluye el cambio de la gran mayoría de tuberías principales y secundarias así como su aislamiento.

2.1.4.2. Aislamiento térmico

Lo ideal en un sistema de vapor es que toda la energía que salga del área de calderas llegue a las unidades de proceso. Sin embargo, la diferencia entre la temperatura del vapor y la del medio ambiente hace que existan algunas pérdidas; por eso es necesario el aislamiento térmico de las líneas incluyendo las de retorno de condensado. La regla general es de 1 pulgada de aislamiento por 100°F de temperatura del vapor.

El aislamiento típico es de fibra de vidrio con revestimiento metálico e idealmente que los accesorios y elementos auxiliares también estén aislados, y es muy importante que el aislamiento debe mantenerse seco.

Factores afectados por la falta de aislamiento de tuberías:

- Pérdidas de calor al medio ambiente
- Reducción de la eficiencia energética del vapor
- Mayor consumo de combustible
- Condensación en las redes de vapor
- Suministro de vapor de mala calidad a los equipos
- Peligro de contacto con la tubería caliente para los operarios

2.1.4.3. Trampas de vapor

Las trampas de vapor son válvulas automáticas cuyas funciones son: extraer el condensado y descargarlo a las tuberías de condensado, extraer el aire y otros gases no condensables, evitar que escape vapor vivo hacia la tubería de condensados y en cierto grado mantener el vapor seco.

Existen dos tipos de fallas en las trampas de vapor y que son difíciles de detectar:

- Falla de posición abierta: este tipo de falla permite el paso de vapor vivo a la red de retorno de condensados. Este caso genera pérdidas de energía en el proceso al desaprovechar el poder calorífico del vapor que se escapa del sistema.
- Falla de posición cerrada (trampa bloqueada): también se les llama trampas frías, en este caso la trampa evita que el condensado sea descargado, el condensado estancado hace que la temperatura de la trampa disminuya.

Otro tipo de fallas en las trampas que son más fáciles de detectar son las fugas de vapor al exterior del sistema, por empaques u orificios en las mismas que hacen que se pierda vapor del sistema, este tipo de fallas son las que más pérdidas representan.

Durante el proyecto se encontraron fallas de los tres tipos, seis trampas con fallas de posición abierta, una de posición cerrada y una con fuga de vapor al exterior.

Figura 6. **Trampa con fuga de vapor al exterior**



Fuente: elaboración propia.

2.1.5. Condiciones de mantenimiento

El uso de un equipo o instalación se va deteriorando paulatinamente con el tiempo; este deterioro llega a producir fallas que a su vez pueden provocar problemas como paros en la producción, reparaciones costosas y hasta accidentes. Sin embargo, se pueden tomar medidas para disminuir las posibilidades de fallas y conservar un nivel adecuado de funcionamiento de los equipos.

Las condiciones de los equipos en el hospital se han ido deteriorando con el uso ya que por razones económicas no se ha llevado un adecuado plan de mantenimiento preventivo el cual ha dejado de ser una prioridad, enfocándose

casi exclusivamente al mantenimiento correctivo, invirtiendo importantes cantidades de dinero en reparaciones mayores en las calderas y redes de distribución.

2.1.5.1. Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo es aquel que se realiza de manera anticipada con el fin de prevenir el surgimiento de fallas y averías, permite disminuir paros de operación, aumentar la vida de los equipos, disminuir costos por reparaciones y evitar accidentes.

El mantenimiento preventivo debe realizarse de forma planificada, periódica y sistemática para prevenir condiciones desfavorables. Su función es conocer el estado de los equipos e instalaciones para programar su mantenimiento en el momento más oportuno con disponibilidad de tiempo y recursos.

Ventajas del mantenimiento preventivo:

- Confiabilidad: los equipos operan en mejores condiciones de seguridad ya que se conocen sus estados de funcionamiento.
- Disminución de paradas y del tiempo de estas en los equipos.
- Mayor duración de los equipos e instalaciones.
- Carga uniforme de trabajo para el personal de mantenimiento debido a la programación de actividades.
- Existencia óptima de repuestos que permite reducir costos.
- Menor costo por reparaciones.

Desventajas del mantenimiento preventivo:

- Se requiere experiencia del personal de mantenimiento.

- Es necesario tener las recomendaciones del fabricante para el programa de mantenimiento a los equipos.
- No permite determinar con exactitud el desgaste o depreciación de las piezas de los equipos.

2.1.5.2. Mantenimiento correctivo

Se denomina mantenimiento correctivo al que se realiza con la finalidad de reparar fallos o defectos que se presentan en los equipos; es la forma más básica de mantenimiento puesto que supone simplemente reparar lo que se ha descompuesto. El mantenimiento preventivo consiste básicamente en localizar y corregir las averías o desperfectos que impiden que un equipo funcione de forma normal.

Ventajas del mantenimiento correctivo:

- El mantenimiento correctivo no genera gastos fijos
- A corto plazo puede tener un buen resultado económico
- Solo se gasta dinero cuando se necesita hacerlo
- No es necesario programar ni prever actividades

Desventajas del mantenimiento correctivo:

- La vida de los equipos se acorta.
- La producción se vuelve impredecible y poco fiable.
- Se asumen riesgos económicos en momentos importantes.
- Impide el diagnóstico de las fallas al ignorarse sus causas, y por esta razón las averías que causan las fallas pueden repetirse.

- Las averías no solo ocasionan riesgos a la producción sino también la seguridad de las personas o medio ambiente.

2.1.5.3. Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo se basa en la medición, seguimiento y monitoreo de las condiciones operativas de los equipos. La información que arroja este seguimiento sobre los equipos permite calcular o prever, con cierto margen de error, cuando fallará alguna de sus piezas. Además de prever el fallo de una pieza, el mantenimiento predictivo ofrece la ventaja de eliminar existencias de inventarios, puesto que la compra del repuesto se realiza cuando se necesita.

Ventajas del mantenimiento predictivo:

- Reduce los tiempos de parada.
- Permite seguir la evolución de un defecto en el tiempo.
- Permite confeccionar un historial del comportamiento de los equipos.
- Toma de decisiones sobre la parada de un equipo en momentos críticos.
- Permite el análisis estadístico de averías.

Desventajas del mantenimiento predictivo:

- La implementación requiere una inversión inicial elevada
- El proceso de implementación requiere de mucho tiempo
- Requiere el convencimiento de todo el personal
- Se necesita un conocimiento técnico elevado

2.2. Estudio de ahorro energético

El ahorro de recursos como el agua, la electricidad y el combustible en la generación de vapor es cada día más importante por el aumento en su precio. Aunque todos los recursos son importantes, este estudio se centra en el ahorro del combustible de la caldera para generar vapor.

2.2.1. Combustión

La combustión es un proceso físico-químico en el que un elemento combustible se combina con otro elemento comburente que produce luz, calor y productos químicos resultantes de la reacción. Como consecuencia de esta reacción de combustión se tiene la formación de una llama por medio de un quemador.

- **Combustión completa:** es la reacción en la que el combustible se quema hasta el máximo grado de oxidación. En consecuencia, no habrá sustancias combustibles en los humos. En los productos de la combustión se pueden encontrar, N_2 , CO_2 , H_2O , y SO_2 .
- **Combustión incompleta:** es la reacción en la que el combustible no se oxida completamente. Se forman sustancias llamadas in-quemados como el monóxido de carbono (CO) y otros como H_2 , H_2S y C . Estas son las sustancias contaminantes que escapan a la atmósfera en los gases de combustión.
- **Combustión con exceso de aire:** en este tipo de combustión es típica la presencia de oxígeno en los gases de combustión. El exceso de aire permite evitar la combustión incompleta y la formación de in-quemados, trae la consecuencia de pérdida de

calor en los productos de la combustión, reduciendo la temperatura y la eficiencia de combustión al reducirse la longitud de la llama.

- Combustión con déficit de aire: dado que el aire suministrado es menor al necesario para que se produzca oxidación completa del combustible, se producen in-quemados.
- Rendimiento de la combustión: es la relación entre el calor útil obtenido y el calor total que aporta el gas combustible.

$$\eta = \frac{Q_{\text{aprov}}}{Q_{\text{ent}}} \times 100$$

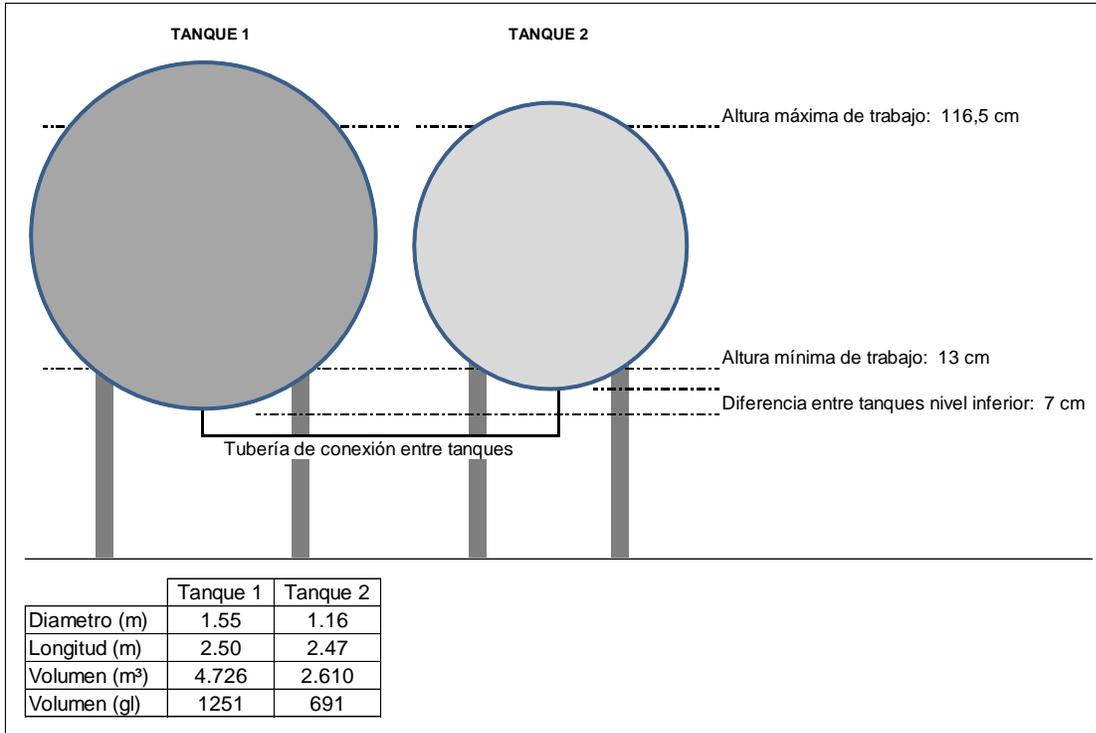
Donde:

- η : rendimiento de combustión
- Q_{aprov} : calor aprovechado por la caldera
- Q_{ent} : calor aportado por el combustible

2.2.1.1. Combustible

Las calderas del hospital utilizan diésel como combustible, este es almacenado en dos tanques cilíndricos horizontales conectados por una tubería formando un sistema de vasos comunicantes entre ambos tanques como se ve en la figura 7.

Figura 7. Configuración de tanques de combustible



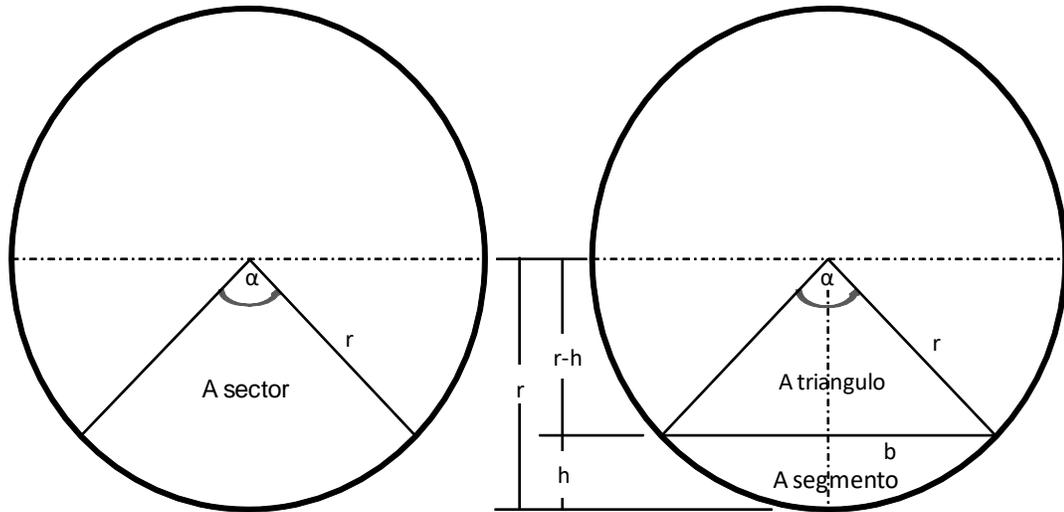
Fuente: elaboración propia.

Para obtener el consumo de combustible fue necesario construir tablas de aforo para cada tanque a partir de las medidas de diámetro y longitud descritas en la figura 7.

