



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR  
PARA LA PRODUCCIÓN DE QUESOS EN LA QUESERA “EL  
NEVADITO”, PARROQUIA SAN JUAN CHIMBORAZO**

**TESIS DE GRADO**

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR:**

**GALO ARMANDO TORRES VACACELA**

**RIOBAMBA – ECUADOR**

**2015**

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco a Dios, por darme una nueva oportunidad, guiar mis pasos y ayudarme a alcanzar mis metas y objetivos.*

*A mí amada familia que con su gran e incondicional apoyo supieron ser un soporte invaluable en todo momento de mi vida.*

*De igual manera al Ing. Hanníbal Brito, al Dr. Robert Cazar, y al Ing. José Usiña; Director y Colaboradores del Tribunal de Tesis, quienes aportaron con sus conocimientos, experiencia y esfuerzo para la culminación de este trabajo de investigación.*

*Por último, quisiera dejar constancia de mi sincero agradecimiento a todos y cada uno de mis amigos que de una u otra forma han contribuido con la realización del presente trabajo.*

**GALO**

## **DEDICATORIA**

*Yo, **Galo Armando Torres Vacacela** dedico este trabajo a mis amados padres Galo y Carmen, a mis hermanas Irma, Verónica, a mis cuñados Fabián y Julio, y por supuesto a mis queridos sobrinos; que con amor, dedicación, comprensión, paciencia y carisma me han brindado su incondicional apoyo para enfrentar los retos de la vida.*

*A todos mis familiares amigos, amigas y demás seres queridos que creyeron y estuvieron junto a mí y me brindaron su apoyo incondicional.*

**GALO**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**

**HOJA DE FIRMAS**

El tribunal de tesis certifica que: El trabajo de investigación “OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR PARA LA PRODUCCIÓN DE QUESOS EN LA QUESERA “EL NEVADITO”, PARROQUIA SAN JUAN CHIMBORAZO”, de responsabilidad del señor Galo Armando Torres Vacacela ha sido prolijamente revisado por los Miembros del Tribunal de Tesis, quedando autorizada su presentación.

<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Dra. Nancy Veloz. <b>DECANA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS</b>	.....	.....
Dr. Juan Marcelo Ramos. <b>DIRECTOR ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA</b>	.....	.....
Ing. Hanníbal Brito M. PhD. <b>DIRECTOR DE TESIS</b>	.....	.....
Dr. Robert Cazar. <b>COLABORADOR DE TESIS</b>	.....	.....
Ing. José Usiña. <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>	.....	.....
Abg. Bertha Quintanilla <b>COORDINADORA SISBIB</b>	.....	.....

*Yo **GALO ARMANDO TORRES VACACELA** soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta Tesis; y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado pertenece a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO”*

---

**GALO ARMANDO TORRES VACACELA**

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

A	Área de transferencia de calor. (m)
$C_{Ca}$	Concentración de calcio que se pretende eliminar del agua (mg/L).
$C_{Mg}$	Concentración de Mg que se desea eliminar del agua (mg/L).
$C_p$	Calor específico, (kcal/kg.C)
D	Diámetro. (m)
$D_e$	Diámetro externo (m).
$D_i$	Diámetro interno (m).
$D_m$	Diámetro medio (m).
E	Espesor (m).
<i>F</i>	Factor de vaporización
h	Entalpia del agua de alimentación (kcal/kg).
H	Entalpia del vapor a la presión final (kcal/kg)
$H_c$	Coefficiente de convección. (kcal/h.m <sup>2</sup> .C)
$h_e$	Coefficiente de convección para el fluido externo (Kcal/m <sup>2</sup> hC).
$h_{fg}$	Entalpia de vaporización a 100 C (kcal/kg).
$h_i$	Coefficiente de convección para el fluido interno (Kcal/m <sup>2</sup> hC).
k	Coefficiente de transmisión térmica del material. (kcal/h.m.C)
$k_m$	Coefficiente de conductividad media (Kcal/m.h.C)
l	Longitud. (m)
$m_l$	Masa del líquido. (kg)
$m_v$	Masa de vapor. (Kg)

$m_{vp}$	Masa de vapor producido por la caldera. (Kg/h)
$n_t$	Número de tubos
$Nu$	Modulo adimensional de Nusselt
$P_{c_{tr}}$	Peso del compuesto a tratar. (Kg)
$Pr$	Módulo adimensional de Prandtl.
$Pr_a$	Peso del reactivo a adicionar. (Kg)
$q_c$	Rapidez de transmisión calor por convección. (Kcal/h)
$q_k$	Rapidez de transmisión de calor por conducción. (Kcal/h)
$Qu$	Poder calorífico del diesel. (Kcal/kg)
$r$	Rendimiento del generador de vapor. (%).
$Re$	Módulo adimensional de Reynolds.
$R_{fi}$	Factor de incrustación en la superficie interna. ( $m^2.C.h/kcal$ ).
$R_{fe}$	Factor de incrustación en la superficie externa. ( $m^2.C.h/kcal$ ).
$T$	Temperatura. (C)
$T_{c1}$	Temperatura final del fluido caliente. (C)
$T_{c2}$	Temperatura inicial del fluido caliente. (C).
$T_{f1}$	Temperatura final del fluido frio. (C).
$T_{f2}$	Temperatura inicial del fluido frio. (C).
$U_e$	Coficiente integral de transmisión de calor externo ( $Kcal/m^2hC$ ).
$U_i$	Coficiente integral de transmisión de calor interno ( $Kcal/m^2hC$ ).
$v$	Velocidad. (m/s)
$ve$	Vaporización equivalente

	Densidad. ( $\text{Kg/m}^3$ )
$\mu$	Viscosidad dinámica. ( $\text{Kg/m.s}$ )
	Constante de Stefan – Boltzmann. ( $\text{kcal/m}^2.\text{h.K}^4$ )
$\Delta T_m$	Diferencia media logarítmica de temperatura. (C)
$(\Delta T)_2$	Diferencia de temperaturas en el extremo caliente. (C).
$(\Delta T)_1$	Diferencia de temperaturas en el extremo frío. (C).
T	Diferencia de temperaturas. (C)
T	Diferencia de temperatura (C).

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
ANTECEDENTES.....	2
JUSTIFICACION .....	3
OBJETIVOS .....	4
GENERAL .....	4
ESPECÍFICOS .....	4
CAPÍTULO I.....	5
1.MARCO TEORICO.....	5
1.1Leche.....	5
<i>1.1.1.Pasteurización.....</i>	5
<i>1.1.2.Elaboración del queso.....</i>	6
1.2.Generación de vapor .....	7
<i>1.2.1.Propiedades del vapor y sistemas de caldera .....</i>	7
<i>1.2.2.Calderas. ....</i>	8
<i>1.2.2.1.Cuerpo.....</i>	8
<i>1.2.2.2.Hogar. ....</i>	8
<i>1.2.2.3.Quemador.....</i>	8
<i>1.2.2.4.Cámara de agua. ....</i>	8
<i>1.2.2.5.Cámara de vapor. ....</i>	9
<i>1.2.2.6.Tubos de humo .....</i>	9
<i>1.2.2.7.Espejos o mamparas .....</i>	9
<i>1.2.2.8.Chimenea .....</i>	9
<i>1.2.2.9.Puertas de Explosión.....</i>	9
1.2.3.Accesorios .....	9
1.2.4.Tipos de calderas .....	11
<i>1.2.4.1.Calderas de tubos de humos o piro tubulares.....</i>	11
1.2.5.Transferencia térmica y funcionamiento .....	12
1.2.5.1.Conducción .....	12
1.2.6.Capacidad de producción de vapor en las calderas .....	15
1.2.7.Aislamiento Térmico .....	16
1.2.8.Agua de alimentación para caldera .....	17

<i>1.2.8.1.Tratamiento y acondicionamiento de agua para calderas.....</i>	<i>19</i>
<i>1.2.8.2.Incrustaciones .....</i>	<i>19</i>
<i>1.2.8.3.Prevencción de incrustación tratamiento externo .....</i>	<i>20</i>
<i>1.2.8.4.Prevencción de incrustación tratamiento interno.....</i>	<i>23</i>
<i>1.2.8.5.Corrosión .....</i>	<i>25</i>
<i>1.2.8.6.Espumas .....</i>	<i>28</i>
<i>1.2.8.7.Purga.....</i>	<i>28</i>
<i>1.2.8.8.Índices de Langelier, Ryznar y Puckorius.....</i>	<i>29</i>
<i>1.2.9.Conceptos sobre combustión.....</i>	<i>31</i>
<i>1.2.9.1.Relaciones aire/combustible. ....</i>	<i>33</i>
<i>1.2.9.2.Tipo de combustible .....</i>	<i>33</i>
<i>1.2.9.3.Poder calorífico .....</i>	<i>34</i>
<i>1.2.9.4.Calor cedido por el combustible .....</i>	<i>34</i>
<i>1.3.Optimización.....</i>	<i>34</i>
<i>1.3.1.Densidad de la mezcla gaseosa.....</i>	<i>35</i>
<i>1.3.2.Viscosidad de la mezcla gaseosa (<math>\mu</math>) .....</i>	<i>35</i>
<i>1.3.3.Calor específico de la mezcla .....</i>	<i>35</i>
<i>1.3.4.Coeficiente de conductividad térmica.....</i>	<i>36</i>
<i>1.3.5.Modulo adimensional de Nusselt .....</i>	<i>36</i>
<i>1.3.6.Número de Reynolds .....</i>	<i>37</i>
<i>1.3.7.Número de Prandtl.....</i>	<i>37</i>
<i>1.3.8.Coeficiente de convección.....</i>	<i>38</i>
<i>1.3.9.Coeficiente integral de transmisión de calor .....</i>	<i>38</i>
<i>1.3.10.Resistencia de Incrustaciones .....</i>	<i>39</i>
<i>1.3.11.Diferencia Media Logarítmica de Temperatura .....</i>	<i>40</i>
<i>1.3.12.Área Total de Transferencia de Calor .....</i>	<i>41</i>
<i>1.3.13.Resistencia del aislamiento .....</i>	<i>41</i>
<i>1.3.14.Eliminación de incrustaciones .....</i>	<i>42</i>
<i>1.3.15.Balance de Masa en la Cámara de Ebullición.....</i>	<i>43</i>
<i>1.3.16.Calor entregado por el combustible al sistema. ....</i>	<i>44</i>
<i>1.3.17.Balance de energía en la caldera.....</i>	<i>44</i>
<i>1.3.18.Rendimiento global de la caldera .....</i>	<i>45</i>
<i>1.3.19.Factor de Vaporización.....</i>	<i>45</i>

1.3.20. Vaporización Equivalente .....	46
1.3.21. Calidad o título del vapor .....	46
CAPITULO II .....	47
2.PARTE EXPERIMENTAL .....	47
2.1.Localización de la investigación .....	47
2.1.1.Plan de muestreo .....	47
2.1.2.Plan de tabulación y análisis .....	48
2.2.Metodología .....	48
2.2.1.Metodología de trabajo.....	48
2.2.2.Tratamientos de muestras .....	48
2.2.3.Equipos, materiales y reactivos .....	49
2.2.4.Métodos y técnicas.....	50
2.2.4.1.Métodos.....	50
2.2.4.2.Técnicas .....	50
2.2.4.2.1.Técnica documental .....	51
2.2.4.2.2.Técnica de campo.....	51
2.2.4.2.3.Determinación del Potencial de hidrógeno pH.....	52
2.2.4.2.4.Comparación del color .....	53
2.2.4.2.5.Determinación de la conductividad .....	54
2.2.4.2.6.Determinación de la turbiedad .....	55
2.2.4.2.7.Determinación de la concentración de cloruros.....	56
2.2.4.2.8.Determinación de la dureza .....	57
2.2.4.2.9.Determinación de calcio .....	58
2.2.4.2.10.Determinación de la alcalinidad.....	59
2.2.4.2.11.Determinación de sulfatos.....	60
2.2.4.2.12.Determinación del oxígeno disuelto.....	61
2.2.4.2.13.Determinación de Hierro .....	62
2.2.4.2.14.Determinación de fosfatos.....	63
2.2.4.2.15.Determinación de sólidos totales disueltos.....	64
2.3.Datos Experimentales.....	65
2.3.1.Diagnóstico .....	65
2.3.2.Datos Experimentales .....	66
CAPITULO III.....	68