2.2.1.2. Tablas de aforo de tanques

Para construir las tablas de aforo de tanques cilíndricos horizontales, se necesita una ecuación que dé el volumen de combustible en los tanques a diferentes alturas; dicha fórmula se construye usando la figura 8 a continuación.

Figura 8. Diagrama para el cálculo de volumen de un tanque cilíndrico horizontal



Fuente: elaboración propia.

$$V = (A \text{ sector} - A \text{ triángulo}) * L$$

$$V = \text{ArCos} \left(\frac{r-h}{R} \right) r^2 - (r-h) r \text{Sen} \left(\text{ArCos} \left(\frac{r-h}{r} \right) \right) * L$$

Donde:

- V: volumen del tanque
- r: radio del cilindro del tanque
- h: altura del combustible en el tanque
- L: longitud del tanque

Con esta ecuación se puede obtener el volumen del combustible en un tanque cilíndrico horizontal a cualquier altura y construir las tablas de aforo de los tanques; esto ayudará a llevar un mejor control del consumo de combustible de

las calderas en el hospital. El procedimiento de deducción de la ecuación se encuentra en el anexo 1 de este trabajo.

2.2.1.3. Consumo de combustible

Para el consumo de combustible fue necesario consultar registros históricos del hospital, dado que la caldera de 80 BHP se encontraba parada por reparaciones; sin embargo se dedujo que el consumo de diesel por la caldera al inicio del proyecto es muy elevado, debido a los múltiples problemas existentes tanto en la misma caldera como en la red de tuberías; el consumo promedio es de 41 gal/día o 21 gal/hr de trabajo efectivo de caldera; con estos y con otros datos se puede encontrar la eficiencia de la caldera y el costo por libra del vapor producido.

- Eficiencia de la caldera

$$\eta = \frac{M_a (h_v - h_a)}{V_c \cdot PC} \times 100$$

Donde:

- η : eficiencia de la caldera (%)
- M_a : masa de agua transformada en vapor (lb/hr)
- h_v : entalpia del vapor (BTU/lb)
- h_a : entalpia del agua (BTU/lb)
- V_c : volumen del combustible utilizado (gl/hr)
- PC : poder calorífico del diesel (BTU/gl)

$$\eta = \frac{1\ 260\ \text{lb/hr} (1\ 184,47 - 48,73)\ \text{BTU/lb}}{21\ \text{gl/hr} * 128\ 450\ \text{BTU/gl}} \times 100$$

$$\eta = 53\%$$

Una eficiencia muy baja que debe subir al atacar las fuentes de pérdidas energéticas.

- Costo por libra de vapor

Se necesita encontrar el costo unitario de energía del combustible.

$$C_e = \frac{100 C_f}{PC * \eta}$$

Donde:

- C_e : costo unitario de la energía (Q/kBTU)
- C_f : costo unitario del combustible (Q/lb)
- PC: poder calorífico del combustible (BTU/lb)
- η : eficiencia de la caldera (%)

Para obtener el costo unitario del diésel se tiene que:

$$C_f = \frac{\text{Precio del diesel}}{\text{Densidad del diesel}}$$

$$C_f = \frac{17 \text{ Q/gl}}{6,93 \text{ lb/gl}}$$

$$C_f = 2,45 \text{ Q/lb}$$

Con éste dato se obtiene el costo unitario de la energía:

$$C_e = \frac{100 * 2,45 \text{ Q/lb}}{18\ 397 \text{ kBTU/lb} * 53}$$

$$C_e = 0,25 \text{ Q/kBTU}$$

Fórmula para el costo unitario del vapor:

$$C_s = C_e (h_v - h_a)$$

Donde:

- C_s : costo unitario del vapor (Q/lb)
- C_e : costo unitario de la energía (Q/kBTU)
- h_v : entalpia del vapor a presión de la caldera (kBTU/lb)
- h_a : entalpia del agua de alimentación (kBTU/lb)

$$C_s = 0,25 \text{ Q/kBTU} (1,1845 - 0,0487) \text{ kBTU/lb}$$

$$C_s = 0,28 \text{ Q / lb de vapor}$$

2.2.2. Fuentes de pérdidas energéticas

La eficiencia en la generación y distribución de vapor en el área de calderas y redes de distribución del vapor se ve afectada por diversos factores derivados del uso, la operación y las condiciones ambientales. Durante el proyecto se detectaron condiciones en equipos que estaban generando ineficiencias y pérdidas de energía que al final derivaban en gastos excesivos en consumo de combustible, las cuales se analizan a continuación.

2.2.2.1. Incrustación y corrosión en tubos de humo

Las incrustaciones formadas por depósitos de minerales en las superficies internas de la caldera tales como calcio, magnesio y sílice, forman una capa aislante al calor afectando también a los tubos de humo, cuya función es la de transferir el calor de los gases de combustión al agua de la caldera; dicha capa aislante provoca grandes pérdidas de energía y de eficiencia en la caldera que redundan en gastos excesivos por consumo de combustible.

La caldera de 80 BHP fue abierta para una reparación mayor. Se encontraron los tubos de humo severamente incrustados y con perforaciones en toda su superficie producto de la corrosión.

Sin el tratamiento adecuado del agua se pueden generar incrustaciones de hasta 1/8" en menos de un año; y una incrustación de este nivel, según la tabla V, da un incremento en el consumo de combustible del 18 %.

Tabla V. **Pérdida de energía según el espesor de la incrustación**

Espesor de incrustación (Pulg.)	Gasto extra de combustible (%)
1/32	8,5
1/16	12,4
1/8	18,0
1/4	25,0
3/8	40,0
1/2	55,0

Fuente: elaboración propia.

- Consumo de combustible al día: 41 gal
- Consumo de combustible al año: 14 965 gal
- Consumo extra por incrustación de 1/8": 2 694 gal
- Costo aproximado del diesel: 17,00 Q/gal
- Gasto anual extra de combustible por incrustaciones: Q.45 798,00.

El gasto extra de combustible que la caldera puede llegar a generar por incrustaciones al no tener un adecuado tratamiento del agua es de Q.45 798,00 al año.

2.2.2.2. Fugas en tuberías y accesorios

Debido al uso y las condiciones de operación, las tuberías han sido afectadas por la erosión y la corrosión, así como sus accesorios; se encontraron fugas en varios puntos de las tuberías debido a 11 orificios de aproximadamente 1/16" de diámetro que generan una gran pérdida de vapor y que hace que la caldera trabaje excesivamente para mantener la presión en el sistema y, por consiguiente, un gasto excesivo de combustible.

Según la tabla VI, un orificio de 1/16" a una presión de 75 PSI produce una fuga de vapor de 8,5 lb/hr, por lo que el costo anual por fugas de vapor por los 11 orificios a lo largo de líneas se calcula de la siguiente manera:

Tabla VI. Pérdidas por fugas de vapor por diámetro de orificio

Steam flow, lb/h, when steam gauge pressure is													
Diameter (inches)	2 psi	5 psi	10 psi	15 psi	25 psi	50 psi	75 psi	100 psi	125 psi	150 psi	200 psi	250 psi	300 psi
1/32	.31	.47	.58	.70	.94	1.53	2.12	2.7	3.3	3.9	5.1	6.3	7.4
1/16	1.25	1.86	2.3	2.8	3.8	6.1	8.5	10.8	13.2	15.6	20.3	25.1	29.8
3/32	2.81	4.20	5.3	6.3	8.45	13.8	19.1	24.4	29.7	35.1	45.7	56.4	67.0
1/8	4.5	7.5	9.4	11.2	15.0	24.5	34.0	43.4	52.9	62.4	81.3	100	119
5/32	7.8	11.7	14.6	17.6	23.5	38.3	53.1	67.9	82.7	97.4	127	156	186
3/16	11.2	16.7	21.0	25.3	33.8	55.1	76.4	97.7	119	140	183	226	268
7/32	15.3	22.9	28.7	34.4	46.0	75.0	104	133	162	191	249	307	365
1/4	20.0	29.8	37.4	45.0	60.1	98.0	136	173	212	250	325	401	477
9/32	25.2	37.8	47.4	56.9	76.1	124	172	220	268	316	412	507	603
5/16	31.2	46.6	58.5	70.3	94.0	153	212	272	331	390	508	627	745
11/32	37.7	56.4	70.7	85.1	114	185	257	329	400	472	615	758	901
3/8	44.9	67.1	84.2	101	135	221	306	391	476	561	732	902	1073
13/32	52.7	78.8	98.8	119	159	259	359	459	559	659	859	1059	1259
7/16	61.1	91.4	115	138	184	300	416	532	648	764	996	1228	1460
15/32	70.2	105	131	158	211	344	478	611	744	877	1144	1410	1676
1/2	79.8	119	150	180	241	392	544	695	847	998	1301	1604	1907

Fuente: BOHÓRQUEZ GUZMÁN, Roberto Daniel. *Auditoría energética al circuito de vapor y condensado de una planta de elaboración de café liofilizado*. p.39.

$$GF = F * H * C_s$$

Donde:

- GF: gasto anual de combustible por fugas en tuberías
- F: fugas de vapor por 11 orificios = 93,5 lb/hr
- H: horas de operación anual = 1 825 horas
- Cs: costo de producción de vapor = Q.0,28 Q/lb de vapor

De donde se obtiene que el gasto anual de combustible por fugas en tuberías es de Q.47 778,50.

Para evitar tales gastos innecesarios de combustible, es importante un plan de inspección y mantenimiento de trampas de vapor y un adecuado tratamiento del agua de alimentación ya que los orificios fueron producidos por la corrosión debido al arrastre de espumas y condensados desde la caldera.

2.2.2.3. Fallas de trampas de vapor

Una trampa de vapor con fallas representa una pérdida de energía importante para el sistema, de tal manera que es recomendable la implementación de un programa de inspección para detectar a tiempo cualquier falla. Existen tres tipos de fallas en una trampa de vapor: la más visible y fácil de detectar es la fuga de vapor al exterior de la misma, los otros dos tipos de fallas ocurren en el interior de la trampa y son difíciles de detectar: la falla de posición cerrada o trampa fría y la falla de posición abierta; la primera bloquea el paso del condensado a través de ella y la otra permite el paso de vapor vivo hacia las tuberías de condensado.

Tabla VII. **Inventario y condiciones de trampas de vapor**

Ubicación	Tipo	Conexión	Marca	Condiciones
Manifold área de calderas	Cubeta invertida	3/4"	Spirax sarco	Fuga de vapor
Secadora Continental	Cubeta invertida	3/4"	Spirax sarco	Falla posición abierta
Secadora Continental	Cubeta invertida	3/4"	Spirax sarco	Falla posición abierta
Secadora Continental	Cubeta invertida	3/4"	Spirax sarco	Falla posición abierta
Secadora Cissell	Cubeta invertida	3/4"	Spirax sarco	Falla posición cerrada
Secadora Cissell	Cubeta invertida	3/4"	Spirax sarco	Falla posición abierta
Secadora Cissell	Cubeta invertida	3/4"	Spirax sarco	Falla posición abierta
Marmita 1	Termodinámica	3/4 "	Gestra	Sin falla
Marmita 2	Termodinámica	3/4 "	Gestra	Sin falla
Marmita 1y 2 (manifold)	Termodinámica	3/4 "	Gestra	Sin falla
Autoclave 1	Termodinámica	3/4 "	Gestra	Sin falla
Autoclave 2	Termodinámica	3/4 "	Gestra	Sin falla

Fuente: elaboración propia.

- Fuga de vapor de trampa en manifold del área de calderas: las pérdidas de energía de la trampa con fuga de vapor en el manifold puede ser calculado como una fuga de un orificio de 2mm o 3/32" a la presión de trabajo de 75 PSI, usando la tabla VI.

$$G_T = F * H * C_s$$

Donde:

- G_T : gasto anual de combustible por fugas en trampas
- F : fugas de vapor en lb/hr = 19,1 lb/hr

- H: horas de operación anual = 1 825 horas
- Cs: costo de producción de vapor = Q.0,28/lb de vapor

De donde se obtiene que el gasto anual de combustible por fuga en trampa del manifold en el área de calderas es de Q.9 760,10.

- Falla de posición cerrada en trampa de secadora de ropa Cissell: en el tipo de falla de posición cerrada o trampa bloqueada, el condensado que se acumula a través del equipo; en este caso de la secadora presenta pérdidas de eficiencia en la transferencia de calor, lo provoca que la secadora requiera más tiempo para realizar su proceso de secado de ropa. Una válvula con éste tipo de falla puede ser detectada por la considerable disminución de temperatura con respecto a otras partes en las líneas de vapor.
- Falla de posición abierta de cinco trampas en secadoras de ropa: en este tipo de falla existen fugas de vapor vivo hacia las tuberías de condensado, dejando de aprovechar gran parte del calor del vapor en las secadoras. Este tipo de falla es más difícil de detectar, pero puede ser detectado por la presencia de vapor en los tanques de condensado, o en algunos casos por el sonido de la válvula al paso del vapor.

Fugas estimadas en trampas con fallas de posición abierta:

- Fuga pequeña: 9 lb/hr
- Fuga normal: 15 lb/hr
- Fuga por trampa soplando: 33 lb/hr

Las trampas se encontraron completamente abiertas sin ninguna restricción al paso de vapor.

Costo anual por falla en trampa posición abierta = $F \times H \times C_s \times N$.

Donde:

- F: fugas de vapor en lb/hr = 9 lb/hr (asumiendo fuga pequeña)
- H: horas de operación al año = 1 825 horas
- Cs: costo de producción de vapor = Q.0,28/lb de vapor
- N: número de trampas con falla = 5

De donde se obtiene que el costo anual por falla de las 5 trampas en las secadoras de ropa es de Q.22 995,00.

Por lo que el gasto total de combustible anual por fallas en trampas es de Q.32 755,10 más la pérdida de eficiencia en los equipos que hace uso del vapor en sus procesos.

2.2.2.4. Aislamiento térmico de tuberías

Un apropiado aislamiento térmico permite aumentar la seguridad del ambiente de trabajo y un ahorro considerable en recursos energéticos. Las pérdidas en las que se incurren en líneas de vapor y retorno de condensado cuando las tuberías no cuentan con aislamiento son considerables.

Se encontraron 100 pies de tubería de 3/4" y 69 pies de tubería de 2" sin un adecuado aislamiento térmico. Para calcular la pérdida de calor en estos tramos de tubería se usa la siguiente fórmula.

$$Q_s = U * A * (T_t - T_a) * H$$

$$Q_s = U * \pi D L * (T_t - T_a) * H$$

Donde:

- Qs: pérdida de calor por tuberías sin aislamiento; (BTU)
- U: coeficiente de transmisión de calor; (BTU/hr pie² °F)
- A: superficie sin aislamiento (pie²)
- D: diámetro de la tubería (pie)
- L: longitud de la tubería (pie)
- Tt: temperatura de la tubería (°F)
- Ta: temperatura ambiente (°F)
- H: horas al año (hr)

Para la tubería de 3/4":

$$Q_s = 2,95 * \pi * 0,06 * 100 * (250 - 80) * 1\ 825$$

$$Q_s = 17\ 251,82\text{kBTU}$$

Para la tubería de 2":

$$Q_s = 2,95 * \pi * 0,17 * 69 * (250 - 80) * 1\ 825$$

$$Q_s = 33\ 727,31\ \text{kBTU}$$

En total se tiene una pérdida de calor 50 979,13 kBTU; asumiendo un poder calorífico del diesel de 128,45 kBTU/gal, el gasto anual de diesel por tubería sin aislamiento térmico es de 397 galones, equivalente a Q.6 749,00.

Figura 9. **Falta de aislamiento o en malas condiciones**



Fuente: elaboración propia.

2.2.2.5. Exceso de purgas

Con el fin de mantener el equilibrio químico en el interior de la caldera, la cantidad de impurezas retiradas mediante la purga debe ser igual a la cantidad de impurezas presentes en el agua de alimentación. Por esta razón, si las impurezas no son extraídas mediante un tratamiento del agua de alimentación, la tasa de purgas deberá ser mayor. El exceso de purgas da lugar a un funcionamiento ineficiente de la caldera, debido a esta pierde el calor contenido en el agua extraída mediante la purga, y por ende, el gasto de combustible será mayor.

$$\%Z_p = \frac{h_{fp} \times \eta}{H_{gv} * (C - 1) + h_{fp} - h_{fa} * C}$$

Donde:

- $\%Z_p$: % de combustible que se pierde en la purga

- h_{fp} : entalpía del agua de purga en BTU/lb
- η : eficiencia térmica de la caldera (%)
- h_{gv} : entalpía del vapor de la caldera en BTU/lb
- C: ciclos de concentración = C_c / C_a
- h_{fa} : entalpía del agua de alimentación en BTU/lb

Ciclos de concentración: se refiere al número de veces que los sólidos disueltos del agua de alimentación se concentran dentro de la caldera, para determinar su valor es necesario un análisis químico del agua de alimentación y de la caldera.

$$C = \frac{C_c}{C_a}$$

Donde:

- C: ciclos de concentración
- C_c : concentración de impurezas en la caldera = 120 ppm
- C_a : concentración de impurezas en agua de alimentación = 40 ppm

Con lo que se tienen 3 ciclos de concentración.

Sustituyendo los valores en la fórmula, con una eficiencia de la caldera de 53 % y obteniendo las entalpias de tablas termodinámicas a 85 PSI de presión de trabajo, 158 °F de temperatura en el interior de la caldera y 80 °F de temperatura del agua de alimentación, se tiene el siguiente resultado:

$$\%Z_p = \frac{288,11 \times 53,00}{1\,184,47 * (3 - 1) + 288,11 - 48,66 * 3}$$

Con lo que se obtiene el % de combustible que se pierde en la purga con las condiciones ya descritas.

$$\%Z_p = 6,08 \%$$

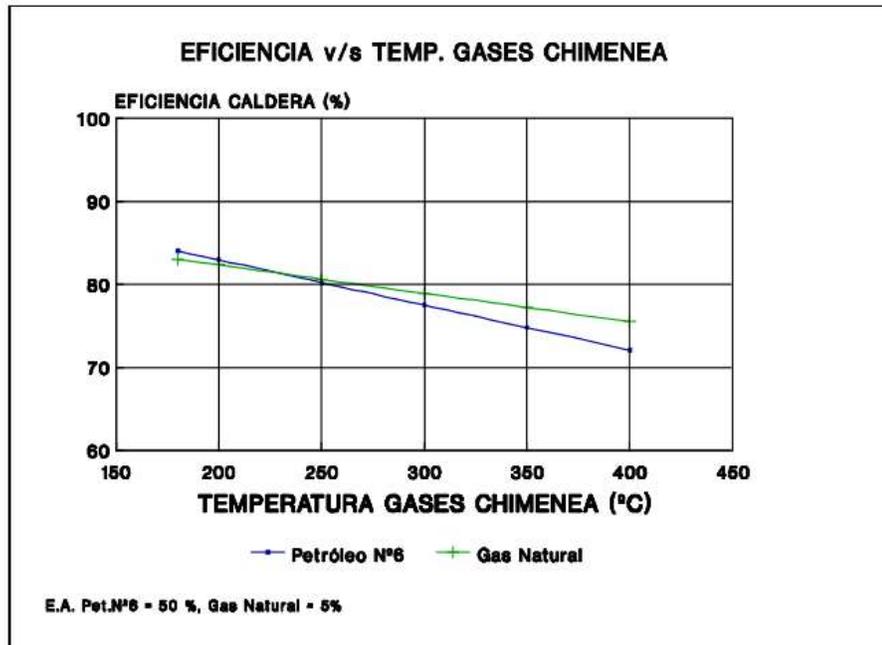
Tomando en cuenta el consumo de combustible de la caldera de 14 965 galones anuales, se tiene que el consumo de combustible por las pérdidas en purgas sería de 910 galones, lo que da un gasto de Q.15 470,00 anuales por exceso de purgas dadas las condiciones de agua de alimentación y de la caldera.

2.2.2.6. Temperatura de gases en chimenea

Una elevada temperatura en la chimenea indica que el calor está siendo desperdiciado hacia el medio ambiente por medio de los gases de la combustión. La temperatura de los gases en la chimenea debe ser mantenida tan baja como sea posible, sin causar corrosión en el extremo frío de la caldera donde puede llegarse a formar condensado de ácido sulfúrico producto de la reacción química entre los gases de combustión y el vapor de agua, el valor recomendado de temperatura de chimenea es no mayor de 80 °C por encima de la temperatura de saturación del vapor en la caldera.

El quemador aporta aire y combustible y los mezcla de forma adecuada para su correcta combustión. Una cantidad de aire inferior a la recomendada puede ocasionar in-quemados, emisiones peligrosas y reducción del rendimiento, el exceso de aire implica pérdidas con los humos de la combustión.

Figura 10. Eficiencia contra temperatura de gases de la combustión



Fuente: Thermal engineering.

http://www.thermal.cl/prontus_thermal/site/edic/base/port/documentos.html. Consulta: 6 de septiembre de 2016.

Según la figura 10, un aumento de la temperatura en los gases de combustión en la chimenea de 200 °C a 300 °C genera pérdidas de eficiencia de la caldera de 5,5 %, lo que equivale a 823 gal de combustible extra al año y que genera un gasto de Q 13 991,00.

2.2.2.7. Resumen de pérdidas energéticas

En la tabla VIII se hace un resumen de los factores que ocasionan pérdidas de energía en el sistema de generación y distribución de vapor en el hospital.

Tabla VIII. Resumen de pérdidas anuales

Factor de pérdida	Galones de combustible	Monto (Q)
Pérdidas por incrustaciones	2 694	45 798,00
Fugas en tuberías y accesorios	2 811	47 778,50
Fallas en trampas de vapor	1 927	32 755,10
Falta de aislamiento térmico	397	6 749,00
Exceso de purgas	910	15 470,00
Temperatura de gases en chimenea	823	13 991,00
Total	9 561	162 541,60

Fuente: elaboración propia.

3. FASE DE SERVICIO TÉCNICO PROFESIONAL

3.1. Propuesta de optimización en la generación y distribución de vapor

Después de detectados los factores que generan pérdidas de energía y excesos en el consumo de combustible del sistema, se plantea una propuesta para la optimización del proceso de generación y distribución de vapor en el hospital, haciendo un análisis de los costos contra el beneficio de la implementación.

Para que los cambios y la implementación de mejoras de los resultados esperados a largo plazo, se debe tener un plan de inspección y mantenimiento, incluyendo un adecuado tratamiento del agua y con un personal de operación y mantenimiento bien capacitado, de lo contrario los problemas volverán a aparecer y posiblemente con mayor severidad.

3.1.1. Calderas

Siendo las calderas la parte principal del sistema de vapor, necesitan atención especial, estas han trabajado bajo condiciones muy severas de operación; con el poco mantenimiento, la falta de tratamiento del agua y la falta de inspección de sus equipos de seguridad, las calderas puede llegar a colapsar, y poner en riesgo la integridad de las instalaciones y, lo que es más crítico, la integridad del personal.

- Caldera de 80 BHP: detalle de los trabajos de reparación realizados durante el proyecto:

- Remoción e instalación de 46 tubos de 2" de diámetro del segundo paso de la caldera.
- Rectificación, expansión y galafateo de bocas de tubos en espejo delantero y trasero.
- Prueba hidrostática a 225 PSI.
- Remoción de parte inferior del marco trasero.
- Manufactura del marco trasero con cemento refractario.
- Cambio de la bomba de agua.
- Cambio de válvula de bola de 1 1/4" de diámetro en entrada de agua de alimentación.
- Cambio de dos válvulas cheque de 1 1/4" de diámetro en entrada de agua de alimentación.
- Cambio de válvula de bola de 1 1/4" de diámetro en purga de fondo de la caldera.
- Cambio de válvula de nivel de agua de la caldera.

Costo de las reparaciones: Q.88 500,00.

- Caldera de 60 BHP: actualmente se encuentra fuera de servicio por lo que debe ser sometida a un tratamiento para calderas inactivas. Antes de reactivar esta caldera es recomendable hacer los siguientes trabajos de inspección, mantenimiento y reparación:
 - Limpieza de tubos de humo.
 - Lavado de la cámara de agua.
 - Revisión y limpieza del control de nivel de agua.
 - Revisión y limpieza del quemador.
 - Revisión y limpieza de filtros.
 - Cambio de empaques de registros de inspección.
 - Cambio de empaques de compuertas.

- Cambio del control principal de la caldera.
- Cambio de alambrado en general.
- Instalación de control de llama.
- Reparación del motor de modulación.
- Cambio de válvula de bola de 1 1/4" de diámetro en entrada de agua de alimentación.
- Cambio de dos válvulas cheque de 1 1/4" de diámetro en entrada de agua de alimentación.
- Cambio de válvula de bola de 1 1/4" de diámetro en purga de fondo de la caldera.
- Cambio de válvula de nivel de agua de la caldera.
- Pruebas de funcionamiento.

Costo del mantenimiento y reparaciones: Q.58 500,00

3.1.1.1. Tratamiento de calderas inactivas

El riesgo de corrosión y oxidación de una caldera inactiva es mayor debido a que sus superficies metálicas su interior pueden quedar expuestas al oxígeno y la humedad; por ésta razón una caldera que no es utilizada por períodos hasta de 6 meses debe llevar un tratamiento, los dos tipos de tratamiento que existen son: seco y húmedo.

Una semana antes de dejar una caldera fuera de servicio se recomienda aumentar la frecuencia de purgas, de esta manera se asegura una óptima calidad del agua al momento de detener la caldera.

- Tratamiento húmedo: en éste tipo de tratamiento, la caldera debe llenarse completamente con agua tratada, agregando sulfito de sodio para remover el oxígeno del agua y soda cáustica para mantener el pH de 10,5.

La caldera debe quedar sellada herméticamente, semanalmente se debe inspeccionar el nivel del agua y completar de ser necesario.

- Tratamiento seco: este tipo de tratamiento consiste en vaciar completamente la caldera, eliminando toda la humedad haciendo circular aire caliente a través de ella y aplicando productos químicos absorbentes como sílica gel SiO_2 .

La caldera debe quedar herméticamente cerrada y se deben hacer inspecciones periódicas para detectar brotes de humedad y aplicar absorbentes de ser necesario.

3.1.1.2. Mantenimiento de quemadores

El quemador es el principal equipo cuando se habla de eficiencia en el gasto de energía, un buen ajuste de la mezcla aire-combustible es fundamental para que el proceso de combustión se realice de forma eficiente.