3.CÁLCULOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR.....	68
3.1.Cálculos Para La Optimización Del Caldero .....	68
3.1.1.Cálculo del coeficiente total de transferencia de calor. ....	68
3.1.1.1.Cálculo de la densidad de la mezcla gaseosa .....	68
3.1.1.2.Cálculo de la viscosidad ( $\mu$ ) .....	68
3.1.1.3.Cálculo del calor específico de la mezcla .....	68
3.1.1.4.Cálculo del coeficiente de conductividad térmica .....	69
3.1.1.5.Cálculo del Reynolds.....	69
3.1.1.6.Cálculo del Prandtl.....	69
3.1.1.7.Cálculo de Nusselt .....	70
3.1.1.8.Cálculo del coeficiente de convección referido a la superficie interna .....	70
3.1.1.9.Cálculo del coeficiente de convección para el lado de agua .....	70
3.1.2.Efecto de la incrustación sobre el coeficiente de transferencia de calor total .....	73
3.1.2.1.Cálculo de las resistencias térmicas .....	73
3.1.2.2.Cálculo del área interna, para cada tubo .....	74
3.1.2.3.Cálculo del área externa, para cada tubo.....	74
3.1.2.4.Cálculo de las resistencias térmicas .....	74
3.1.2.5.Cálculo del coeficiente de transferencia de calor total .....	75
3.1.3.Cálculo de la media logarítmica de temperatura (LMTD) .....	76
3.1.4.Cálculo de la capacidad de producción de la caldera.....	76
3.1.4.1.Cálculo de la producción de vapor de caldera .....	77
3.1.5.Cálculo del calor perdido por los tubos de conducción de vapor.....	78
3.1.5.1.Calor radiado al ambiente .....	78
3.1.5.2.Calor transmitido por convección .....	78
3.1.6.Cálculo del costo de producción de kilocalorías .....	79
3.1.7.Cálculo del espesor óptimo del aislante .....	79
3.1.8.Cálculo del factor de vaporización. ....	82
3.1.8.1.Cálculo de la vaporización equivalente .....	82
3.1.9.Cálculo del poder calorífico del diesel .....	83
3.1.10.Relación aire/combustible.....	83
3.1.11.Cálculo para la adición de reactivos .....	84
3.1.11.1Método de los pesos atómicos.....	85
3.1.12.Cálculo para el porcentaje requerido de purga.....	87

3.1.13. Balance de masa .....	88
3.1.13.1. Balance de Másico de la reacción de combustión .....	88
3.1.13.2. Cálculo para el dióxido de carbono emitido.....	88
3.1.13.3. Cálculo para el agua producida .....	89
3.1.13.4. Cálculo para el SO <sub>2</sub> producido .....	89
3.1.13.6. Balance de Masa en la Cámara de Ebullición.....	90
3.1.13.7. Cálculo del flujo de alimentación .....	90
3.1.13.8. Cálculo del flujo de vapor generado.....	90
3.1.14. Balance de Energía.....	90
3.1.14.1. Cálculo del calor entregado por el combustible al sistema. ....	91
3.1.15. Cálculo del calor aportado al agua .....	91
3.1.15.1. Cálculo del calor sensible .....	91
3.1.15.2. Cálculo del calor latente .....	91
3.1.16. Cálculo de las pérdidas.....	92
3.1.16.1. Cálculo del flujo de calor (perdida en la carcasa) .....	92
3.1.17. Cálculo de la calidad del vapor generado .....	94
3.2. Resultados .....	95
3.3. Análisis y Discusión de Resultados .....	96
3.4. Propuesta.....	96
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	98
BIBLIOGRAFIA .....	100
ANEXOS .....	102

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1:	DIAGRAMA DE ELABORACIÓN DE QUESO .....	6
FIGURA 2-1:	DIAGRAMA DE LAYOUT DEL FLUJO DE VAPOR DE UNA CALDERA .....	29
FIGURA 3-3:	DIAGRAMA DE LAYOUT PARA EL CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE PURGA.....	87
FIGURA 4-3:	DIAGRAMA REPRESENTATIVO DE LA CALDERA PARA EL BALANCE DE MASA .....	88
FIGURA 5-3:	REPRESENTACIÓN DE LA TIPOLOGÍA DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR.....	90

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1-1:	ESPEORES RECOMENDADOS DEL AISLAMIENTO PARA SUPERFICIES CALIENTES PLANAS EN FUNCIÓN DE TEMPERATURA SUPERFICIAL .....	17
TABLA 2-1:	ESPEORES RECOMENDADOS DEL AISLAMIENTO PARA TUBOS EN FUNCIÓN DE LAS TEMPERATURAS DE SERVICIO.....	17
TABLA 3-1:	CARACTERÍSTICAS RECOMENDADAS PARA AGUA DE ALIMENTACIÓN .....	18
TABLA 4-1	CARACTERÍSTICAS RECOMENDADAS PARA INTERIOR DE LA CALDERA.....	18
TABLA 5-1:	PROPIEDADES DEL DIESEL .....	33
TABLA 6-2:	EQUIPOS, MATERIALES Y REACTIVOS.....	49
TABLA 7-2:	DESCRIPCION DEL METODO DE ANALISIS PARA EL CALDERO .....	50
TABLA 8-2:	DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO PH.....	52
TABLA 9-2:	MÉTODO HACH; COMPARACIÓN DEL COLOR.....	53
TABLA 10-2:	STANDARD METHODS 2510-B: DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD .....	54
TABLA 11-2:	MÉTODO HACH 46500-88: DETERMINACIÓN DE LA TURBIEDAD .....	55
TABLA 12-2:	STANDARD METHODS 4500-CL <sup>-</sup> C: DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORUROS .....	56
TABLA 13-2:	STANDARD METHODS 2340-C: DETERMINACIÓN DE LA DUREZA .....	57
TABLA 14-2:	STANDARD METHODS 3500-CA –D: DETERMINACIÓN DE CALCIO .....	58
TABLA 15-2:	STANDARD METHODS 4500HB: DETERMINACIÓN DE LA ALCALINIDAD .....	59
Tabla 16-2:	DETERMINACIÓN DE SULFATOS: METODO ASTM D-1339 C .....	60
TABLA 17-2:	MODIFICACION DEL PERMANGANATO 4500 O.D.: DETERMINACION DEL OXIGENO DISUELTO.....	61
TABLA 18-2:	STANDARD METHODS 3500-FE –D: DETERMINACIÓN DE HIERRO .....	62
TABLA 19-2:	DETERMINACIÓN DE FOSFATOS: METODO DEL MOLIBDATO DE AMONIO.....	63
TABLA 20-2:	STANDARD METHODS 2540-B: DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS.....	64
TABLA 21-2:	DATOS OPERATIVOS DEL CALDERO .....	66
TABLA 22-2:	CARACTERIZACIÓN FÍSICO- QUÍMICA DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN AL CALDERO.....	66
TABLA 23-2:	CARACTERIZACIÓN FÍSICO- QUÍMICA DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN AL CALDERO.....	67
TABLA 24-2:	CARACTERIZACIÓN FÍSICO- QUÍMICA DEL AGUA DE PURGA DEL CALDERO .....	67

TABLA 25-3: PROPIEDADES DEL DIESEL .....	83
TABLA 26-3: RESULTADOS ANALÍTICOS DE GASES DE COMBUSTIÓN .....	95
TABLA 27-3: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL CALDERO .....	95

## INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1:	PROPIEDADES DE LOS GASES .....	102
ANEXO 2:	CAPACIDAD DE LAS CALDERAS .....	103
ANEXO 3:	PROPIEDADES DEL VAPOR DE AGUA SATURADO.....	104
ANEXO 4:	FACTORES DE OBSTRUCCIÓN.....	105
ANEXO 5:	PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA .....	106
ANEXO 6:	PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES.....	107
ANEXO 7:	INFORME DE ANALISIS DE GASES DE COMBUSTIÓN.....	108
ANEXO 8:	INFORME ANALISIS FISICO-QUIMICO DE AGUA DE PURGA .....	109
ANEXO 9:	ANALISIS FISICO-QUIMICO AGUA DE ALIMENTACION.....	110
ANEXO 10:	ANALISIS FISICO-QUIMICO AGUA DE ALIMENTACION.....	111
ANEXO 11:	PROPIEDADES DEL VAPOR A DIFERENTES PRESIONES .....	112
ANEXO 12:	DIMENSIONES DEL CALDERO .....	113
ANEXO 13:	PLANO DE QUESERA.....	114
ANEXO 14:	PARTES DEL CALDERO .....	115
ANEXO 15:	ENSAMBLAJE QUESERA .....	116
ANEXO 16:	TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA .....	117
ANEXO 17:	PASTEURIZADOR.....	118
ANEXO 18:	ENSAMBLE DEL CALDERO .....	119
ANEXO 19:	CALDERO.....	120

## RESUMEN

Se realizó la optimización del sistema de generación de vapor para la quesera “El Nevadito”, ubicada en la parroquia San Juan, provincia de Chimborazo, con el objetivo de evitar pérdidas energéticas, alargar la vida útil del equipo, mejorar el proceso y condiciones de producción cumpliendo con la normativa establecida.

Se inició con un diagnóstico del equipo, determinación de variables del proceso, recolección de muestras para caracterización físico-química del agua, aplicando los Standard Methods 2550 combinados con ensayos de laboratorio en la Facultad de Ciencias, de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Se obtuvieron datos de presión 30 PSI, temperatura agua de alimentación 19 C, vapor producido 121,13 C, coeficiente de transferencia calorífica total 5,84 kcal/m<sup>2</sup>.h.C, rendimiento de caldera de 67 %, dureza por concentración de calcio 22,4 mg/L y magnesio 7,8 mg/L, pérdidas por el aislamiento de carcasa 7926,53 kcal/h, e Índice de Langelier de -1,8 que indica corrosividad para los materiales. Se determinó adicionar 4,44 g de cal al agua de alimentación, 2 kg de carbonato sódico para tratar incrustaciones de sulfato cálcico.

Los estudios y análisis realizados obtuvieron las siguientes mejoras: reducción de 36,4 % en dureza, aumento del 20 % en el coeficiente total de transferencia de calor.

Se concluye en base a cálculos los siguientes cambios en la planta: implementar un pretratamiento y tratamiento interno al agua de caldera, incrementar el nivel de purga a 2,53 kg de vapor/h.

Se recomienda adicionar aislamiento en las tuberías de conducción de vapor, reemplazar el aislamiento de la carcasa y ejecutar la propuesta realizada en el presente trabajo para reducir pérdidas de energía, y deterioro anticipado del equipo.

## SUMMARY

Optimization of steam generation system for the milky farm "El Nevadito" it is located in San Juan parish Chimborazo province, in order to avoid loss of energy, extend equipment life, improve the process and production conditions taking into account established standards.