Para mantener un adecuado funcionamiento del quemador se debe tener un buen sistema de inspección, monitorear la presión del combustible y la cantidad de aire suministrada, ya que la mezcla correcta de estos elementos dará una eficiente combustión, aprovechando al máximo la energía calorífica resultante y evitando emisiones contaminantes al medio ambiente, en adición a esto se debe tener un buen plan de mantenimiento.

El quemador requiere de un mantenimiento periódico, por lo menos mensual, debe ser realizado por personal calificado. El mantenimiento es de vital importancia para un correcto funcionamiento del quemador, para evitar consumos excesivos de combustible y reducir la contaminación al ambiente.

Las tareas básicas al realizar el mantenimiento de un quemador son las siguientes:

- Revisar que no se presenten obstrucciones o abolladuras en las tuberías de alimentación y retorno de combustible.
- Limpieza del filtro de la línea de aspiración de combustible.
- Limpieza de fotocelda.
- Desmontar la caña del quemador.
- Limpiar el hollín acumulado en el plato difusor.
- Desmontar los inyectores para su limpieza y verificación del estado de sus componentes.
- Graduar correctamente las distancias de los electrodos, de 4 a 6 mm de separación y a una altura de 10 mm con respecto al inyector de primera llama.
- Revisar la presión de combustible y calibrar según lo requerido de 12 a 16 kg/cm².
- Realizar el ajuste del aire suministrado hasta obtener una llama adecuada en forma y color.
- Hacer funcionar el quemador con régimen máximo por 10 minutos y después realizar un análisis de gases de la combustión en la chimenea.

Costo anual del mantenimiento del quemador: Q.5 400,00 anuales.

3.1.1.3. Limpieza de tubos lado de humos

Por lo menos dos veces al año la caldera debe ser abierta para hacerse una revisión de la condición de los tubos del lado de humo. Cuando existe una combustión incompleta por parte del quemador se genera hollín, el cual se acumula en los tubos de humo, haciendo que la transferencia de calor sea ineficiente.

Figura 11. **Diferentes tipos de cepillos para limpieza de tubos de humo**



Fuente: Máquinas industriales.

<http://lasmaquinasindustriales.blogspot.com/2011/03/mantenimiento-calderas-parte-ii.html>.

Consulta: 9 de septiembre de 2016.

La limpieza de los tubos se hace mediante un rascado de su interior con un cepillo metálico escogido de acuerdo al diámetro de los tubos.

- Costo anual de limpieza de tubos: Q.1 220,00
- Precio de un cepillo para limpieza de tubos: Q.265,00.

3.1.1.4. Análisis de gases de combustión

El análisis de los gases ofrece un medio para determinar el rendimiento de combustión de la caldera y la concentración de contaminantes generados y expulsados al ambiente. Con este análisis se pueden detectar problemas de funcionamiento del quemador y hacer los ajustes necesarios para resolverlos.

Las muestras y medidas se toman en la chimenea y existen diferentes equipos para realizar las pruebas, a continuación se enumeran los parámetros a ser medidos en un análisis de combustión:

- Temperatura de humos: una temperatura alta en la chimenea indica que el calor está siendo desperdiciado en la atmósfera, de modo que esta debe ser lo más baja posible pero mayor a 180 °C para evitar condensaciones en la chimenea.
- Contenido de CO₂: es la concentración de dióxido de carbono en los gases de la combustión, su valor debe ser mayor a 10 %; sin embargo, altos contenidos de CO₂ son nocivos para el medio ambiente y por ende para la salud de las personas por lo que se considera un nivel máximo permisible de 14 %.
- Contenido de CO: el monóxido de carbono es un gas muy perjudicial para la salud, es producto de una combustión incompleta, el valor permisible de CO en los gases de combustión debe ser lo más bajo posible sin sobrepasar las 50 ppm.
- Índice de opacidad según escala de Bacharach: es la medida de hollín en los gases, y es el resultante de una combustión incompleta; para tener una combustión admisible el valor debe ser igual o menor que 2 en la escala de Bacharach.

Figura 12. Escala de Bacharach para medición de opacidad de gases



Fuente: Testo. <http://analizadores-gases.es/test-2/>. Consulta: 10 de septiembre de 2016.

Costo anual de análisis de gases de chimenea: Q.1 800,00.

Existen otros parámetros que pueden medirse como el porcentaje de oxígeno que da una medición del exceso de aire en la combustión.

Todos estos parámetros indican la eficiencia de combustión de la caldera y que al ser controlados adecuadamente no generan ahorros de combustible.

3.1.2. Redes de distribución

3.1.2.1. Tubería y accesorios

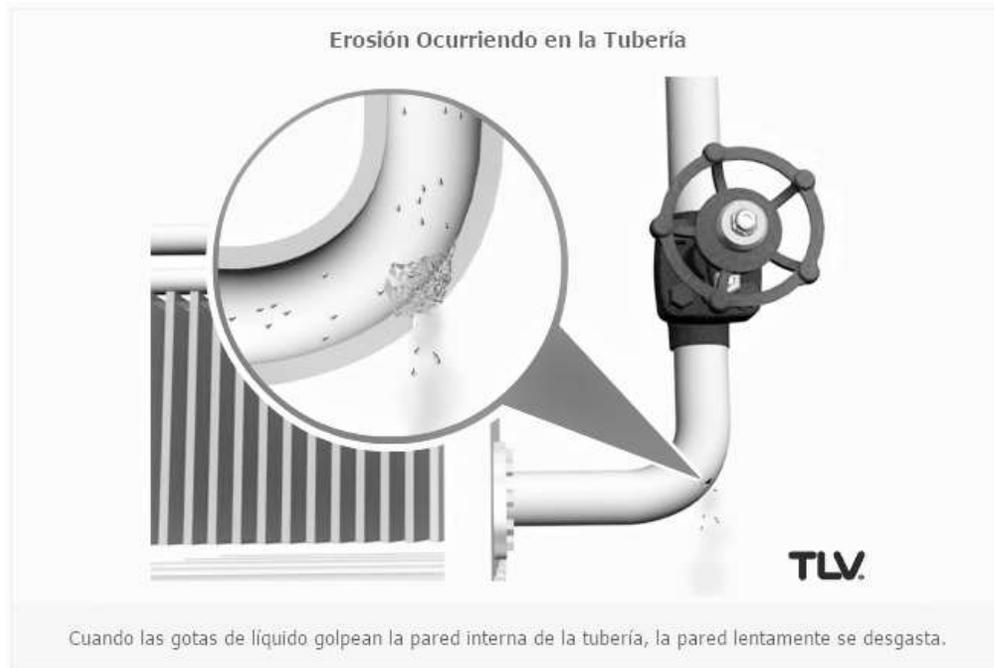
El condensado acarreado con el vapor es el causante de la mayor parte de la erosión en las tuberías. Al golpear repetidamente la tubería en los codos, el condensado puede causar el adelgazamiento gradual de la pared. En tuberías de acero al carbón, la erosión puede remover el tratamiento superficial de la cara interna de la tubería y acelerar el proceso de corrosión.

- Tuberías de distribución de vapor: aunque el vapor suministrado por la caldera puede ser bastante seco, todas entregan vapor con cierto grado de humedad. El condensado también se forma por las pérdidas de energía por radiación a lo largo de la tubería, por estas razones es importante instalar trampas de vapor a intervalos regulares para que mecánicamente remuevan las gotas de condensado del vapor.
- Tuberías de retorno de condensado: las tuberías de retorno de condensado son las más expuestas a la erosión, estas son diseñadas usando el flujo promedio de condensado pero si se usan trampas de operación intermitente, como las de cubeta invertida o termostática, el flujo no será como se desea por el flujo momentáneo que producen, en estos casos es más recomendable usar una trampa de flotador.

Otra consideración para evitar erosión en las tuberías de retorno de condensado es instalar las trampas lo más lejos posible previo a un cambio de dirección, en lo posible eliminar los cambios de dirección de la tubería.

Durante el proyecto se hizo el trabajo de cambio de gran parte de la tubería de vapor y condensado, los trabajos realizados se detallan a continuación.

Figura 13. **Erosión en tuberías**



Fuente: Tlv. <http://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/piping-erosion.html>. Consulta: 12 de septiembre de 2016.

- Cambio de tramo de tubería del ramal principal de vapor y condensado
 - Remoción de tubería de vapor de 2" de diámetro.
 - Remoción de tubería de condensado de 1 1/2" de diámetro.
 - Instalación de 55 metros de tubería de vapor, con tubo de hierro negro de 2" de diámetro cédula 40.
 - Instalación de 60 metros de tubería de retorno de condensado con tubo de hierro negro de 1 1/2" de diámetro cédula 40.
 - Aislamiento de 55 metros de tubería de vapor de 2" de diámetro y 60 metros de tubería de condensado de 1 1/2" de diámetro, con cañuela de fibra de vidrio de 1" de espesor.
 - Instalación de trampas de final de línea, filtro, cheque y bypass.

Costo: Q.88 650,00.

- Cambio de tramo de tuberías hacia área de lavandería
 - Remoción e instalación de 10 metros de tubería de hierro negro de 3/4" cédula 40, para ramal de vapor hacia el área de lavandería.
 - Remoción e instalación de 10 metros de tubería de hierro negro de 3/4" cédula 40, para ramal de retorno de condensado hacia el área de lavandería.
 - Aislamiento de 10 metros de tubería de vapor y 10 metros de tubería de retorno de condensado de 3/4", con cañuela de fibra de vidrio de 1" de espesor.
 - Instalación de trampas de final de línea, filtro, cheque y bypass.

Costo: Q.34 400,00.

- Cambio de tramo de tuberías hacia central de equipos
 - Remoción e instalación de 18 metros tubería de vapor, con tubo de hierro negro de 3/4", cédula 40.
 - Remoción e instalación de 18 metros de tubería de condensado, con tubo de hierro negro de 3/4", cédula 40.
 - Instalación de regulador de presión en la entrada a autoclaves.
 - Aislamiento de 18 metros de tubería de vapor y 18 metros de tubería de condensado de 3/4" de diámetro, con cañuela de fibra de vidrio de 1" de espesor.
 - Instalación de trampas de final de línea, filtro, cheque y bypass.

Costo: Q. 44 600,00.

3.1.2.2. Trampas de vapor

Las trampas de vapor son una parte crítica del ciclo del vapor y condensado, la selección incorrecta de una trampa de vapor puede tener un gran impacto en la eficacia de los procesos, los costos de energía y también pueden tener implicaciones de seguridad.

- Trampas mecánicas: las trampas mecánicas descargan condensado a temperatura del vapor, esto las hace ser la opción principal de las aplicaciones de procesos, por ejemplo, la aplicación en intercambiadores de calor, los dos diseños para este tipo de trampa son: de flotador en la cual la descarga de condensado se hace en forma continua y la de cubeta invertida donde se hace en forma intermitente.
- Trampas termodinámicas: las trampas termodinámicas son compactas, fáciles de instalar, ligeras y no se ven afectadas por el golpe de ariete o vibración. Este tipo de trampa descarga el condensado a temperatura similar a la de saturación de vapor, lo que las hace la primera opción para desagües de vapor.
- Trampas termostáticas: los purgadores de vapor termostáticos abren hasta que la temperatura de condensación de vapor a caído por debajo de la temperatura de saturación del vapor, son ampliamente utilizadas donde es aceptable el uso del calor en el condensado y reducir el las pérdidas de vapor flash.

Tabla IX. **Patrones para selección de trampas**

Parámetros de funcionamiento	De flotador	De cubeta invertida	Termostáticas	Termodinámicas
Modo de operación	Continua	Intermitente	Intermitente	Intermitente
Ahorro de energía	Buena	Excelente	Adecuada	Deficiente
Resistencia al desgaste	Buena	Excelente	Adecuada	Deficiente
Resistencia a la corrosión	Buena	Excelente	Buena	Excelente
Resistencia al golpe de ariete	Deficiente	Excelente	Deficiente	Excelente
Capacidad de manejo de aire	Excelente	Buena	Excelente	Mala
Funcionamiento con contrapresión	Excelente	Excelente	Excelente	Deficiente
Manejo de suciedad	Deficiente	Excelente	Adecuada	Deficiente
Capacidad de purga	Adecuada	Excelente	Buena	Excelente
Respuesta a formación de condensados	Intermedia	Intermedia	Retardada	Retardada
Capacidad para manejar vapor flash	Deficiente	Adecuada	Deficiente	Deficiente
Tamaño relativo	Grande	Grande	Pequeño	Pequeño
Duración	5 a 10 años	5 a 10 años	2 a 3 años	1 año
Precio	Alto	Intermedio	Alto	Alto

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la tabla IX, se puede concluir que las trampas más apropiadas, dadas las condiciones del sistema de vapor en el hospital son las de cubeta invertida, donde se puede observar que posee las siguientes características:

- Excelente rendimiento en cuanto a ahorro de energía
- Resistencia al desgaste, corrosión y golpe de ariete
- Excelente capacidad de purga y manejo de la suciedad
- Adecuada capacidad para manejar el vapor flash
- Amplio tiempo de vida
- Son más económicas

El costo de la inversión por las 7 trampas de cubeta invertida a ser cambiadas en el hospital asciende a Q.13 825,00.