It was started with an equipment diagnosis, determination of process variables, collecting of samples for physics-chemical characterization of water by applying the "Standard Methods 2550" these combined with laboratory tests at the Faculty of Sciences of the Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Pressure data 30 PSI were obtained, feeding water temperature 19 C, steam produced 121,13 C, total heat transfer coefficient 5.84 kcal / m<sup>2</sup>.hC, boiler efficiency 67%, hardness for calcium concentration 22,4 mg / L and magnesium 7,8 mg / L, loss for carcass isolation 7926,53 kcal / h, and Langelier index of -1.8 indicating corrosivity for the materials.

It was determined to add 4,44 g of lime to the feeding water, 2 kg of sodium carbonate to treat incrustations of calcium sulphate.

Studies and analyzes obtained the following improvements: 36,4% reduction in hardness, up 20% on the total heat transfer coefficient.

It is concluded that according to the calculation done, the following changes should be implemented in the plant a pretreatment and internal treatment to the boiler water, and to increase the purge level to 2,53 kg of steam / h.

It is recommended to add insulation in the pipes conducting steam, to replace the carcass isolation and to carry out the proposal of this research work in order to reduce loss of energy and soon equipment deterioration.

## **INTRODUCCIÓN**

La Industria ecuatoriana ha experimentado un notable crecimiento en los últimos tiempos, que conlleva a una creciente demanda de energía, y teniendo en cuenta que en los procesos productivos se busca utilizar medios de producción y transferencia de energía de relativa facilidad y economía en su producción, el vapor adquiere gran importancia como un medio básico de transmisión de energía en procesos industriales, las calderas se emplean principalmente para proporcionar energía en forma de vapor.

La Optimización del sistema de generación de vapor, intenta poner en marcha un proceso de reformas a fin de resolver problemas de dureza del agua de alimentación, y pérdidas energéticas, así como deterioro del equipo, para contribuir a agilizar el proceso de mejoramiento de la quesera a través del ahorro y uso eficiente de la energía.

La temperatura y presión de vapor fueron variables útiles para la generación de datos experimentales que sirvieron para el cálculo del coeficiente total de transferencia de calor, el cual, relacionado con el factor de incrustación, permitió determinar el rendimiento del equipo en 67%.

De acuerdo a los cálculos de Ingeniería, se determinó para optimizar el sistema de generación de vapor se debe implementar pretratamiento y tratamiento interno al agua de caldera, incrementar el nivel de purga a 2,53 kg de vapor/h, así como reemplazar el aislante de carcasa y adicionar aislante en los tubos de conducción de vapor.

## ANTECEDENTES

Definida como el corazón de la industria, la caldera cuenta con una historia generosa en materia de avances técnicos a través de los años. La caldera de vapor, nacida en Inglaterra, era utilizada hasta el siglo XIX para teñir ropa y producir vapor para limpieza, pero fue desarrollada por James Watt en 1776; y se utilizaron para accionar bombas de agua.<sup>1</sup>

En la actualidad la evolución de la caldera ha llevado a una amplia utilización a nivel industrial, teniendo a la caldera como parte central en diferentes procesos productivos, de pequeña, mediana o gran escala, centrandose en los procesos de pequeña y mediana escala, que son procesos que han tenido un repunte en el Ecuador, el desarrollo de este proyecto, puesto que se encuentran limitados por un uso poco óptimo de sus recursos energéticos.

*La quesera “El Nevadito”*, ubicada en la provincia de Chimborazo, parroquia San Juan, cuenta con una planta de producción moderna cuyo inicio se en el año 1988, gracias al aporte de Visión Mundial(ONG), para la fabricación de productos lácteos, específicamente el queso.

Debido a que los recursos energéticos utilizados en la Quesera “El Nevadito” y en toda empresa, están estrechamente ligados con la producción se pretende reducir estos costos a través de la optimización del sistema de producción de vapor. Esta optimización dará la pauta para que las mejoras energéticas a proponerse si son acogidas y puestas en práctica, ayuden a reducir las pérdidas de energía, y por consiguiente también aportaran a la reducción del consumo de combustibles fósiles.

---

<sup>1</sup>HISTORIA DE LA CALDERA. Construsur.Argentina.2013. <http://www.sistemascalefaccion.com/calderas/vapor.html>.2013-03-11.

## JUSTIFICACION

El vapor generado por las calderas, se utiliza en casi todas las industrias, las calderas, como generadores de vapor, están utilizándose en cometidos tales como, generación de electricidad, procesos químicos, calefacción, limpieza sanitaria, y en los últimos tiempos más ampliamente para pasteurización.

La región andina del Ecuador por sus condiciones meteorológicas es propicia para ganado vacuno de leche; en promedio desde 1988 hasta 2005 en esta región se ha producido el 73% de la producción nacional, siendo la superficie con pastos el 19,3 % de la total nacional. El 56% son medianos productores y un 14% son pequeños productores, representando el 70% de productores del grupo, meta de esta propuesta.<sup>2</sup>

Se vio la necesidad de realizar la optimización del sistema de generación de vapor, porque si bien es cierto “El Nevadito” cuenta con una planta moderna, se observó que tienen lugar pérdidas de energía utilizable, que al ser corregidas, ayudarán a que se ajusten a las tendencias actuales de producción más limpia y a su vez obtener un índice mayor de rentabilidad económica para dicha empresa.

---

<sup>2</sup> ANÁLISIS REGIONAL DE PRODUCCIÓN DE LÁCTEOS Y DERIVADOS. Consejo Consultivo de la leche. MINISTERIO DE AGRICULTURA GANADERÍA ACUACULTURA Y PESCA DEL ECUADOR. 2012. <http://www.pavasquez@mag.gov.ecMAG/> Consejo Consultivo de Leche y derivados. 2013-03-20.

## **OBJETIVOS**

### **GENERAL**

Optimizar el sistema de generación de vapor para la producción de quesos en la Quesera “El Nevadito”. Parroquia: San Juan-Chimborazo.

### **ESPECÍFICOS**

- Determinar las variables del proceso de producción de vapor.
- Analizar el agua de alimentación del caldero, considerando también el índice de Langelier
- Proponer medidas anticorrosivas para el sistema.
- Desarrollar los cálculos necesarios para determinar la eficiencia del caldero.
- Generar una propuesta para la optimización del proceso de producción de vapor

# CAPÍTULO I

## 1. MARCO TEORICO

### 1.1 Leche

La leche es la base de numerosos productos lácteos, como la mantequilla, el queso, el yogurt, entre otros. Es muy frecuente el empleo de los derivados de la leche en las industrias agroalimentarias, químicas y farmacéuticas en productos como la leche condensada, leche en polvo, caseína o lactosa.

#### *1.1.1. Pasteurización*

La pasteurización, a veces denominada pasterización, es el proceso térmico realizado a líquidos (generalmente alimentos) con el objeto de reducir los agentes patógenos que puedan contener: bacterias, protozoos, mohos y levaduras, etc.

Existen tres tipos de procesos bien diferenciados:

##### *1.1.1.1. Proceso VAT (o lenta)*

El proceso consiste en calentar grandes volúmenes de leche en un recipiente estanco a 63 °C durante 30 minutos, para luego dejar enfriar lentamente.

##### *1.1.1.2. Proceso HTST (High Temperature/Short Time).*

Este método es el empleado en la quesera “El Nevadito” y en la mayoría de los líquidos a granel, como la leche, los zumos de fruta, la cerveza, etc. Por regla general, es el más conveniente, ya que expone al alimento a altas temperaturas durante un período breve y además se necesita poco equipamiento industrial para poder realizarlo, reduciendo de esta manera los costes de adquisición y mantenimiento de equipos.

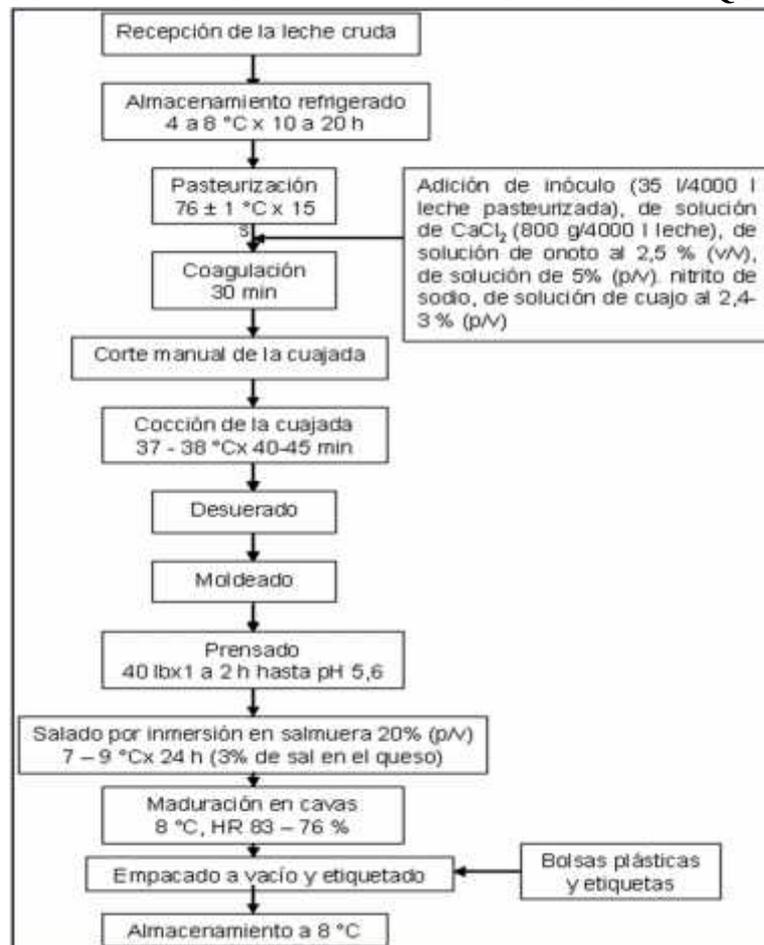
Existen dos métodos distintos bajo la categoría de pasteurización HTST: en "batch" (o lotes) y en "flujo continuo". Para ambos métodos la temperatura es la misma (72 °C durante 15 segundos).

a) En el proceso "batch" una gran cantidad de leche se calienta en un recipiente estanco (autoclave industrial), y luego se lo enfría. Es un método muy empleado hoy en día, sobre todo por los pequeños productores debido a que es un proceso más sencillo.

b) En el proceso de "flujo continuo", el alimento se mantiene entre dos placas de metal, también denominadas intercambiador de calor de placas (PHE) o bien un intercambiador de calor de forma tubular. Este es el más aplicado por la industria alimenticia a gran escala.

### 1.1.2. Elaboración del queso

**FIGURA 1-1. DIAGRAMA DE ELABORACIÓN DE QUESO**



Fuente: PRODUCCIÓN LÁCTEOS., <http://www.psicofxp.com/forums/gastronomia.172/884-como-preparar-queso.html>.<sup>3</sup>

<sup>3</sup> PRODUCCIÓN DE LÁCTEOS., <http://www.psicofxp.com/forums/gastronomia.172/884-como-preparar-queso.html>

## **1.2. Generación de vapor**

La generación industrial de vapor es el proceso mediante el cual se produce vapor a presiones por encima de la atmosférica, a partir de la energía que produce quemar un combustible, o de energía eléctrica.

El vapor de agua constituye el fluido energético ideal para la industria, que necesita la utilización de calor a diversos niveles de temperatura, generalmente entre los 90°C y 260°C. El alto calor latente y pequeña densidad, hacen que el vapor de agua sea especialmente efectivo.

### ***1.2.1. Propiedades del vapor y sistemas de caldera***

Una breve revisión de algunas propiedades del vapor ayudarán también a diferenciar los distintos sistemas de calderas.

- Líquido saturado significa agua líquida a la temperatura de saturación o ebullición.
- Vapor saturado significa vapor a la temperatura de ebullición.

Cuando el agua está hirviendo, en un recipiente cerrado, el agua y el vapor que esta sobre ella, tienen la misma temperatura. Esta se conoce como temperatura de saturación. Aunque la temperatura permanece constante, se debe agregar calor para transformar el líquido en vapor. Esta cantidad de calor se conoce como calor latente de vaporización.

Si este vapor producido no contiene agua a la temperatura de ebullición, se dice que es vapor seco y saturado. Cuando el vapor contiene líquido se llama húmedo. Si el vapor se calienta sobre la temperatura de ebullición, se dice que es vapor recalentado (sobrecalentado).

*Entalpía.*- significa el contenido calorífico del fluido. En relación con el agua y el vapor, hay que tener en cuenta tres entalpías:

- La entalpía del líquido saturado (en BTU/libra o kcal/kg) es el contenido calorífico del agua a una presión y temperatura determinadas.
- La entalpía de evaporación (BTU/libra o kcal/kg) es el calor requerido para evaporar 1 libra de agua (1 kg) pasando a vapor a esa presión y temperatura.
- La entalpía del vapor saturado (BTU/libra o kcal/kg) es el contenido calorífico del vapor saturado a la presión y la temperatura que están siendo consideradas.

La entalpía del vapor saturado es, por tanto, la suma de la entalpía del líquido saturado y la de evaporación, o contenido total calorífico del vapor saturado en BTU/libra o kcal/kg”.<sup>4</sup>

### ***1.2.2. Calderas***

Las calderas son dispositivos a presión cerrados, utilizados para calentar un fluido, generalmente agua, para uso externo del mismo, por aplicación directa del calor resultante de la combustión de un combustible (sólido, líquido o gaseoso) o por utilización de energía eléctrica o nuclear.<sup>5</sup>

#### ***1.2.2.1. Cuerpo***

Este componente puede ser cilíndrico en calderas pirotubulares. Las calderas de tubos de humo o pirotubulares, que son las más comunes de encontrar, tienen un cuerpo cilíndrico hecho de chapa de acero, herméticamente cerrado con el objeto de almacenar agua y vapor y se complementa con espejos, fluxes, envolventes y mamparas.

#### ***1.2.2.2. Hogar***

Es el espacio donde se produce la combustión. Se le conoce también como Cámara de Combustión.

#### ***1.2.2.3. Quemador***

El quemador es uno de los principales componentes para el proceso de combustión en la caldera. En los generadores de vapor, el quemador hace ingresar combustible y aire al hogar de una manera que asegure una combustión segura y eficiente mientras la caldera se encuentra en plena capacidad.

#### ***1.2.2.4. Cámara de agua.***

Es el volumen de la caldera que está ocupado por el agua y tiene como límite un cierto nivel mínimo del que no debe descender, ni sobrepasar nunca el agua durante su funcionamiento. Este es el comprendido del nivel mínimo visible en el tubo de nivel hacia abajo.

---

<sup>4</sup> KOHAN, A. Manual de Calderas., 4a ed. México, Mc Graw Hill, 2000. p. pp. 47-119.

<sup>5</sup> GENERACIÓN DE VAPOR., <http://www.empresaeiciente.com/es/catalogo-de-tecnologias/generacion-de-vapor>

#### *1.2.2.5. Cámara de vapor.*

Es el espacio o volumen que queda sobre el nivel superior máximo de agua y en el cual se almacena el vapor generado por la caldera.

Mientras más variable sea el consumo de vapor, tanto mayor debe ser el volumen de esta cámara.

En este espacio o cámara, el vapor debe separarse de las partículas de agua que lleva en suspensión. Por esta razón, algunas calderas tienen un pequeño cilindro en la parte superior de esta cámara, llamado “domo” y que contribuye a mejorar la calidad del vapor.

#### *1.2.2.6. Tubos de humo*

Son los tubos de una caldera por los cuales circulan los gases calientes en su interior y por el exterior los rodean agua, permiten la transferencia de calor, se fijan en los cabezales mediante diversos procesos mecánicos, por expansión, empleando el rolado o la expansión a presión, pudiendo también soldarse.

#### *1.2.2.7. Espejos o mamparas*

Este componente de la caldera está encargado de controlar el flujo de gases a través de esta, con el objetivo de dirigir el paso de los gases por los sitios más adecuados, a fin de que el proceso de transferencia de calor entre el agua y los gases sea lo más eficiente posible.

#### *1.2.2.8. Chimenea*

Es el conducto de salida de los gases y humos de la combustión hacia la atmósfera, los cuales deben ser evacuados a una altura suficiente para evitar perjuicios o molestias a la comunidad. Además, tiene como función producir el tiro necesario para obtener una adecuada combustión, esto es, hacer pasar el aire necesario y suficiente para quemar el combustible.

#### *1.2.2.9. Puertas de Explosión*

Son puertas metálicas con contrapeso o resortes, ubicadas generalmente en la caja de humos y que se abren en caso de exceso de presión en la cámara de combustión, permitiendo la salida de los gases y eliminando la presión. Solo son utilizables en calderas que trabajen con combustibles líquidos o gaseosos.

### ***1.2.3. Accesorios***

Los accesorios que constan en la caldera son todos los elementos útiles y necesarios para permitir y/o controlar el buen funcionamiento del equipo generador de vapor.

Cada accesorio tiene una función específica cuando el equipo está en servicio. Y se pueden clasificar de la siguiente forma:

➤ Accesorios de Observación

- a) Indicadores de nivel de agua
- b) Indicadores de presión
- c) Analizadores de gases
- d) Indicadores de temperatura

➤ Accesorios de Seguridad

- a) Válvulas de seguridad
- b) Tapón fusible
- c) Alarmas

➤ Accesorios de Alimentación de agua

- a) Bombas
- b) Inyectores

➤ Accesorios de Limpieza

- a) Puertas de inspección
- b) Llaves de purga

➤ Accesorios de aumento de Eficiencia

- a) Economizador
- b) Calentador de aire
- c) Retardador

➤ Accesorios de Control Automático

- a) Presostatos
- b) Termostatos
- c) Control de nivel de agua
- d) Control de la llama

e) Control del encendido (chispa).<sup>6</sup>

#### ***1.2.4. Tipos de calderas***

##### *1.2.4.1. Calderas de tubos de humos o pirotubulares*

Son aquellas en que los productos provenientes de la combustión pasan a través del interior de los tubos con el agua rodeándolos por el exterior.

La caldera de vapor pirotubular, es la caldera que más prevalece y se utiliza para aplicaciones de calentamiento de procesos y aplicaciones industriales y comerciales.

##### *1.2.4.1.1. Clasificación de las calderas pirotubulares*

- A. Calderas tubulares de retorno horizontal
- B. Caldera económica
- C. Caldera- hogar de locomotora
- D. Calderas marina escocesa (SM)
- E. Caldera tubular vertical

##### *1.2.4.1.2. Calderas de tubos de agua*

La principal diferencia con la caldera de tubos de humos es que en estas calderas el agua circula por dentro de los tubos en vez de alrededor de ellos (calderas de tubos de humos).

- *Clasificación de calderas de tubos de agua*

- a) Calderas de cabezales sinuosos y de caja, tipo de tubos rectos.
- b) Calderas de tubos de agua verticales, tipo tubos rectos.
- c) Calderas stirling (tubos de agua curvados)
- d) Calderas de combustión mixta
- e) Calderas de centrales térmicas.
- f) Calderas de tubos de agua de serpentines (o baterías).<sup>7</sup>

---

<sup>6</sup> PARTES DE LA CALDERA., <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=2953>

### 1.2.5. *Transferencia térmica y funcionamiento*

En una caldera el flujo térmico puede aceptar la eficiencia de la operación y también puede producir recalentamiento, como cuando se deja o permite que se acumulen capas de incrustación en los tubos. El flujo de calor puede tener lugar por conducción, convección o radiación y normalmente tiene lugar de los tres modos en el interior de la caldera.

#### 1.2.5.1. *Conducción*

Es la transferencia de calor de una parte del material a otra o a un material con el que está en contacto.

En las calderas tiene lugar una considerable conductividad superficial entre un fluido y un sólido, por ejemplo entre el agua y un tubo, o entre el gas y un tubo, además de la conductividad a través del metal de un tubo, y la chapa u hogar.

- **La conductancia o conductividad superficial**

Cuando se expresa en BTU (o Kcal) por pie<sup>2</sup> (m<sup>2</sup>) de superficie calefactora para una diferencia de 1°C (o 1°F) de temperatura del fluido y de la superficie adyacente, se conoce como coeficiente superficial o coeficiente pelicular.

- **El coeficiente de conductividad térmica**

Se define como la cantidad de calor que fluirá a través de esta área unitaria en la unidad de tiempo si el gradiente de temperatura través de esta área es la unidad. En física, las unidades se expresan como Kcal por hora y metro cuadrado y grado centígrado por metro.<sup>8</sup>

La intensidad de paso de calor por conducción es proporcional al área de la sección normal al flujo de calor A, al gradiente de temperaturas  $-dt/dx$ , y a un factor de proporcionalidad denominado coeficiente de conductividad térmica o calorífica k, característico de cada sustancia y que varía con la temperatura y el estado de agregación. La expresión matemática para la intensidad de paso de calor es:

$$\frac{dqk}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad \text{Ec. 1}$$

---

<sup>7</sup> CASTILLO, P. Operación y Combustión de Hornos y Calderos. Ecuador Asopetrol, 2006. p. pp. 10–14.

<sup>8</sup> OCON, J. TOJO, G. Operaciones Básicas. Tomo I. 2a ed. Madrid Aguilar, 1992. pp. 68-72.

Para escribir la ecuación de transferencia de calor en forma matemática se debe adoptar una convención de signos. Se especifica que la dirección en que se incrementa la distancia  $x$ , es la dirección de flujo positivo. Entonces, puesto que de acuerdo con la segunda ley de la Termodinámica, el calor fluirá automáticamente desde los puntos de más alta temperatura a los puntos de más baja temperatura, el flujo de calor será positivo cuando el gradiente sea negativo.

En el caso de que la temperatura de cualquier punto del sistema no varíe con el tiempo, el mecanismo de conducción del calor se denomina conducción del calor en estado estacionario siendo este el caso más frecuente con el que nos encontramos en la práctica. En estas condiciones tampoco varía con el tiempo el gradiente de temperaturas, y, en consecuencia la intensidad de paso de calor es constante. Para este caso la forma diferencial general de la intensidad de paso de calor (Ec. 1) se puede expresar en forma integrada mediante la ecuación:

$$q_k = kA(dT/dx) \quad Ec.2$$

Dónde:

$q_k$  = rapidez de transmisión de calor por conducción. (kcal/h)

$A$  = área de transferencia de calor. (m<sup>2</sup>)

$T$  = diferencia de temperaturas. (C)

$k$  = coeficiente de transmisión térmica del material. (kcal/h.m.C)<sup>9</sup>

#### 1.2.5.2. La convección

Es la transferencia de calor hacia o desde un fluido (líquido o gas) fluyendo hacia la superficie de un cuerpo. Con mayor precisión, se define como libre o forzada.

- La convección libre es la que produce la circulación del fluido de transferencia debido a una diferencia de densidad resultante de los cambios de temperatura.

---

<sup>9</sup> OCON, J. TOJO, G. Operaciones Básicas. Tomo I. 2a ed. Madrid Aguilar, 1992. pp. 73-78.

- La convección forzada tiene lugar cuando la circulación del fluido es positiva por algún medio mecánico significativo como una bomba de agua o un ventilador para los gases.