3.1.2.3. Selección del aislamiento térmico

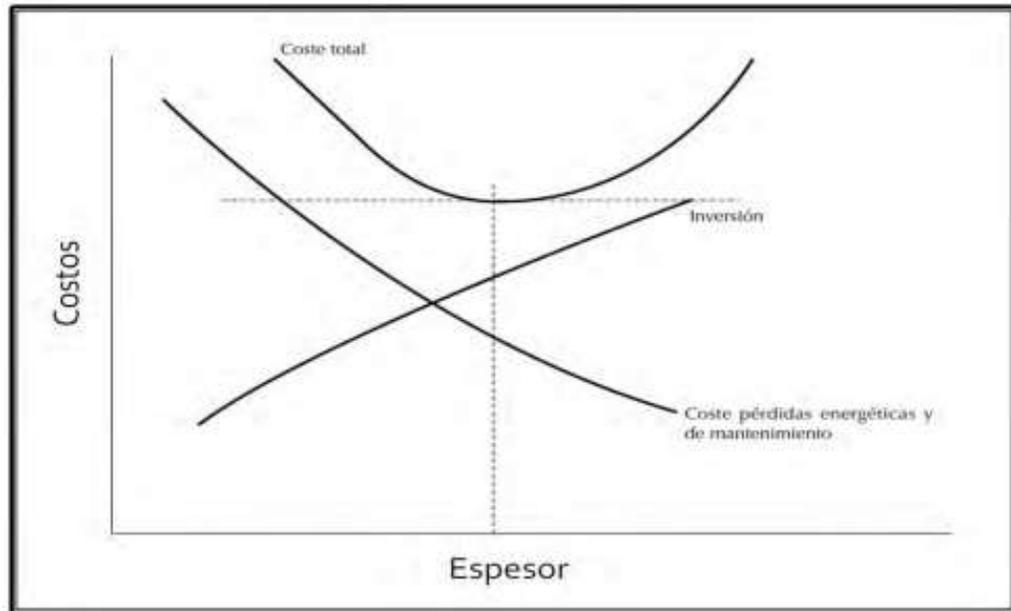
El espesor del aislamiento dependerá de varios factores, tales como el tipo de aislamiento requerido, la temperatura del proceso y las dimensiones de la tubería o equipo a aislar.

Hay una relación entre el espesor y el costo del aislamiento como se puede observar en la figura 14; a medida que el espesor sube, la inversión sube y el costo por pérdidas energéticas baja. La clave es encontrar el punto donde el costo-beneficio es el más eficiente.

Existen tres grados de aislamiento en la industria según su espesor:

- Delgado (espesor de 1/16" a 13/16"): se enfoca en la prevención de lesiones de las personas que trabajan cerca de las instalaciones.
- Intermedio (espesor de 5/8" a 1 3/16"): se enfoca a una reducción importante de la pérdida de calor, es conocido como el espesor óptimo, debido a que logra un balance entre la inversión y las pérdidas de calor como lo muestra la figura 14.
- Grueso (espesor de 1 3/16" a 2"): se conoce como el aislamiento ecológico porque se enfoca en reducir al máximo posible las pérdidas de calor y proteger el medio ambiente.

Figura 14. Costo del aislamiento en función del espesor



Fuente: TORRES, C. *Diseño e instalación de aislante térmico en tuberías y equipos*.
<http://159.90.80.55/tesis/000155516.pdf>. Consulta: 13 de septiembre de 2016.

Tabla X. **Materiales aislantes, ventajas y desventajas**

Material	Ventajas	Desventajas	Rango térmico
Silicato de calcio	- Es incombustible - Gran durabilidad - Resistencia al abuso físico - Buena calidad	- Absorbe gran cantidad de agua	de -18°C a 650°C
Vidrio celular	- Producto rígido - No absorbe líquidos ni vapores	- Quebradizo - Sesible a choques térmicos	de -260°C a 430°C
Fibra de vidrio	- Material muy versátil - Gran eficiencia térmica - Incombustible - Liviano	- Picazón e irritaciones al contacto	de -40°C a 450°C
Fibras minerales y lana de roca	- Fibras cortas y pesadas	- Bajo riesgo de acumulación de condensado	de 0°C a 1000°C
Espuma fenólica	- No inflamable	- No posee baja conductividad térmica	de -200°C a 150°C
Perlita	- Resistencia al fuego - No es tóxico	- Material muy frágil y abrasivo - No soporta las vibraciones	de 0°C a 750°C

Fuente: elaboración propia.

Con base en lo anterior, el aislamiento recomendado es el de cañuela de fibra de vidrio de 1" de grueso.

El costo de aislamiento de los tramos de tubería en malas condiciones es de:

- 30,5 m de tubería de 3/4": Q.1 370,00
- 21 m de tubería de 2": Q.1 890,00

Inversión total por aislamiento térmico: Q.3 260,00.

3.1.3. Tratamiento del agua de alimentación

El tratamiento y acondicionamiento del agua de alimentación de calderas deben cumplir tres objetivos:

- Intercambio de calor continuo
- Protección contra la corrosión
- Producción de vapor de alta calidad

La vida de las calderas depende en gran manera del adecuado tratamiento del agua de alimentación, y los beneficios que trae son tantos que vale la pena la inversión. El costo por pérdidas de energía y reparaciones es mayor que los costos del tratamiento del agua, además de los problemas de seguridad que pueden llegar a presentar unas calderas incrustadas.

3.1.3.1. Análisis del agua

El tratamiento del agua de caldera es un problema que requiere un control periódico del agua y un tratamiento acorde a la variación en las condiciones. El análisis realizado al agua de alimentación en el área de calderas del hospital presentó los siguientes resultados.

- Alcalinidad total: 170 ppm; permisible(<25 ppm)
- Sílice: 400 ppm; permisible (100 – 300 ppm)
- Hierro: 0,04 ppm; permisible (< 0,05 mg/l)
- PH: 7,0; permisible (8,9 – 9,5)
- Dureza: 188 ppm; permisible (< 2 ppm)

Con los resultados anteriores el proveedor de servicio de tratamiento de agua recomendó un tratamiento externo de ablandado del agua y un tratamiento químico interno.

3.1.3.2. Tratamiento externo

El hospital cuenta con un sistema de ablandamiento del agua para el tratamiento externo, el equipo funciona en buenas condiciones, por lo que lo único que se necesita es la compra de sal industrial para la regeneración de la resina catiónica de 1 pie cúbico; la aplicación de la sal industrial se debe hacer como se muestra a continuación según la recomendación del proveedor de sal:

- Regeneraciones de la resina catiónica: 10 por mes
- Cantidad de sal por regeneración: 15 lb
- Precio de la libra de sal industrial: Q.1,20
- Costo de sal industrial por mes = $10 \times 15 \times 1,20$
- Costo mensual de sal industrial = Q.180,00
- Costo anual de sal industrial = Q.2 160,00

El costo anual por el tratamiento externo de ablandamiento del agua es de Q.2 160,00. Con este tratamiento se espera remover la dureza del agua, reduciendo las concentraciones de calcio y magnesio del agua, que generan incrustaciones en la caldera.

3.1.3.3. Tratamiento interno

Durante el proceso de acondicionamiento, que es un complemento esencial para el programa de tratamiento del agua, las dosis específicas de productos químicos son agregadas al agua. Los productos utilizados comúnmente incluyen:

- Fosfatos dispersantes (ablandamiento con productos químicos)
- Dispersantes naturales y sintéticos
- Secuestradores de oxígeno

- Anti espumantes

Del análisis hecho al agua de alimentación fue cotizado el tratamiento recomendado por la empresa proveedora, mostrado en la siguiente tabla.

Tabla XI. **Tratamiento recomendado del agua de alimentación**

Producto	Tratamiento	Precio	Consumo anual	Costo anual
CH-2932	Anti incrustante	Q.158,00/lt	180 lt.	Q.28 440,00
Corrostyl-S	Anticorrosivo	Q.70,00/kg	90 kg	Q.6 300,00
Total anual				Q.34 740,00

Fuente: elaboración propia.

El costo anual por tratamiento químico para 5 horas de operación diaria de las calderas es de Q.34 740,00.

3.2. Análisis de costo—beneficio

Teniendo todas las fuentes de pérdidas energéticas y las propuestas de mantenimiento, servicio y tratamiento que pueden ayudar a reducir dichas pérdidas, a continuación se hace un análisis costo-beneficio de la propuesta.

Tabla XII. **Costo-beneficio del tratamiento del agua**

Concepto	Costo (Q)	Beneficio (Q)
Tratamiento químico del agua	34 740,00	
Ablandado del agua	2 160,00	
Reducción de pérdidas por Incrustaciones		45 798,00
Reducción de pérdidas por exceso de purgas		15 470,00
Totales	36 900,00	61 268,00
Beneficio		24 368,00

Fuente: elaboración propia.

La inversión en el tratamiento del agua de alimentación genera un ahorro en consumo de combustible de Q.24 368,00 anuales.

Tabla XIII. **Costo-beneficio en el cambio de trampas de vapor con fallas**

Concepto	Costo (Q)	Beneficio (Q)
Cambio de trampas de vapor	13 825,00	
Pérdidas por fugas en tuberías y accesorios		47 778,50
Pérdidas por fallas de trampas de vapor		32 755,10
Totales	13 825,00	80 533,60
Beneficio		66 708,60

Fuente: elaboración propia.

La inversión en el cambio de 7 trampas de vapor con fallas genera un ahorro en consumo de combustible de Q.66 708,60 anuales.

Tabla XIV. **Costo-beneficio del aislamiento de tuberías**

Concepto	Costo (Q)	Beneficio (Q)
Análisis de gases	1 800,00	
Mantenimiento de quemadores	5 400,00	
Limpieza de tubos	1 200,00	
Eficiencia de combustión		13 991,00
Totales	8 400,00	13 991,00
Beneficio		5 591,00

Fuente: elaboración propia.

La inversión en el cambio e instalación de aislamiento térmico en tuberías de vapor y condensado genera un ahorro en consumo de combustible de Q.5 591,00 anuales.

Tabla XV. **Costo-beneficio del mantenimiento del sistema de combustión**

Concepto	Costo (Q)	Beneficio (Q)
Aislamiento térmico de tuberías	3 260,00	
Reducción de pérdidas por falta de aislamiento térmico		6 749,00
Totales	3 260,00	6 749,00
Beneficio		3 489,00

Fuente: elaboración propia.

La inversión en el análisis de gases y mantenimiento del sistema de combustión de la caldera genera un ahorro en consumo de combustible de Q.3 489,00 anuales.

Tabla XVI. **Balance de la inversión contra los beneficios de la propuesta**

Concepto	Inversión (Q)	Beneficio (Q)
Tratamiento químico del agua	34 740,00	
Ablandado del agua	2 160,00	
Reducción de pérdidas por incrustaciones		45 798,00
Reducción de pérdidas por exceso de purgas		15 470,00
Cambio de trampas de vapor	13 825,00	
Pérdidas por fugas en tuberías y accesorios		47 778,50
Pérdidas por fallas de trampas de vapor		32 755,10
Análisis de gases	1 800,00	
Mantenimiento de quemadores	5 400,00	
Limpieza de tubos	1 200,00	
Eficiencia de combustión		13 991,00
Aislamiento térmico de tuberías	3 260,00	
Reducción de pérdidas por falta de aislamiento térmico		6 749,00
Total	62 385,00	162 541,60

Fuente: elaboración propia.

La inversión anual representa solo el 38 % del ahorro de energía que se obtendría al implementar la propuesta, por lo que el retorno de la inversión se daría en 5 meses.

3.3. Propuesta de plan de inspecciones y mantenimiento

Para que todas las reparaciones y propuestas de mejora al sistema de generación y distribución de vapor puedan ser sostenibles en el tiempo, debe haber un plan de inspecciones y mantenimiento diseñado según las condiciones del sistema y debe haber un control estricto de seguimiento para que las tareas sean cumplidas según dicho plan.

A continuación se muestra el plan dividido en rutinas diarias, semanales, mensuales, semestrales y anuales.

3.3.1. Rutinas diarias

- Revisión de nivel de agua de la caldera y tanque de condensados
- Purgas de fondo de nivel y de superficie
- Chequeo general del equipo de ablandado de agua
- Chequeo del equipo de inyección de químicos para tratamiento del agua
- Vigilancia y registro de la temperatura de gases de chimenea
- Vigilancia y registro de la temperatura del agua de alimentación
- Comprobar funcionamiento de indicadores de nivel
- Control de presión de la caldera
- Revisión y registro de nivel de combustible

3.3.2. Rutinas semanales

- Prueba de paro a niveles de seguridad: alto y bajo nivel.
- Revisión y limpieza del filtro de la bomba de combustible.
- Revisión del funcionamiento de la bomba de alimentación de agua.
- Tratamiento del agua según el programa establecido.

- Chequeo de fugas de agua, vapor, combustible y gases de combustión en todo el sistema.

3.3.3. Rutinas mensuales

- Limpieza del panel de control.
- Chequeo general del quemador.
- Revisión y limpieza de boquillas, electrodos de ignición y fotocelda del quemador.
- Revisión de aisladores de electrodos de ignición.
- Revisión de cables de ignición.
- Revisión de acoples del ventilador y bomba de combustible.
- Análisis de gases en chimenea y ajuste de combustión si es necesario.
- Muestreo y análisis del agua de alimentación y del interior de la caldera.
- Revisar funcionamiento de termómetros, manómetros y presostatos.
- Prueba de funcionamiento del paro de emergencia de la caldera.