La rapidez de calor transferido por convección entre una superficie y un fluido se resuelve por la aplicación del coeficiente superficial de transmisión de calor o coeficiente de convección  $h_c$  y puede calcularse por la relación.

$$q_c = h_c \cdot A \cdot T \quad \text{Ec.3}$$

Dónde:

$q_c$  = rapidez de transmisión calor por convección. (Kcal/h)

$A$  = área de transferencia de calor. ( $m^2$ )

$T$  = diferencia entre la temperatura de la superficie  $t_m$  y la temperatura del fluido  $t$ . (C).

$h_c$  = coeficiente de convección. (kcal/h. $m^2$ .C)

El coeficiente de convección depende de las propiedades físicas del fluido, y de las características del movimiento natural o forzado, de este con respecto a la superficie.

### 1.2.5.3. Radiación

Es una forma continua de intercambio de energía por medio de ondas electromagnéticas sin cambio en la temperatura del medio interpuesto entre los dos cuerpos. La cantidad de energía que abandona una superficie en forma de calor radiante, depende de la temperatura absoluta y de la naturaleza de la superficie.

Un radiador perfecto o cuerpo negro, emite energía radiante desde su superficie a una rapidez de  $q_r$  dada por:

$$q_r = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad \text{Ec. 4}$$

Dónde:

$A$  = Área de transferencia de la superficie. ( $m^2$ ).

$T$  = temperatura de la superficie. (K)

$\sigma$  = constante de Stefan – Boltzmann. (kcal/ $m^2$ .h.K<sup>4</sup>)

Es una constante dimensional con un valor de  $4.92 \cdot 10^{-8} \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4$ .

La radiación está presente en todas las calderas. De hecho, todas las calderas utilizan los tres modos de transferencia térmica: Conducción, convección y radiación.

Puesto que la caldera es en sí un intercambiador de calor, se analizara la transferencia de calor conjunta, desde el punto de vista de un intercambiador de calor.<sup>10</sup>

La intensidad de paso de calor a través de un elemento diferencial de superficie de cambiador puede expresarse por:

$$dq = U \, dA \, t \quad \text{Ec. 5}$$

#### *1.2.5.4. Coeficiente integral de transmisión de calor*

En la ecuación 5, U es el coeficiente integral de transmisión de calor y se relaciona con la resistencia calorífica total por la ecuación:

$$U \cdot A = \frac{1}{\Sigma R} \quad \text{Ec. 6}$$

Si se trata de una pared plana, **A** esta medida sobre la superficie normal al paso de calor. Si se trata de paredes no planas, **A** ha de medirse sobre una de las superficies normales al paso de calor, y **U** quedará referida a esa superficie.<sup>11</sup>

#### *1.2.6. Capacidad de producción de vapor en las calderas*

La capacidad o potencia de caldera puede expresarse en HP (caballos), kg/hora(o lb/h), kilocalorías/hora, pero como quiera que sea el vapor a distintas presiones y temperaturas posee diferentes cantidades de energía que el sistema no mide exactamente la energía producida. El proceso de transmisión de calor que tiene ocasión en un generador de vapor es un proceso de flujo constante, en el cual el calor transmitido es igual a la variación de la entalpía del fluido.

---

<sup>10</sup> OCON, J. TOJO, G. Operaciones Básicas. Tomo I. 2a ed. Madrid Aguilar, 1992. pp. 78-84.

<sup>11</sup> OCON, J. TOJO, G. Operaciones Básicas. Tomo I. 2a ed. Madrid Aguilar, 1992. pp. 86-92.

### 1.2.6.1. HP ( Horse Power de caldera)

Está definido como la evaporación en términos de vapor saturado seco de 15.65hg/h de agua (34.5 lb/hora) a temperatura de 100 C (212 F) así pues, un HP de caldera, por este método, es equivalente a una capacidad de 8435.7 kcal/h de vapor y se toma normalmente una superficie de calefacción de caldera de 0.92 m<sup>2</sup>. Pero 0.92m<sup>2</sup> de superficie calefactora en una caldera moderna genera en cualquier caso de 22.7 kg/h a 227kg/h. Por lo que se puede aplicar la formula siguiente para la capacidad de producción:

$$\text{Producción de vapor} = 15.65 \text{ kg/h} * \text{HP de caldera (BHP)}. \quad \text{Ec. 7}$$

$$\text{Capacidad de transmitir calor} = 8435.7 \text{ kcal/h} * \text{HP de caldera (BHP)}.^{12} \quad \text{Ec. 8}$$

### 1.2.7. Aislamiento Térmico

Los aislamientos térmicos son materiales o combinaciones de materiales que se usan para suministrar resistencia al flujo de calor. La mayor parte de estos son materiales heterogéneos, los cuales tienen baja conductividad térmica y contienen bolsas de aire, ya que el aire tiene una de las conductividades térmicas más bajas y se dispone de él con facilidad. La espuma de estireno de uso común como material de empaque para algunos aparatos eléctricos, debido a su bajo peso, también es un aislador excelente.

#### • Razones para aislar

El uso del aislamiento no es solo para la conservación de energía, también se utiliza para protección y comodidades personales.

- a) Conservación de la energía.
- b) Protección y comodidades personales
- c) Mantenimiento de la temperatura del proceso
- d) Reducción de la variación y las fluctuaciones de temperatura
- e) Prevención de la condensación y de la corrosión
- f) Protección contra incendios
- g) Protección contra la congelación
- h) Reducción del ruido y la vibración.

---

<sup>12</sup> KOHAN, A. Manual de Calderas. 4a ed. México, Mc Graw Hill, 2000. pp. 410-414.

- **Espesor del Aislamiento Óptimo**

Hay que tener en cuenta que el aislamiento no elimina la transferencia de calor, solo la reduce. Por lo tanto debe haber un espesor óptimo del aislamiento que corresponda a un costo mínimo combinado del propio aislamiento y la pérdida de calor. Pero se puede hacer una selección mediante las tablas y los diagramas elaborados por el TIMA (Thermal Insulation Manufacturers Association) y las compañías miembros.

**TABLA 1-1: ESPESORES RECOMENDADOS DEL AISLAMIENTO PARA SUPERFICIES CALIENTES PLANAS EN FUNCIÓN DE TEMPERATURA SUPERFICIAL**

Temperatura Superficial	Espesor del aislamiento
150 °F (66 °C)	2" (5.1 cm)
250 °F (121 °C)	3" (7.6 cm)
350 °F (177 °C)	4" (10.2 cm)
550 °F (288 °C)	6" (15.2 cm)
750 °F (400 °C)	9" (22.9 cm)
950 °F (510 °C)	10" (25.44 cm)

Fuente: Cengel, A. Transferencia de Calor, Segunda Edición.

**TABLA 2-1: ESPESORES RECOMENDADOS DEL AISLAMIENTO PARA TUBOS EN FUNCIÓN DE LAS TEMPERATURAS DE SERVICIO**

Temperatura de servicio	Espesor del aislamiento
150 °F (66 °C)	0.5 – 1" (1.27 – 2.54 cm)
250 °F (121 °C)	1 – 2" (2.54 – 5.08 cm)
350 °F (177 °C)	1.5 – 3" (3.81 – 7.62 cm)
450 °F (232 °C)	2 – 4.5" (5.08 – 11.43 cm)
550 °F (288 °C)	2.5 – 5.5" (6.35 – 13.97)
650 °F (343 °C)	3 – 6" (7.62 – 15.24 cm)

Fuente: Cengel, A. Transferencia de Calor, Segunda Edición.

**Nota:** Para diámetros nominales de 0.5 a 36" (1.27 a 91 cm). Los espesores menores recomendados del aislamiento son para tubos con diámetros pequeños y los más grandes son para tubos con diámetros grandes.<sup>13</sup>

### 1.2.8. Agua de alimentación para caldera

La calidad del agua de alimentación a la caldera repercute directamente sobre el buen funcionamiento de la misma así como sobre la vida de muchos de los elementos que forman el equipo generador de vapor.

<sup>13</sup> CENGEL, A. Transferencia de calor y masa un enfoque práctico. Tomo I. 2ª ed. Mexico, Mc Graw-Hill, 2007 p. pp. 397-405.

- **Requerimientos para el agua de alimentación y agua de caldera**

Sobre la base de las recomendaciones de la Norma Británica BS – 2486, la ABMA (American Boiler Manufacturing Association), se han preparado las siguientes tablas que muestran los requerimientos que deberá satisfacer el agua de alimentación y el agua de una caldera para prevenir incrustaciones y corrosión en calderas de baja presión hasta 147 PSI (10 bar).

**TABLA 3-1: CARACTERÍSTICAS RECOMENDADAS PARA AGUA DE ALIMENTACIÓN**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR REQUERIDO</b>
Dureza total	< 2 ppm
Contenido de oxígeno	< 8 ppb
Dióxido de carbono	< 25 mg/l
Contenido total de hierro	< 0,05 mg/l
Contenido total de cobre	< 0,01 mg/l
Alcalinidad total	< 25 ppm
Contenido de aceite	< 1 mg/l
pH a 25 °C	8.5 – 9.5
Condición general	Incoloro, claro y libre de agentes insolubles.

*Fuente:* [www.calderasvapor.com/agua\\_caldera](http://www.calderasvapor.com/agua_caldera)

**TABLA 4-1 CARACTERÍSTICAS RECOMENDADAS PARA INTERIOR DE LA CALDERA**

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

*Fuente:* [www.calderasvapor.com/agua\\_calderas](http://www.calderasvapor.com/agua_calderas).

Las aguas pueden considerarse según la composición de sales minerales presentes en:

#### **a) Aguas Duras**

Importante presencia de compuestos de calcio y magnesio, poco solubles, principales responsables de la formación de depósitos e incrustaciones.

#### **b) Aguas Blandas**

Su composición principal está dada por sales minerales de gran solubilidad.

#### **c) Aguas Neutras**

Componen su formación una alta concentración de sulfatos y cloruros que no aportan al agua tendencias ácidas o alcalinas, o sea que no alteran sensiblemente el valor de pH.

#### **d) Aguas Alcalinas**

Las forman las aguas que tienen importantes cantidades de carbonatos y bicarbonatos de calcio, magnesio y sodio, las que proporcionan al agua reacción alcalina elevando en consecuencia el valor del pH presente<sup>14</sup>.

##### *1.2.8.1. Tratamiento y acondicionamiento de agua para calderas*

El tratamiento y acondicionamiento de agua para uso en calderas, es una parte especial de la tecnología del agua ya que la evaporación que ocurre cuando el agua se emplea en estos procesos, concentra las sales disueltas en el agua, alcanzan su punto de saturación y se separan del agua formando cristales algunos de ellos difíciles de remover y que dañan los equipos al formar incrustaciones en tuberías y accesorios de calderas y equipos de calentamiento y evaporación

##### *1.2.8.2. Incrustaciones*

Las incrustaciones se definen como depósitos adherentes sobre la superficie de transferencia térmica en lado de agua de las calderas producidas por impurezas sedimentadas o cocidas sobre la superficie de calefacción, aunque también pueden producirse en el lado de los gases dependiendo de la calidad de la combustión y el tipo de combustible.

---

<sup>14</sup> AGUA DE ALIMENTACIÓN PARA CALDERAS., [http:// www.calderasvapor.com/agua\\_calderas](http://www.calderasvapor.com/agua_calderas).

Los principales efectos adversos de la incrustación sobre la superficie calefactora de la caldera son:

- a) La incrustación es un aislante muy eficiente de calor, variando el grado de aislamiento con su densidad. Su presencia en grosores apreciables significa menor absorción de calor por el agua de caldera, con la consiguiente pérdida de eficiencia o rendimiento en la caldera.
- b) Debido a que la incrustación es un mal conductor de calor, las superficies de calefacción de caldera aisladas del agua caliente por un lado y expuestas a los gases calientes por el otro, pueden alcanzar pronto temperaturas peligrosamente altas, que pueden causar rotura de tubos e incluso de virola de caldera.