3.3.4. Rutinas semestrales

- Limpieza de tubos de humos, eliminación de hollín.
- Revisión del material refractario de tapaderas de la caldera.
- Revisión de empaques en tapaderas de la caldera.
- Revisión y prueba de la válvula de seguridad de la caldera.
- Chequeo de válvulas, cheques y otros accesorios de la red de tuberías.
- Revisión del funcionamiento de trampas de vapor de todo el sistema.
- Revisión de aislamiento en todo el sistema de tuberías.
- Revisión de soportes, anclajes, abrazaderas, juntas u otros en la red de tuberías.

3.3.5. Rutinas anuales

- Limpieza del lado de agua de la caldera, eliminando incrustaciones y sedimentos, especial atención a los lugares de detección de nivel de agua y válvula de seguridad.
- Con base en el estado de la caldera, evaluar el tratamiento del agua, hacer los ajustes necesarios
- Revisión de juntas de los registros, limpiar, rectificar asientos y cambiar empaquetaduras si es necesario.
- Medición de espesores de la carcasa de la caldera.
- Pruebas de presión de la caldera.
- Limpieza del flotador del control de nivel de agua de la caldera.
- Limpieza de chimenea.

3.4. Análisis de resultados

Después de realizadas las reparaciones en la caldera de 80 BHP y en la red de tuberías, además del cambio y reparación de las trampas de vapor, se obtuvieron los siguientes datos de consumo de combustible, según la tabla XVII:

- Consumo diario: 26 gal
- Consumo por hora de trabajo efectivo de caldera: 15 gal

Con lo que se tiene una nueva eficiencia de caldera, aplicando la fórmula de la página 30:

$$\eta = \frac{1\ 260\ \text{lb/hr} (1\ 184,47 - 48,73)\ \text{BTU/lb}}{15\ \text{gal/hr} * 128\ 450\ \text{BTU/gal}} \times 100$$

$$\eta = 74.3 \%$$

Esta eficiencia podría aumentar al mejorar las condiciones del aislamiento de tuberías, reducción de régimen de purgas con un adecuado plan de tratamiento del agua y un mejor control de la combustión.

Se estima que la eficiencia podría aumentar al 82,5 %, con un ahorro en combustible de 7 605 gal anuales, equivalente a Q.129 285,00.

Tabla XVII. **Datos de consumo de combustible de la caldera de 80 BHP**

Fecha	Horas de operación	Horas efectivas	Vol. inicial (tanques)	Vol. final (tanques)	Consumo por día (gl)	Consumo efectivo por hora (gl)
16/03/2016	6	2,7	1 381	1 340	41	15
23/03/2016	5	2,3	1 160	1 125	35	16
30/03/2016	5	1,9	949	922	27	15
06/04/2016	5	1,9	719	684	35	19
13/04/2016	5	1,5	514	498	16	11
20/04/2016	5	1,5	378	350	28	19
27/04/2016	5	1,5	219	199	20	13
11/05/2016	5	1,5	1 143	1 125	18	12
18/05/2016	5	1,5	993	966	27	18
25/05/2016	5	1,5	842	816	26	17
01/06/2016	5	1,5	684	667	17	11

Fuente: elaboración propia.

4. FASE DE DOCENCIA

4.1. Capacitación del personal

Un personal debidamente capacitado es de vital importancia para una operación segura y eficiente del sistema de generación y distribución de vapor, para asegurarse que la capacitación sea efectiva se deben considerar los siguientes puntos.

- Explicar y demostrar la forma correcta de realizar las tareas
- Permitir al personal que practique bajo la supervisión del capacitador
- Permitir al personal que se desempeñe solo
- Presentar un número limitado de conceptos por sesión de entrenamiento
- Estimular la participación de los participantes
- Usar material audiovisual
- Evaluar periódicamente al personal
- Capacitar al personal de acuerdo a las evaluaciones

4.2. Operación eficiente de las calderas

Una caldera es un equipo generador de vapor que consiste en un recipiente lleno de agua y que está sometido a altas presiones y temperaturas en el cual se encuentran una serie de elementos que permiten mantener controlada tanto la generación como la distribución de vapor.

La generación de vapor por medio de una caldera es una operación crítica que requiere mucha atención por parte del personal de operación y

mantenimiento. Para lograr una operación eficiente de la caldera es muy importante la observación y atención a sus parámetros de funcionamiento.

4.3. Registros de operación

El registro de datos de la operación de una caldera es una herramienta valiosa para identificar las pérdidas de eficiencia y sus causas. El registro continuo de datos de operación detecta las desviaciones de un funcionamiento normal e indica las áreas que necesitan atención.

En instalaciones pequeñas el registro de los datos puede hacerse una vez por turno para algunos datos, diaria o semanalmente para otros. El propósito es establecer un sistema de recopilación de datos para medir y mantener la eficiencia del sistema.

Un registro completo de la operación de la caldera comprenderá la siguiente información.

- Presión de vapor.
- Flujo de vapor.
- Temperatura del vapor.
- Presión y temperatura del combustible.
- Ajustes del regulador de entrada de aire del quemador.
- Apariencia de la llama.
- Temperatura de gases en chimenea.
- Contenido de oxígeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono de gases en chimenea.
- Medición de apariencia de gases en chimenea (índice de opacidad).
- Temperatura del agua de alimentación.

- Parámetros del análisis del agua de alimentación y de la caldera.
- Régimen de purgas.
- Condiciones anormales, como fugas de vapor, agua o combustible, vibraciones, ruidos anormales, etc.

4.4. Seguridad en el área de calderas

La seguridad es imprescindible cuando se operan calderas y se maneja vapor a alta presión y temperatura, situaciones de riesgo tanto para la salud de los empleados como para la integridad de las instalaciones y el medio ambiente pueden ser evitadas observando las normas de seguridad en el área de trabajo.

Solo trabajadores autorizados y debidamente capacitados deben operar y dar mantenimiento a las calderas. Los operadores de las calderas deben inspeccionar las calderas con frecuencia en búsqueda de condiciones inusuales de operación que puedan llegar a provocar desde accidentes pequeños hasta accidentes tan grandes como la explosión de una caldera.

A continuación se dan algunas recomendaciones generales de seguridad en la operación de calderas.

- Generar un sistema de inspección y mantenimiento a los dispositivos de seguridad de los equipos, tales como presostatos, termostatos, sensores en nivel de agua, columna de nivel, etc.
- Pruebas de válvulas de seguridad, evitando que se calcen por efectos de incrustaciones.
- Verificar el correcto funcionamiento del quemador, haciendo pruebas de apagado a niveles alto y bajo de agua en el interior de la caldera.
- Mantener un control continuo de la calidad del agua de alimentación, así como de los tratamientos químicos.

- Mantener expedientes de integridad mecánica de cada equipo.
- Realizar pruebas de corrosión para estimar el espesor de las paredes sometidas a presión.

El orden y la limpieza son parte de la prevención de riesgos, ya que la falta de los mismos es la causa de accidentes. El área de calderas debe estar libre de obstáculos que limiten la locomoción de operadores y técnicos de mantenimiento; evitar el almacenamiento de cualquier tipo de materiales ajenos al área de calderas, sobre todos materiales inflamables.

Equipo de seguridad personal debe ser usado en el área de calderas y en cualquier área del hospital donde se realicen trabajos de mantenimiento, a continuación el equipo de protección personal recomendado.

- Guantes para protección contra riesgo mecánico, eléctrico, químico y térmico.
- Casco de seguridad para proteger la cabeza contra impactos.
- Protección auditiva para proteger los oídos de altos niveles de ruido.
- Protección para vías respiratorias para protegerse de polvo, gases, hollín, etc., cuando se realicen trabajos de mantenimiento.
- Anteojos de seguridad para proteger los ojos de gases, combustible, productos químicos, etc.
- Calzado de seguridad con suela antideslizante y de ser posible con punta de acero.

Se deben ubicar señalizaciones de seguridad en el área de calderas, tales como acceso restringido a personas no autorizadas, peligros de áreas calientes, prohibición de encender llama y fumar, peligro por productos químicos, peligros de choque eléctrico y ubicación de extintores tipo BC (de CO₂).

4.5. Importancia del mantenimiento preventivo

Las calderas integran una de las instalaciones industriales que pueden implicar un alto riesgo en caso de fallar. La razón es que funcionan a presión y una omisión o negligencia en las tareas de mantenimiento puede ocasionar una explosión. Los accidentes se producen generalmente por el colapso de alguno de los componentes del sistema, por ejemplo, la corrosión o fallas del instrumental de seguridad.

4.6. Fichas de mantenimiento

- Ficha técnica del equipo

En el documento donde se reflejan los datos del equipo, tales como código, fabricante, fecha de entrada, fecha de fabricación, descripción, localización del equipo y otros datos de interés, como número de modelo y serie. Se deben reflejar también datos de contacto del proveedor del equipo que pudieran ser de interés ante cualquier avería o consulta.

Además de la ficha técnica, el responsable de mantenimiento debe tener un archivo con otros documentos relacionados con el equipo, como pueden ser catálogos, manual del usuario, instrucciones de uso, esquema de funcionamiento y medidas preventivas a tomar para evitar riesgos sobre las personas. En el apéndice 6 se muestra un ejemplo de este tipo de ficha.

- Registro de rutinas de mantenimiento

Para asegurarse que las rutinas de inspección y mantenimiento se realicen a tiempo se debe programar y registrar en forma mensual para las rutinas diarias,

semanales y mensuales, y anual para las rutinas semestrales y anuales. En el apéndice 7 y 8 se muestran ejemplos de estos registros.

- Historial de inspecciones y reparaciones

Formato en el cual se registran cada una de las operaciones realizadas en el equipo tanto el mantenimiento preventivo como correctivo. En caso que sea necesaria la sustitución o reparación de un componente del equipo, se anota en la ficha, así como también la fecha, el tiempo de parada, el importe del repuesto o reparación, con el fin de que el responsable de mantenimiento lleve el control de repuestos y gastos. En el apéndice 9 se muestra un ejemplo de este tipo de ficha.

CONCLUSIONES

1. La caldera de 80 BHP fue sometida durante el proyecto a una reparación mayor por problemas de incrustaciones y corrosión severas; entre otros mantenimientos, fueron cambiados 46 tubos su interior. La caldera de 60 BHP no presenta condiciones tan severas, pero necesita urgentemente una limpieza general de su interior.
2. La propuesta logra un aumento en la eficiencia del sistema de 53,1 % a 74,3 % y puede llegar hasta el 82,5 % si se aplica el cien por ciento de las recomendaciones.
3. El sistema de ablandado del agua de alimentación fue rehabilitado después de varios años de no utilizarse, pero no es suficiente para bajar la dureza hasta el nivel recomendable, para evitar incrustaciones es necesario el tratamiento químico con anti incrustantes.
4. El adecuado tratamiento del agua de alimentación trae grandes beneficios al sistema de generación y distribución de vapor: evita incrustaciones, corrosión, oxidación, arrastres de condensados, pero lo más importante es que genera ahorros energéticos en gasto de combustible, agua y electricidad.
5. La falta de tratamiento químico del agua está generando pérdidas de energía y gastos excesivos en consumo de combustible de más de Q.61 000 anuales.

6. La falta de análisis, control y mantenimiento del sistema de combustión de la caldera está generando pérdidas de energía y gastos excesivos de más de Q.13 000 anuales en consumo de combustible.

7. Un buen plan de mantenimiento, con personal capacitado y los recursos suficientes, puede hacer un sistema de generación y distribución de vapor más eficiente, sin paros imprevistos de operación y con ahorros en el consumo de energía.

RECOMENDACIONES

Al director ejecutivo del hospital:

1. Hacer las gestiones necesarias para contratar a una empresa especializada en el análisis y tratamiento del agua para las calderas, para que con base en los resultados, proponga y de seguimiento a un plan de tratamiento adecuado; de lo contrario, las calderas volverán presentar incrustaciones y corrosión que generarán gastos innecesarios en consumo de combustible y reparaciones.

Al subdirector de servicios generales y mantenimiento:

2. Garantizar mensualmente el análisis de gases de combustión, con pruebas de opacidad, temperatura de gases, contenido de dióxido y monóxido de carbono, con el fin de controlar el funcionamiento del sistema de combustión; con esto se logrará una operación económica, con menos fallas y segura al medio ambiente.
3. Programar pruebas de presión periódicas a las calderas; hacer mediciones de espesores de la carcasa envolvente, para asegurar que estén aptas para soportar la presión de trabajo a las cuales están sometidas y evitar accidentes serios en las instalaciones.
4. Asegurar la aplicación de uno de los dos tratamientos para calderas inactivas recomendado en este trabajo a la caldera de 60 BHP mientras esté fuera de uso para evitar su deterioro por corrosión y oxidación.

5. Establecer un plan de mantenimiento preventivo con procedimientos específicos, supervisión inmediata y capacitación del personal, para preservar las condiciones operacionales de las instalaciones.

Al jefe de mantenimiento:

6. Hacer chequeos periódicos del funcionamiento de las trampas de vapor para asegurar la calidad del vapor en las redes de distribución y lograr un mejor aprovechamiento de la energía del vapor en los equipos.
7. Hacer una inspección al aislamiento térmico de toda la red de distribución de vapor y retorno de condensado para asegurarse que todas las tuberías tengan un aislamiento térmico en buenas condiciones para evitar pérdidas de calor al medio ambiente.
8. Cuidar el orden y la limpieza del área de calderas, limitar el acceso solo al personal de operación, mantenimiento y supervisión para evitar riesgos de seguridad al personal y a los equipos.

BIBLIOGRAFÍA

1. ANDRADE LÓPEZ, Alfredo Arnoldo. *Mantenimiento preventivo para calderas y circuitos de refrigeración en función del tratamiento del agua de alimentación*. Tesis de graduación de Ing. Mecánico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2005. 98p.
2. BOHÓRQUEZ GUZMAN, Roberto Daniel. *Auditoría energética al circuito de vapor y condensado de una planta de elaboración de café liofilizado*.
[En línea]. <<https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/90348/D-79731.pdf>>. [Consulta: 29 de agosto de 2016].
3. FENERCOM. *Guía básica de calderas industriales eficientes*. Conserjería de Economía y Hacienda, Comunidad de Madrid. [En línea]. <http://recursosbiblio.url.edu.gt/publicjlg/biblio_sin_paredes/fac_ing/Quimica/cald_efi_indus.pdf>. [Consulta: 3 de agosto de 2016].
4. LARA MOLINA, Heidi Andrea. *Propuesta para incrementar la eficiencia del sistema de vapor en una planta de fabricación de cosméticos*. Tesis de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 88p.

5. LARIOS REN, Hugo Tomás. *Diseño del plan de mantenimiento del área de calderas del hospital nacional Santa Elena de Santa Cruz del Quiché, El Quiché*. Tesis de graduación de Ing. Mecánico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2011. 138p.
6. LIMONE TORRES, Ciro. *Diseño e instalación de aislante térmico en tuberías y equipos*. [En línea].<<http://159.90.80.55/tesis/000155516.pdf>>.[Consulta: 13 de septiembre de 2016].
7. SEVERNS,W.H., DEGLER, H.E., MILLES,J.C. *Energía mediante vapor, aire o gas*. España: Editorial Reverté, 2007. 503 p.
8. SMITH, Edward H. *Manual del ingeniero mecánico*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1 998. Vol. 3. 406 p.
9. THERMAL Engineering LTDA. *Análisis de la eficiencia en calderas*. [En línea].<http://www.thermal.cl/prontus_thermal/site/edic/base/port/documentos.html>. [Consulta: 6 de agosto de 2016].
10. TLV. *Erosión en tuberías de vapor y condensados*. [En línea].<<http://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/piping-erosion.html>>. [Consulta: 12 de septiembre de 2016].

APÉNDICES

Apéndice 1. Tubos extraídos de la caldera de 80 BHP



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Caldera con tubos nuevos instalados**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Herramienta para calzar los tubos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Manifold en área de calderas**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Válvula con fuga en manifold**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Ficha técnica del equipo**

HOSPITAL REGIONAL DE COBÁN FICHA TÉCNICA DE LA MÁQUINA/EQUIPO			
EQUIPO		CÓDIGO	
FABRICANTE		FECHA DE FABRICACIÓN	
MODELO		SERIE	
DESCRIPCIÓN			
CONTACTOS			
NOMBRE	CARGO	EMPRESA	TELÉFONO
OBSERVACIONES			

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Registro de inspecciones y mantenimiento (rutinas diarias y semanales)**

HOSPITAL REGIONAL DE COBÁN																																			
Registro de Inspección y Mantenimiento																																			
Rutinas Diarias y Semanales																																			
TAREAS	P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31			
Caldera																																			
Presión de la caldera	D																																		
Nivel de agua de la caldera	D																																		
Purgas (fondo/nivel/superficie)	D																																		
Temperatura de gases en chimenea	D																																		
Funcionamiento indicadores de nivel	D																																		
Pruebas de paro (nivel alto y bajo del agua)	S																																		
Quemador																																			
Registro de nivel de combustible	D																																		
Revisión de forma y color de llama	D																																		
Limpieza del filtro de bomba de combustible	S																																		
Chequeo y limpieza de fotocelda	S																																		
Agua de alimentación																																			
Chequeo del ablandador	D																																		
Chequeo de químicos	D																																		
Temperatura del agua	D																																		
Revisión de bomba de alimentación de agua	S																																		
Tratamiento del agua según programa	S																																		
Sistema general de vapor																																			
Cheque de fugas (agua, vapor, combustible, gases)	S																																		

P=Periodicidad; D=Diario; S=Semanal

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. Registro de inspecciones y mantenimiento (rutinas mensuales, semestrales y anuales)

HOSPITAL REGIONAL DE COBÁN													
Registro de Inspección y Mantenimiento													
Rutinas Mensuales, Semestrales y Anuales													
TAREAS	P	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Caldera													
Limpieza de panel de control	M												
Análisis de gases de combustión	M												
Funcionamiento de instrumentos de control	M												
Pruebas de paro de emergencia	M												
Limpieza de tubos de humo	S												
Revisión de refractario de tapaderas	S												
Revisión de empaques de tapaderas	S												
Limpieza del caldera lado de agua	A												
Revisión y prueba de válvula de seguridad	A												
Revisión de registros (tortugas): Limpieza, rectificación, empaques	A												
Medición de espesor de la carcasa	A												
Pruebas de presión	A												
Limpieza del flotador del control de nivel de agua	A												
Limpieza de la chimenea	A												
Quemador													
Limpieza y chequeo general	M												
Limpieza de boquillas	M												
Limpieza y ajuste de electrodos	M												
Chequeo de aisladores de electrodos	M												
Revisión de cables de ignición	M												
Revisión de acople bomba de combustible	M												
Revisión de acople del ventilador	M												
Agua de alimentación													
Muestreo y análisis de agua de alimentación	M												
Muestreo y análisis de agua de la caldera	M												
Evaluación del tratamiento del agua, en base a condiciones de la caldera	A												
Sistema general de vapor													
Chequeo de válvulas, cheques y accesorios	S												
Funcionamiento de trampas de vapor	S												
Revisión de aislamientos e tuberías	S												
Revisión de soportes, anclajes, abrazaderas y juntas	S												

P=Periodicidad; D=Diario; S=Semanal; M= Mensual

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Historial de inspecciones y reparaciones**

HOSPITAL REGIONAL DE COBÁN	
HISTORIAL DE INSPECCIONES Y REPARACIONES	
MÁQUINA/EQUIPO	CÓDIGO
TAREA	
	INICIO
	FINAL
REPUESTOS	COSTO
TAREA	
	INICIO
	FINAL
REPUESTOS	COSTO
TAREA	
	INICIO
	FINAL
REPUESTOS	COSTO

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Tabla de datos de consumo de combustible caldera de 80BHP**

Fecha	Hrs/dia	Medida	Volumen	Consumo/dia	Consumo/hr	Hrs-caldera	Consumo/hr-caldera
07/06/2016	5	48	548	16	3	1.5	11
06/06/2016	5	49	564	17	3	1.5	11
05/06/2016	5	50	581	26	5	1.5	17
04/06/2016	5	51.5	607	17	3	1.5	11
03/06/2016	5	52.5	624	26	5	1.5	17
02/06/2016	5	54	650	17	3	1.5	11
01/06/2016	5	55	667	17	3	1.5	11
31/05/2016	5	56	684	17	3	1.5	11
30/05/2016	5	57	701	27	5	1.5	18
29/05/2016	5	58.5	728	26	5	1.5	17
28/05/2016	5	60	754	18	4	1.5	12
27/05/2016	5	61	772	26	5	1.5	17
26/05/2016	5	62.5	798	18	4	1.5	12
25/05/2016	5	63.5	816	26	5	1.5	17
24/05/2016	5	65	842	27	5	1.5	18
23/05/2016	5	66.5	869	17	3	1.5	11
22/05/2016	5	67.5	886	27	5	1.5	18
21/05/2016	5	69	913	27	5	1.5	18
20/05/2016	4	70.5	940	9	2	1.2	8
19/05/2016	5	71	949	17	3	1.5	11
18/05/2016	5	72.5	966	27	5	1.5	18
17/05/2016	5	73.5	993	27	5	1.5	18
16/05/2016	5	75	1020	17	3	1.5	11
15/05/2016	4	76	1037	18	5	1.2	15
14/05/2016	5	77	1055	27	5	1.5	18
13/05/2016	5	78.5	1082	26	5	1.5	17
12/05/2016	5	80	1108	17	3	1.5	11
11/05/2016	5	81	1125	18	4	1.5	12
10/05/2016	5	82	1143	17	3	1.5	11
09/05/2016	5	83	1160	18	4	1.5	12
08/05/2016	6	84	1178	17	3	1.8	9
07/05/2016	6	85	1195	26	4	1.8	14
06/05/2016	6	86.5	1221	102	17	1.8	57
05/05/2016	7	92.5	1323	9	1	2.1	4
04/05/2016	5	93	1332	53	10.6	1.5	35
03/05/2016	5	16.5	98	16	3	1.5	11
02/05/2016	3	18	114	11	4	0.9	12
01/05/2016	4.5	19	125	18	4	1.4	13
30/04/2016	5	20.5	143	18	4	1.5	12
29/04/2016	5	22	161	18	4	1.5	12
28/04/2016	5	23.5	179	20	4	1.5	13
27/04/2016	5	25	199	20	4	1.5	13
26/04/2016	5	26.5	219	13	3	1.5	9

Continuación de apéndice 10.

25/04/2016	5	27.5	232	21	4	1.5	14
24/04/2016	5	29	253	21	4	1.5	14
23/04/2016	5	30.5	274	18	4	1.5	12
22/04/2016	5	32.5	292	33	7	1.5	22
21/04/2016	6.5	34	325	25	4	2.0	13
20/04/2016	5	35.5	350	28	6	1.5	19
19/04/2016	5	37.5	378	23	5	1.5	15
18/04/2016	5	39	401	16	3	1.5	11
17/04/2016	4	40	417	16	4	1.2	13
16/04/2016	5	41	433	24	5	1.5	16
15/04/2016	5	42.5	457	24	5	1.5	16
14/04/2016	5	44	481	17	3	1.5	11
13/04/2016	5	45	498	16	3	1.5	11
12/04/2016	5.5	46	514	34	6	1.65	21
11/04/2016	5	48	548	25	5	1.5	17
10/04/2016	5	49.5	573	34	7	1.5	23
09/04/2016	4	51.5	607	17	4	1.2	14
08/04/2016	5	52.5	624	34	7	1.5	23
07/04/2016	5	54.5	658	26	5	1.5	17
06/04/2016	5	56	684	35	7	1.5	23
05/04/2016	5	58	719	17	3	1.5	11
04/04/2016	5	59	736	44	9	1.5	29
03/04/2016	5	61.5	780	36	7	1.5	24
02/04/2016	5	63.5	816	35	7	1.5	23
01/04/2016	5	65.5	851	35	7	1.5	23
31/03/2016	5	67.5	886	36	7	1.5	24
30/03/2016	5	69.5	922	27	5	1.5	18
29/03/2016	5	71	949	35	7	1.5	23
28/03/2016	4	73	984	27	7	1.2	23
27/03/2016	5	74.5	1011	35	7	1.5	23
26/03/2016	5	76.5	1046	27	5	1.5	18
25/03/2016	5	78	1073	26	5	1.5	17
24/03/2016	5	79.5	1099	26	5	1.5	17
23/03/2016	5	81	1125	35	7	1.5	23
22/03/2016	6	83	1160	35	6	1.8	19
21/03/2016	5	85	1195	8	2	1.5	5
20/03/2016	6	87	1203	61	10	1.8	34
19/03/2016	5	89	1264	26	5	1.5	17
18/03/2016	6.5	90.5	1290	25	4	2.0	13
17/03/2016	4	92	1315	25	6	1.2	21
16/03/2016	6	93.5	1340	41	7	1.8	23

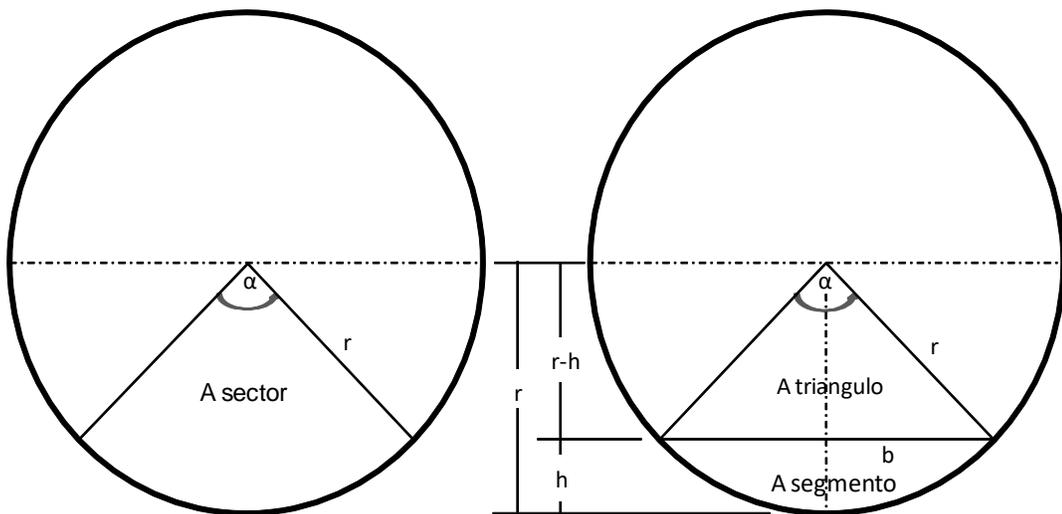
Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Ecuación para construir tablas de aforo para tanques cilíndricos

Para encontrar la fórmula a utilizar para construir las tablas de aforo de los tanques se usa el siguiente diagrama:

Figura A1: Diagrama para cálculo de áreas sector y segmento de un círculo



Fuente: elaboración propia.