La formación de incrustaciones aumenta con la tasa de evaporación. Así, los depósitos de incrustación a menudo serán mayores donde la temperatura de los gases sea más elevada.

#### *1.2.8.3. Prevención de incrustación tratamiento externo*

El pre tratamiento o tratamiento externo del agua puede ser necesario a causa de la variación en el suministro y requerimientos del agua de aportación, tipo de proceso o aplicación del sistema de caldera, presión, capacidad y condiciones similares. Así, el tratamiento externo para la prevención de incrustaciones puede incluir reducción de sólidos en suspensión por filtrado, reducción de durezas por ablandamiento a la cal y sosa, ablandamiento por zeolita, equipo de intercambio de iones, desmineralizadores, evaporadores y desaireadores para la eliminación de gases y oxígeno. La tecnología de membranas u osmosis inversa es también aplicable en sistemas de tratamientos externos.

Se tendrá en cuenta el ablandado por cal y sosa para la planta en cuestión, por lo que se detalla su proceso a continuación:

La dureza temporal, o agua dura temporal, que contiene grandes cantidades de bicarbonato cálcico,  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ . Esta agua puede ablandarse mediante ebullición, con lo que el carbonato cálcico precipitará fuera de la solución desprendiendo dióxido de carbono. En plantas industriales, el agua se ablanda añadiendo cantidad suficiente de cal para precipitar el carbonato cálcico.

**La dureza permanente**, se denomina al contenido de sulfato de calcio y magnesio en el agua y no se ablanda por ebullición. Puede ablandarse por adición de carbonato sódico ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), de modo que los carbonatos cálcico y de magnesio precipitan.

- **El proceso de ablandamiento frío por cal y sosa**

Trata agua bruta con cal, hidróxido de calcio (cal apagada) y sosa o carbonato sódico, para reducir parcialmente la dureza.

La cal hidratada (hidróxido de calcio) reacciona con el bicarbonato cálcico soluble y el bicarbonato de magnesio para formar precipitados insolubles. Esto se refleja en las siguientes ecuaciones:



Cal + Bicarbonato Ca Carbonato Ca + Agua



Cal + Bicarbonato Mg Hidróxido de Mg Carbonato Ca + Agua

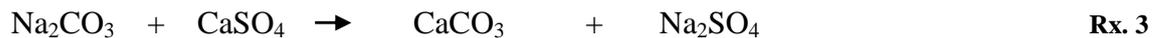
Si el carbonato cálcico se encuentra solo, tiene tendencia a formar agrupaciones de cristales que sedimentan a gran velocidad, mientras que el hidróxido de magnesio, si se encuentra solo, forma flóculos muy ligeros. Si la proporción de hidróxido de magnesio en relación al carbonato cálcico es pequeña, se ocluye dentro del precipitado cálcico, pero si su proporción es grande, no pueden obtenerse precipitados densos, siendo mucho menor la velocidad de sedimentación.

La realización en la práctica del proceso de ablandamiento con resultados satisfactorios, implicará un conocimiento adecuado de las siguientes variables:

**a) Caudal de agua que va a ser tratada:** la medida exacta del caudal de agua que se va a tratar es imprescindible para adecuar el tratamiento, ya que la dosificación de reactivos se hará en función del caudal. Además, el flujo de agua debe ser continuamente vigilado, ya que habitualmente se producen variaciones importantes en todas las fuentes de captación.

**b) Características químicas del agua:** antes de realizar el ablandamiento de un agua es imprescindible conocer su composición. Sobre todo, será necesario determinar su dureza para evaluar la conveniencia o no del tratamiento.

La cal apagada no es efectiva para eliminar sulfato y cloruros de calcio. Para este tipo de dureza se utiliza la sosa (carbonato sódico) que reacciona de la siguiente manera:



Sosa + Sulfato Ca Carbonato Ca + Sulfato de sodio



Sosa + Cloruro cálcico Carbonato Ca + Cloruro sódico

El carbonato cálcico formado en la reacción tiende a salir fuera de la solución en forma de lodo. El sulfato sódico y cloruro sódico son altamente solubles y no forman incrustaciones.

Para dosificar los productos de tratamiento, los químicos de tratamiento de aguas usan las ecuaciones químicas por aplicación del total de los pesos atómicos por compuesto en la reacción. Al asignar pesos atómicos en la reacción 4. La ecuación es la siguiente:



106 + 111,1 100,1 + 117

Los números representan la suma de los pesos atómicos de los elementos en cada compuesto. Por ejemplo si se usa carbonato sódico ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) para tratar cloruro cálcico ( $\text{CaCl}_2$ ), por el método de los pesos atómicos, se obtendrían los pesos de la ecuación química, que es útil para la dosificación. Usando la siguiente ecuación:

$$P_{C_{tr}} = \frac{Pr_a(Pa_{C_{tr}})}{Pa_{r_a}} \quad \text{Ec. 9}$$

Dónde:

$P_{c_{tr}}$  = peso del compuesto a tratar.

$P_{r_a}$  = peso del reactivo a adicionar.

$P_{a_{c_{tr}}}$  = peso atómico del compuesto a tratar.

$P_{a_{r_a}}$  = peso atómico del reactivo a adicionar.

Ecuación que se puede aplicar teniendo en cuenta los reactivos y productos para obtener los otros pesos de la ecuación química.

#### *1.2.8.4. Prevención de incrustación tratamiento interno*

La selección de productos químicos para evitar incrustaciones con tratamiento interno está dirigida al control de las impurezas minerales que se deslizan pasando el programa de pre tratamiento. El pre tratamiento, bien por precipitación química o por intercambio iónico, reducirá, pero no eliminara el problema que causa la tendencia de las impurezas en el agua de caldera.

##### **a) Tratamiento combinado con fosfato**

Este tratamiento fue desarrollado a partir del uso del tratamiento de fosfatos para eliminar las incrustaciones de sulfato cálcico y magnésico con un lodo que puede eliminarse por purga adecuada, especialmente para calderas que trabajan por debajo de 600 PSI (42 kg/cm<sup>2</sup>). El lodo se denomina hidroxiapatito. La reacción química que los especialistas del tratamiento de aguas utilizan es la siguiente:



Dureza de Ca + Alcalinidad de hidrato + Fosfato = Hidroxiapatito

Otra reacción es aquella que la dureza de magnesio en presencia de sílice adecuada forma un lodo de magnesio, llamada serpentina, como en la ecuación:



Dureza Mg + Sílice + Alcalinidad hidrato = serpentina

El tratamiento solo con fosfatos produce orto fosfatos residuales de entre 30 y 60 ppm como  $\text{PO}_4$ , con niveles de alcalinidad hidratada de 200-400 ppm (como OH).

Hay varias características indeseables del tratamiento convencional con fosfatos. La reacción añade contenido de sólidos en suspensión en el agua, lo que no es deseable si la presión de caldera está cerca o por debajo de 1000 PSI.

Los niveles de alcalinidad de hidrato se consideran también demasiado altos para esta presión de caldera, a causa del peligro de corrosión caustica.

A medida que la presión aumenta hay más riesgo de corrosión cáustica debido a que el metal está sometido a más tensiones por el aumento de presión y temperatura.

#### **b) Eliminación de incrustaciones**

La eliminación de incrustaciones del lado de agua se efectúa por medio de tres métodos: eliminación mecánica, tratamiento de agua y limpieza química

- **Eliminación mecánica**

Se efectúa mientras la caldera esta parada y vacía. Las zonas accesibles de virolas, calderines, cabezales y abrazaderas se limpian mecánicamente con un cincel embozado o martillo desincrustante teniendo cuidado de no rebajar o disminuir el espesor del metal. La incrustación puede desprenderse de las superficies interiores de los tubos de agua con una turbina tubular. Generalmente se usa agua limpia para limpiar los lodos incrustantes mientras la turbina está trabajando.

- **Tratamiento de agua**

Hay que tener cuidado al eliminar las incrustaciones por este método. Si la incrustación se elimina demasiado rápidamente puede caer en grandes cantidades, con daño serio para la caldera, teniendo como resultado una restricción de la circulación y el consiguiente sobrecalentamiento. En una caldera piro tubular, pueden darse combaduras o incluso rotura de la virola interior.

- **Limpieza química (con ácido)**

Este método se usa a menudo para eliminar óxidos metálicos. Los disolventes utilizados para la limpieza ácida son variados. Algunos usan ácido clorhídrico, otros, ácido fosfórico. El proceso usual es llenar la caldera hasta que la solución rebosa por el venteo (el ácido se añade desde el exterior a la caldera). Se deja que la solución empape la

chapa de la caldera durante cuatro a seis horas, seguidas de un relleno con un agente neutralizador.

Si se usa ácido clorhídrico para la limpieza, se utiliza una solución débil de ácido fosfórico. Después del drenaje, se usa agua limpia para lavar; después, la caldera se llena inmediatamente con solución alcalina y se hierve de nuevo varias horas. Esta solución se drena; la caldera se lava de nuevo y, después, se rellena con agua de servicio normal.

Debe utilizarse aire comprimido para forzar a la solución fuera de las zonas curvadas o tubos en U, para evitar un ataque ácido por restos del ácido de limpieza.<sup>15</sup>

#### *1.2.8.5. Corrosión*

Uno de los problemas de desgaste en una caldera son los daños y el desgaste que se presenta por corrosión.

El oxígeno disuelto presente en el agua causa el desgaste de la estructura metálica de la caldera formando hidróxido férrico y esto causa corrosión por picadura que aparece en puntos muy localizados de la estructura. Las reacciones químicas entre el oxígeno y el metal son las siguientes:



Y sumado las reacciones (1.2.10.5-1) y (1.2.10.5-2)



No solo el oxígeno es causante de la picadura, también el bióxido de carbono causa corrosión y este gas se genera abundantemente cuando el agua se calienta hasta el punto de ebullición

#### ➤ **Para evitar o disminuir al mínimo la corrosión**

Deberán separarse los gases y ventilarse a la atmósfera, sin embargo no se separan todos los gases y sus efectos corrosivos son neutralizados por la adición de reactivos que reaccionan con el oxígeno como lo es el sulfito de sodio.

---

<sup>15</sup> KOHAN, A. Manual de Calderas. 4a ed. México, Mc Graw Hill, 2000. pp. 530-551.



Generalmente se necesitan 8 partes de sulfito por cada parte de oxígeno disuelto. El oxígeno es uno de los agentes más corrosivos en una caldera y por esta razón debe removerse por aireación y ventilación del agua de alimentación y de condensados en el sistema, y el resto por tratamiento con sulfito de sodio.

A altas temperaturas el sulfito se descompone y pierde sus propiedades.



En calderas de alta presión. La temperatura del agua es mayor de 100°C y debe emplearse hidracina en forma de hidrato de hidracina  $\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  o sulfato de hidracina  $\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ . Estos productos son tóxicos y representan riesgos en su almacenamiento y manejo, pero son la mejor opción al tratamiento de calderas de alta presión para evitar la corrosión por oxígeno.

La hidracina reacciona con el oxígeno de la siguiente manera:



Si se emplea hidrato de hidracina se tiene la ventaja de que no solo se neutraliza el oxígeno sino que también no se incrementa la cantidad de sólidos disueltos y esto es una gran ventaja cuando se tiene calderas de alta presión.

Los agentes depolarizantes son aquellos que tienen la tendencia a atraer electrones de otro elemento o compuesto y favorecen la corrosión electroquímica. Ejemplo de este tipo de agentes despolarizadores son el oxígeno, el ion hidrogeno y el ion nitrito.