Continuación del anexo 1.

Para obtener el volumen de un tanque cilíndrico horizontal, se necesita encontrar el área del segmento mostrado en gráfica de la derecha del diagrama anterior, esta área multiplicada por la longitud del tanque da el valor del volumen del tanque a esa altura (h).

$$V = A_{\text{segmento}} * L$$

Donde:

- V: volumen del combustible en el tanque
- L: longitud del tanque

Según el diagrama:

$$A_{\text{segmento}} = A_{\text{sector}} - A_{\text{triángulo}}$$

El área de un sector circular, se calcula mediante el producto del número de radianes del ángulo con el radio de la circunferencia elevado al cuadrado, dividido entre dos:

$$A_{\text{sector}} = \frac{\alpha r^2}{2}$$

Según el diagrama:

$$\cos(\alpha/2) = \frac{r-h}{R}; \quad (\alpha/2) = \text{ArCos} \left(\frac{r-h}{r} \right)$$

Continuación del anexo 1.

Despejando se tiene:

$$\alpha = 2 \operatorname{ArCos} \left(\frac{r-h}{R} \right)$$

Sustituyendo el ángulo “ α ” se obtiene la ecuación para el área del sector “A sector”:

$$A_{\text{sector}} = \operatorname{ArCos} \left(\frac{r-h}{r} \right) r^2$$

Para encontrar la ecuación de área del triángulo “A triángulo”.

Según el diagrama:

$$\operatorname{Sen} (\alpha/2) = \frac{b}{r}$$

Despejando y sustituyendo:

$$b = r \operatorname{Sen} (\alpha/2) = r \operatorname{Sen} \left(\operatorname{ArCos} \left(\frac{r-h}{r} \right) \right)$$

Según el diagrama se sabe que:

$$A_{\text{triángulo}} = b (r-h)$$

Sustituyendo, se obtiene el área del triángulo:

$$A_{\text{triángulo}} = (r-h) r \operatorname{Sen} \left(\operatorname{ArCos} \left(\frac{r-h}{R} \right) \right)$$

Continuación del anexo 1.

Con las ecuaciones del área del sector y del área del triángulo, se encuentra la ecuación del área del segmento:

$$A_{\text{Segmento}} = \text{ArCos} \left(\frac{r-h}{R} \right) r^2 - (r-h) r \text{Sen} \left(\text{ArCos} \left(\frac{r-h}{r} \right) \right)$$

Si la expresión anterior se multiplica por la longitud (L), se encuentra el volumen de combustible en un tanque al conocer la altura (h) del mismo en el tanque y el radio del tanque cilíndrico horizontal:

$$V = \text{ArCos} \left(\frac{r-h}{R} \right) r^2 - (r-h) r \text{Sen} \left(\text{ArCos} \left(\frac{r-h}{r} \right) \right) * L$$

Donde:

- V: volumen del tanque
- r: radio del cilindro del tanque
- h: altura del combustible en el tanque
- L: longitud del tanque

Fuente: elaboración propia.

Anexo 2. Tabla presión – temperatura

Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de presiones

Presión bar	Temp. °C	Volumen específico m ³ /kg		Energía interna kJ/kg		Entalpía kJ/kg			Entropía kJ/kg K	
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor vaporiz.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor sat.
		$v_f \times 10^2$	v_g	u_f	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_g
0,04	28,96	1,0040	34,800	121,45	2415,2	121,46	2432,9	2554,4	0,4226	8,4746
0,06	36,16	1,0064	23,739	151,53	2425,0	151,53	2415,9	2567,4	0,5210	8,3304
0,08	41,51	1,0084	18,103	173,87	2432,2	173,88	2403,1	2577,0	0,5926	8,2287
0,10	45,81	1,0102	14,674	191,82	2437,9	191,83	2392,8	2584,7	0,6493	8,1502
0,20	60,06	1,0172	7,849	251,38	2456,7	251,40	2358,3	2609,7	0,8320	7,9085
0,30	69,10	1,0223	5,229	289,20	2468,4	289,23	2336,1	2625,3	0,9439	7,7686
0,40	75,87	1,0265	3,993	317,53	2477,0	317,58	2319,2	2636,8	1,0259	7,6700
0,50	81,33	1,0300	3,240	340,44	2483,9	340,49	2305,4	2645,9	1,0910	7,5939
0,60	85,94	1,0331	2,732	359,79	2489,6	359,86	2293,6	2653,5	1,1453	7,5320
0,70	89,95	1,0360	2,365	376,63	2494,5	376,70	2283,3	2660,0	1,1919	7,4797
0,80	93,50	1,0380	2,087	391,58	2498,8	391,66	2274,1	2665,8	1,2329	7,4346
0,90	96,71	1,0410	1,869	405,06	2502,6	405,15	2265,7	2670,9	1,2695	7,3949
1,00	99,63	1,0432	1,694	417,36	2506,1	417,46	2258,0	2675,5	1,3026	7,3594
1,50	111,4	1,0528	1,159	466,94	2519,7	467,11	2226,5	2693,6	1,4336	7,2233
2,00	120,2	1,0605	0,8857	504,49	2529,5	504,70	2201,9	2706,7	1,5301	7,1271
2,50	127,4	1,0672	0,7187	535,10	2537,2	535,37	2181,5	2716,9	1,6072	7,0527
3,00	133,6	1,0732	0,6058	561,15	2543,6	561,47	2163,8	2725,3	1,6718	6,9919
3,50	138,9	1,0786	0,5243	583,95	2548,9	584,33	2148,1	2732,4	1,7275	6,9405
4,00	143,6	1,0836	0,4625	604,31	2553,6	604,74	2133,8	2738,6	1,7766	6,8959
4,50	147,9	1,0882	0,4140	622,25	2557,6	623,25	2120,7	2743,9	1,8207	6,8565
5,00	151,9	1,0926	0,3749	639,68	2561,2	640,23	2108,5	2748,7	1,8607	6,8212
6,00	158,9	1,1006	0,3157	669,90	2567,4	670,56	2086,3	2756,8	1,9312	6,7600
7,00	165,0	1,1080	0,2729	696,44	2572,5	697,22	2066,3	2763,5	1,9922	6,7080
8,00	170,4	1,1148	0,2404	720,22	2576,8	721,11	2048,0	2769,1	2,0462	6,6628
9,00	175,4	1,1212	0,2150	741,83	2580,5	742,83	2031,1	2773,9	2,0946	6,6226
10,0	179,9	1,1273	0,1944	761,68	2583,6	762,81	2015,3	2778,1	2,1387	6,5863
15,0	198,3	1,1539	0,1318	843,16	2594,5	844,84	1947,3	2792,2	2,3150	6,4448
20,0	212,4	1,1767	0,09963	906,44	2600,3	908,79	1890,7	2799,5	2,4474	6,3409
25,0	224,0	1,1973	0,07998	959,11	2603,1	962,11	1841,0	2803,1	2,5547	6,2575
30,0	233,9	1,2165	0,06668	1004,8	2604,1	1008,4	1795,7	2804,2	2,6457	6,1869
35,0	242,6	1,2347	0,05707	1045,4	2603,7	1049,8	1753,7	2803,4	2,7253	6,1253
40,0	250,4	1,2522	0,04978	1082,3	2602,3	1087,3	1714,1	2801,4	2,7964	6,0701
45,0	257,5	1,2692	0,04406	1116,2	2600,1	1121,9	1676,4	2798,3	2,8610	6,0199
50,0	264,0	1,2859	0,03944	1147,8	2597,1	1154,2	1640,1	2794,3	2,9202	5,9734

Fuente: RENEDO ESTÉBANEZ, Carlos J.

<http://personales.unican.es/reneDOC/docencia.htm#Hlt5>. Consultado: 2 de septiembre de 2016.

Anexo 3. Tabla temperatura – presión

Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de temperaturas

Temp. °C	Presión bar	Volumen específico m ³ /kg		Energía interna kJ/kg		Entalpía kJ/kg			Entropía kJ/kg K	
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor vaporiz.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor sat.
		$v_f \times 10^3$	v_g	u_f	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_g
.01	0,00811	1,0002	206,138	0,00	2375,3	0,01	2501,3	2501,4	0,0000	9,1562
4	0,00813	1,0001	157,232	16,77	2380,9	16,78	2491,9	2508,7	0,0610	9,0514
5	0,00872	1,0001	147,120	20,97	2382,3	20,98	2489,8	2510,6	0,0761	9,0257
6	0,00935	1,0001	137,734	25,19	2383,6	25,20	2487,2	2512,4	0,0912	9,0003
8	0,01072	1,0002	120,917	33,59	2386,4	33,60	2482,5	2516,1	0,1212	8,9501
10	0,01228	1,0004	106,379	42,00	2389,2	42,01	2477,7	2519,8	0,1510	8,9008
11	0,01312	1,0004	99,857	46,20	2390,5	46,20	2475,4	2521,6	0,1658	8,8765
12	0,01402	1,0005	93,784	50,41	2391,9	50,41	2473,0	2523,4	0,1806	8,8524
13	0,01497	1,0007	88,124	54,60	2393,3	54,60	2470,7	2525,3	0,1953	8,8285
14	0,01598	1,0008	82,848	58,79	2394,7	58,80	2468,3	2527,1	0,2099	8,8048
15	0,01705	1,0009	77,926	62,99	2396,1	62,99	2465,9	2528,9	0,2245	8,7814
16	0,01818	1,0011	73,333	67,18	2397,4	67,19	2463,6	2530,8	0,2390	8,7582
17	0,01938	1,0012	69,044	71,38	2398,8	71,38	2461,2	2532,6	0,2535	8,7351
18	0,02064	1,0014	65,038	75,57	2400,2	75,58	2458,8	2534,4	0,2679	8,7123
19	0,02198	1,0016	61,293	79,76	2401,6	79,77	2456,5	2536,2	0,2823	8,6897
20	0,02339	1,0018	57,791	83,95	2402,9	83,96	2454,1	2538,1	0,2966	8,6672
21	0,02487	1,0020	54,514	88,14	2404,3	88,14	2451,8	2539,9	0,3109	8,6450
22	0,02645	1,0022	51,447	92,32	2405,7	92,33	2449,4	2541,7	0,3251	8,6229
23	0,02810	1,0024	48,574	96,51	2407,0	96,52	2447,0	2543,5	0,3393	8,6011
24	0,02985	1,0027	45,883	100,70	2408,4	100,70	2444,7	2545,4	0,3534	8,5794
25	0,03169	1,0029	43,360	104,88	2409,8	104,89	2442,3	2547,2	0,3674	8,5580
26	0,03363	1,0032	40,994	109,06	2411,1	109,07	2439,9	2549,0	0,3814	8,5367
27	0,03567	1,0035	38,774	113,25	2412,5	113,25	2437,6	2550,8	0,3954	8,5156
28	0,03782	1,0037	36,690	117,42	2413,9	117,43	2435,2	2552,6	0,4093	8,4946
29	0,04008	1,0040	34,733	121,60	2415,2	121,61	2432,8	2554,5	0,4231	8,4739
30	0,04246	1,0043	32,894	125,78	2416,6	125,79	2430,5	2556,3	0,4369	8,4533
31	0,04496	1,0046	31,165	129,96	2418,0	129,97	2428,1	2558,1	0,4507	8,4329
32	0,04759	1,0050	29,540	134,14	2419,3	134,15	2425,7	2559,9	0,4644	8,4127
33	0,05034	1,0053	28,011	138,32	2420,7	138,33	2423,4	2561,7	0,4781	8,3927
34	0,05324	1,0056	26,571	142,50	2422,0	142,50	2421,0	2563,5	0,4917	8,3728
35	0,05628	1,0060	25,216	146,67	2423,4	146,68	2418,6	2565,3	0,5053	8,3531
36	0,05947	1,0063	23,940	150,85	2424,7	150,86	2416,2	2567,1	0,5188	8,3336
38	0,06632	1,0071	21,602	159,20	2427,4	159,21	2411,5	2570,7	0,5458	8,2950
40	0,07384	1,0078	19,523	167,56	2430,1	167,57	2406,7	2574,3	0,5725	8,2570
45	0,09593	1,0099	15,258	188,44	2436,8	188,45	2394,8	2583,2	0,6387	8,1648
50	0,1235	1,0121	12,032	209,32	2443,5	209,33	2382,7	2592,1	,7038	8,0763

Fuente: RENEDO ESTÉBANEZ, Carlos J.

<http://personales.unican.es/reneDOC/docencia.htm#Hlt5>. Consultado: 2 de septiembre de 2016.