Todos estos agentes químicos tienen tendencia a atraer electrones y los van a sacar de otro elemento o compuesto del cual los puedan extraer, como es el caso del metal, causando la corrosión por oxidación del material del equipo que es metal casi en su totalidad.

El oxígeno se encuentra disuelto y debe removerse por ventilación en el condensador de la caldera (junto con el corrosivo CO<sub>2</sub>) y agregando químicos que consuman el oxígeno residual, como ya se ha descrito en párrafos anteriores.

El agua tiene menos iones hidrogeno a valores de pH con tendencia a lo alcalino por lo que el agua de proceso debe estar en este rango de pH (8-9). Los nitritos no se encuentran originalmente en el agua pero se producen por la conversión microbiana del ion amonio producto de descomposición de la materia orgánica que es oxidado por bacterias a nitratos y nitritos:



Para minimizar el ataque corrosivo por nitritos, es conveniente desinfectar el agua que se alimenta a la caldera.

La alcalinidad del agua, la cual se debe parcialmente a la presencia de ácido carbónico lleva a efecto las siguientes reacciones:



Si el pH es alto, el ácido carbónico se disocia a iones hidrogeno y ion carbonato.

Si el pH es bajo, se favorece la reacción en sentido contrario y el ácido no se disocia.

Si el ácido no se disocia entonces el ácido carbónico disuelto en el agua se descompone en el condensador a bióxido de carbono y agua, desprendiendo el corrosivo CO<sub>2</sub>.



Este gas deberá extraerse del agua que se condensa y regresa nuevamente en un circuito cerrado a la caldera, o de lo contrario se tendrán efectos corrosivos en la tubería interior y otras partes de la caldera.

Existen en el mercado membranas específicas que selectivamente remueven de los condensados gases como oxígeno y bióxido de carbono.

No es mucha la información de la que se dispone en este momento por situaciones de confidencialidad y derechos de patente pero ya se comercializan y están disponibles en el mercado.

### ➤ Otra forma de evitar la formación de sarro en las calderas

Es removiendo completamente las sales por *osmosis inversa*, del agua que se emplea como agua de alimentación a las calderas y en este caso no solo se remueven las sales incrustantes sino todas ellas y las purgas en las calderas se reducen al mínimo y obviamente no se presenta la incrustación. La corrosión y la formación de incrustaciones son los problemas más serios de un sistema de producción de vapor.

#### 1.2.8.6.Espumas

Es muy frecuente la formación de espumas cuando el agua hierve en la caldera, y esto se debe a que los gases disueltos que tiene el agua, como O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, etc. Pasan de la fase acuosa a la fase de vapor de acuerdo a la relación de Henry que establece que la solubilidad de los gases en un medio acuoso disminuye a medida que aumenta la temperatura de la fase líquida.

La formación de espumas también se puede presentar cuando la caldera no se purga con la frecuencia requerida y se presenta este efecto que causa problemas de operación y disminuye la calidad del vapor, ya que se puede presentar el arrastre de partículas de sólidos con el vapor.<sup>16</sup>

#### 1.2.8.7.Purga

La purga es una parte integrante del adecuado funcionamiento del programa de tratamiento de agua de caldera y normalmente requiere monitorización continua para un control positivo y correcto. Mediante la purga se retira la mayoría del lodo, polvo, suciedad y otros materiales indeseables del calderín de la caldera.

En la mayoría de los sistemas, la purga superficial se realiza de manera continua y el intervalo óptimo de purga es aquel en que se minimiza el lodo o incrustación de las superficies calefactoras.

La purga intermitente o de fondo se toma del fondo del calderín de lodos, colectores de muros, pantalla, o punto inferior del sistema de circulación. La válvula de purga se abre manualmente para eliminar el lodo acumulado cada 4 a 8 horas, o cuando la caldera esta parada o baja carga de vapor.

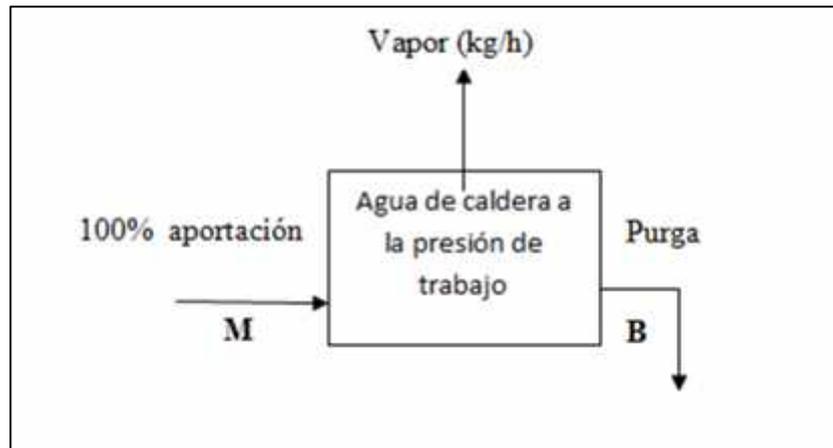
---

<sup>16</sup> Tratamiento y acondicionamiento de agua para calderas., <http://www.quiminet.com/articulos/el-acondicionamiento-de-aguas-8284.htm>

- **Cálculo del porcentaje de purga**

La cantidad de purga se calcula como un porcentaje del caudal de agua de aportación que va a la caldera para mantener la concentración de impurezas en la caldera a un nivel aceptable, o a unas ppm aceptables. La purga elimina las impurezas concentradas hasta unos valores aceptables de concentración en el agua de caldera expresados en ppm.

**FIGURA 2-1: DIAGRAMA DE LAYOUT DEL FLUJO DE VAPOR DE UNA CALDERA**



Fuente: KOHAN, A. Manual de Calderas. 4a ed. México, Mc Graw Hill, 2000.

Que toma los sólidos totales a la presión de trabajo, agua de aportación y purga, que ayuda a calcular el porcentaje de purga y los caudales implicados.<sup>17</sup>

#### 1.2.8.8. Índices de Langelier, Ryznar y Puckorius

Estos índices son los que evalúan la tendencia agresiva o corrosiva del agua, tomando en consideración los valores de pH y temperatura del agua objeto del análisis.

El Índice de saturación de **Langelier** está definido por la aplicación de la fórmula

$$IL = \text{pHA} - \text{pHS} \quad \text{Ec. 10}$$

Dónde:

pHA = pH actual del agua.

pHS = pH de saturación

<sup>17</sup> KOHAN, A. Manual de Calderas. 4a ed. México, Mc Graw Hill, 2000. p.pp. 560-563.

Donde el pHs viene definido por:

$$\mathbf{pHS} = (9,3 + A + B) - (C + D) \quad \text{Ec. 11}$$

En la que:

$$\mathbf{A} = (\text{Log} [\text{TDS}] - 1)/10 \quad \text{Ec. 12}$$

$$\mathbf{B} = -13,12 \times \text{Log} (^\circ\text{C} + 273) + 34,55 \quad \text{Ec. 13}$$

$$\mathbf{C} = \text{Log} [\text{Ca}^{+2} \text{ como CaCO}_3] \text{ dureza en mg/L.} \quad \text{Ec. 14}$$

$$\mathbf{D} = \text{Log} [\text{Alcalinidad como CaCO}_3] \quad \text{Ec. 15}$$

Dónde:

TDS = Solidos totales disueltos (mg/L)

Si el IL está entre -1 a -4 la tendencia del agua en el circuito será muy corrosiva. Si el IL está entre -0.3 a -1 la tendencia del agua en el circuito será levemente corrosiva. Si el IL está entre -0.3 a +0.3 la tendencia del agua en el circuito será neutra, en balance. Si el IL está entre 0.3 a 1.5 la tendencia del agua en el circuito será levemente precipitante. Si el IL está arriba de 1.5 la tendencia del agua en el circuito será altamente precipitante. Lo ideal para un sistema o circuito de agua (ejemplo refrigeración) es estar entre 0 y +0,5.

Hay que tener en cuenta que con un aumento del STD el agua se hace más corrosiva porque en las sales disueltas en el agua los iones negativos y positivos están divididos, entonces más sal existe en el agua más conductiva es, debido a la presencia de electrones libres. En el proceso de corrosión está presente el intercambio de electrones. Cuando la temperatura del agua aumenta, la solubilidad  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  y  $\text{CaCO}_3$  decrece. Por consiguiente estas sustancias precipitarán formando depósitos de sarro.

Índice de estabilidad de Ryznar **IR**, viene dado por la siguiente formula:

$$\mathbf{IR} = 2(\text{pHS}) - \text{pHA} \quad \text{Ec. 16}$$

Dónde:

pHA = pH actual del agua.

pHS = pH de saturación

En lo que respecta al Índice práctico de incrustación de Puckorius viene dado por la fórmula:

$$IP = 2(pHS) - pHEQ \quad \text{Ec. 17}$$

Dónde:

$$pHEQ = 1,465 \times \text{Log} [\text{Alcalinidad}] + 4,54.^{18}$$

### ***1.2.9. Conceptos sobre combustión***

La reacción del combustible con el oxígeno origina sustancias gaseosas entre las cuales las más comunes son CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Es importante destacar que el combustible solo reacciona con el oxígeno y no con el nitrógeno, el otro componente del aire. Por lo tanto el nitrógeno del aire pasará íntegramente a los productos de combustión sin reaccionar. De acuerdo a como se produzcan las reacciones de combustión, estas pueden ser de distintos tipos:

#### **a) Combustión completa**

Ocurre cuando las sustancias combustibles reaccionan hasta el máximo grado posible de oxidación. En este caso no habrá presencia de sustancias combustibles en los productos o humos de la reacción.

#### **b) Combustión incompleta**

Se produce cuando no se alcanza el grado máximo de oxidación y hay presencia de sustancias combustibles en los gases o humos de la reacción.

#### **c) Combustión estequiométrica o teórica**

Es la combustión que se lleva a cabo con la cantidad mínima de aire para que no existan sustancias combustibles en los gases de reacción. En este tipo de combustión no hay presencia de oxígeno en los humos, debido a que este se ha empleado íntegramente en la reacción.

#### **d) Combustión con exceso de aire**

---

<sup>18</sup> ÍNDICES DE LANGELIER, RYZNAR Y PUCKORIUS., <http://www.construsur.com.ar/News-sid-93-file-article-pageid-2.html>

Es la reacción que se produce con una cantidad de aire superior al mínimo necesario. Cuando se utiliza un exceso de aire, la combustión tiende a no producir sustancias combustibles en los gases de reacción. En este tipo de combustión es típica la presencia de oxígeno en los gases de combustión. La razón por la cual se utiliza normalmente un exceso de aire es hacer reaccionar completamente el combustible disponible en el proceso.

#### **e) Combustión con defecto de aire**

Es la reacción que se produce con una menor cantidad de aire que el mínimo necesario. En este tipo de reacción es característica la presencia de sustancias combustibles en los gases o humos de reacción.

##### **➤ Si no se suministra suficiente aire u oxígeno**

La mezcla es rica en combustible; así que la llama se reduce, con una llama resultante que tiende a ser larga y con humo. La combustión tampoco es completa, y los gases (producto de la combustión) tendrán combustible no quemado, como partículas de carbono o monóxido de carbono en vez de dióxido de carbono. Se desarrollara menos calor por el proceso de combustión.

##### **➤ Si se suministra demasiado oxígeno o aire**

La mezcla y la combustión son pobres, dando lugar a una llama más corta y más limpia o clara. El exceso de aire se lleva algo de calor desprendido en el hogar y lo traslada al exterior por la chimenea. La combustión debería efectuarse siempre con exceso de aire, para asegurar que todo el combustible se queme correctamente así obtener el mejor rendimiento del desprendimiento de calor. Esto también reduce la formación de humo y depósitos de hollín, lo que hoy, con las estrictas leyes antipolución, es importante.

- Cuando los gases de la combustión salen por la chimenea como humo negro, es indicio de insuficiente aire.
- Demasiado aire, formalmente produce un denso humo blanco.
- Un humo transparente, ligeramente gris, saliendo de una chimenea, es signo de una relación razonablemente buena aire/combustible, Por supuesto, un análisis más exacto se hace con un analizador de gases, como el aparato Orsat. A partir de este análisis, puede determinarse el porcentaje bien de exceso o de insuficiencia de aire.

### 1.2.9.1. Relaciones aire/combustible.

Esta debe mantenerse en un nivel tan bajo como sea posible con el fin de ahorrar combustible. Sin embargo, a no ser que se utilice exceso de aire en la cámara de combustión, puede tener lugar una combustión incompleta, que también malgastará combustible, pudiendo haber riesgo de explosión por ignición retardada en el hogar, del combustible no quemado.

Para asegurar una combustión completa, debe suministrarse exceso de aire en cantidades que varían entre el 20 y 30%, dependiendo del combustible utilizado, la carga de caldera y su configuración.<sup>19</sup>

### 1.2.9.2. Tipo de combustible

Las calderas de vapor pueden quemar todo tipo de combustible sea este de tipo sólido líquido o gaseoso, en este caso se centra en un combustible líquido, diesel, por ser la caldera objeto de este estudio.

**TABLA 5-1: PROPIEDADES DEL DIESEL**

<b>PROPIEDAD</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALOR</b>
Densidad (15 °C)	Kg/L	0.84
Punto de ignición	°C	63
Calor de combustión	Mj/Kg	44
Carbono	% peso	86.5
Hidrogeno	% peso	12.3
Oxigeno	% peso	0.1
Azufre	% peso	0.7
Agua	% peso	0.1
Punto de ebullición	°C	188-343
Poder calorífico inferior	Kcal/kg	10526.87
Punto de inflamación	°C	60 - 80

Fuente: <http://www.energiaadebate.com/Articulos/Noviembre/SarmientoNov.htm>

<sup>19</sup> DEL ARCO, V. Termotecnia: calor industrial. Madrid: Mitre, 1984. p. pp. 233-285

### 1.2.9.3. Poder calorífico

El poder calorífico según la ley de Dulong, se fundamenta en que el calor desprendido por un combustible es igual a la suma de los calores desprendidos por los elementos combustibles que lo componen, restando el posible hidrógeno consumido por el oxígeno del combustible para formar agua en forma de vapor.

$$Q_u = 8100C + 28500H + 2210S - 600W \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

$C$  = Carbono [%]

$H$  = Hidrógeno [%]

$O$  = Oxígeno [%]

$S$  = Azufre [%]

$W$  = Agua [%]

$Q_u$  = Poder calorífico.

### 1.2.9.4. Calor cedido por el combustible

$$Q_c = P_c \cdot Q_u \quad \text{Ec. 12}$$

Dónde:

$Q_c$  = calor cedido por el combustible kcal/h.

$P_c$  = peso del combustible quemado kg/h.

$Q_u$  = poder calorífico del combustible kcal/kg.<sup>20</sup>

## 1.3. Optimización

En el caso de la optimización del sistema de generación de vapor se interpretará el término optimización como el conjunto de programas de operación y mantenimiento preventivo y correctivo encaminados a obtener el funcionamiento óptimo del sistema,

---

<sup>20</sup> DEL ARCO, V. Termotecnia: calor industrial. Madrid: Mitre, 1984. pp. 253-261

los mismos que están ligados, debiendo ejecutarse en secuencia desde la investigación del problema hasta la puesta en práctica de la propuesta tomando en cuenta cuidadosamente los resultados de los cálculos, el lugar, tiempo y recursos asignados.

### ***1.3.1. Densidad de la mezcla gaseosa***

Es una medida de magnitud y relaciona la cantidad de masa en un determinado volumen, y se relaciona con el porcentaje presente en la mezcla:

$$\rho_m = \rho_{CO_2} * \% CO_2 + \rho_{H_2O} * \% H_2O + \rho_{O_2} * \% O_2 + \rho_{N_2} * \% N_2 + \rho_{SO_2} * \% SO_2$$

#### **Ec. 13**

Dónde:

$$\rho_m = \text{Densidad de la mezcla (kg/m}^3\text{)}$$

$$\rho_{CO_2} = \text{Densidad de cada componente de la mezcla. (kg/m}^3\text{)}$$

% CO<sub>2</sub> = Porcentaje presente de cada componente

Utilizada para calcular la densidad de una mezcla gaseosa y estimar su comportamiento.

### ***1.3.2. Viscosidad de la mezcla gaseosa ( $\mu$ )***

Es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales

$$\mu_m = \mu_{CO_2} * \% CO_2 + \mu_{H_2O} * \% H_2O + \mu_{O_2} * \% O_2 + \mu_{N_2} * \% N_2 + \mu_{SO_2} * \% SO_2$$

#### **Ec. 14**

Dónde:

$$\mu_m = \text{Viscosidad de la mezcla. (kg/m.h)}$$

$$\mu_{CO_2} = \text{Viscosidad de cada componente (kg/m.h)}$$

% CO<sub>2</sub> = Porcentaje presente de cada componente

De utilidad en la industria petrolera para determinar la calidad del petróleo

### ***1.3.3. Calor específico de la mezcla***

Es la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia para elevar su temperatura en una unidad.

Dónde:

$$C_{p_m} = C_{p_{CO_2}} * \% CO_2 + C_{p_{H_2O}} * \% H_2O + C_{p_{O_2}} * \% O_2 + C_{p_{N_2}} * \% N_2 + C_{p_{SO_2}} * \% SO_2$$

#### **Ec. 15**

Dónde:

$$C_{p_m} = \text{Calor específico de la mezcla (Kcal/kg)}$$

$C_p \text{ CO}_2$  = Calor específico de cada componente Kcal/kg

%  $\text{CO}_2$  = Porcentaje presente de cada componente

Es de utilidad en el cálculo del efecto del calor sobre los componentes de la mezcla gaseosa.

#### **1.3.4. Coeficiente de conductividad térmica**

Es una característica de cada sustancia y expresa su capacidad de conducir calor.

Dónde:

$$K_m = K_{\text{CO}_2} * \% \text{CO}_2 + K_{\text{H}_2\text{O}} * \% \text{H}_2\text{O} + K_{\text{O}_2} * \% \text{O}_2 + K_{\text{N}_2} * \% \text{N}_2 + K_{\text{SO}_2} * \% \text{SO}_2$$

Ec. 16

$K_m$  = Coeficiente de conductividad térmica de la mezcla. (kcal/m.h.C)

$K_{\text{CO}_2}$  = Coeficiente de conductividad térmica de cada componente (kcal/m.h.C.)

%  $\text{CO}_2$  = Porcentaje presente de cada componente

Considerado en el campo de la construcción para considerar el comportamiento de los materiales frente a la conducción de calor

#### **1.3.5. Modulo adimensional de Nusselt**

Mide el aumento de transmisión de calor desde una superficie por la que existe transferencia de calor por convección como si hubiera solo transferencia por conducción.

$$Nu = h \frac{D}{k} \quad \text{Ec. 17}$$

Dónde:

$Nu$  = Modulo adimensional de Nusselt

$h$  = Coeficiente de convección. (kcal/h.m<sup>2</sup>.C)

$D$  = Diámetro. (m)

$k$  = coeficiente de transmisión térmica del material. (kcal/h.m.C)

De utilidad para el cálculo del coeficiente de convección y la estimación de la transferencia de calor.

### **1.3.6. Número de Reynolds**

Relaciona la velocidad, densidad y viscosidad para caracterizar el movimiento de un fluido.

$$Re = \frac{v \cdot \delta \cdot D}{\mu} \quad Ec. 18$$

Dónde:

Re = Modulo adimensional de Reynolds.

v = velocidad. (m/s)

$\delta$  = densidad. (Kg/m<sup>3</sup>)

D = diámetro. (m)

$\mu$  = viscosidad dinámica. (Kg/m.s)

Utilizado en el diseño de reactores para caracterizar el movimiento de un fluido.

### **1.3.7. Número de Prandtl**

Es un número adimensional que relaciona la viscosidad dinámica, calor específico y el coeficiente de transmisión termica

$$Pr = \frac{Cp \cdot \mu}{k} \quad Ec. 19$$

Dónde:

Pr = Modulo adimensional de Prandtl.

Cp = Calor específico, (kcal/kg.C)

$\mu$  = viscosidad dinámica. (kg/m.s)

k = coeficiente de transmisión térmica del material. (kcal/h.m.C)

Considerado en la resolución de problemas de fluidos, para la apreciación de la relación de conducción y convección de estos.

### **1.3.8. Coeficiente de convección**

Cuantifica la transferencia de calor por convección influida por las propiedades del fluido de la superficie y del flujo.

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D} \quad \text{Ec. 20}$$

Dónde:

Nu = Modulo adimensional de Nusselt

h = Coeficiente de convección. (kcal/h.m<sup>2</sup>.C)

D = Diámetro. (m)

k = coeficiente de transmisión térmica del material. (kcal/h.m.C)

Se utiliza en la industria maderera para calcular la transferencia de calor por conducción entre el secador y la madera.

### **1.3.9. Coeficiente integral de transmisión de calor**

Es un indicativo del nivel de transmisión integral de calor y se relaciona con la resistencia calorífica total, diámetros, coeficientes de convección y conductividad.

El coeficiente integral de transmisión de calor referido a la superficie externa será:

$$U_e = \frac{1}{\frac{1}{h_i} \frac{D_e}{D_i} + \frac{e}{k_m} \frac{D_e}{D_m} + \frac{1}{h_e}} \quad \text{Ec. 21}$$

Dónde:

U<sub>e</sub> = coeficiente integral de transmisión de calor referido a superficie externa (Kcal/m<sup>2</sup>hC).

h<sub>i</sub> = coeficiente de convección para el fluido interno (Kcal/m<sup>2</sup>hC).

D<sub>e</sub> = diámetro externo (m).

$D_i$  = diámetro interno (m).

$e$  = espesor (m).

$k_m$  = coeficiente de conductividad (Kcal/m.h.C)

$D_m$  = diámetro medio (m).

$h_e$  = coeficiente de convección para el fluido externo (Kcal/m<sup>2</sup>hC).

Y referido al área de superficie interna será:

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{e}{k_m} \frac{D_i}{D_m} + \frac{1}{h_e} \frac{D_i}{D_e}} \quad \text{Ec. 22}$$

Dónde:

$U_i$  = coeficiente integral de transmisión de calor referido a superficie interna (Kcal/m<sup>2</sup>hC).

$h_i$  = coeficiente de convección para el fluido interno (Kcal/m<sup>2</sup>hC).

$D_e$  = diámetro externo (m).

$D_i$  = diámetro interno (m).

$e$  = espesor (m).

$k_m$  = coeficiente de conductividad media (Kcal/m.h.C).

$D_m$  = diámetro medio (m).

$h_e$  = coeficiente de convección para el fluido externo (Kcal/m<sup>2</sup>hC).

De utilidad en la construcción de intercambiadores de calor para cuantificar su transferencia integral de calor y estimar su efectividad.

### ***1.3.10. Resistencia de Incrustaciones***

Las incrustaciones son depósitos que se adhieren sobre la superficie de transferencia térmica y que afectan directamente en el coeficiente total de transferencia térmica.

$$R = \frac{1}{h_i \cdot A_i} + \frac{R_{fi}}{A_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} + \frac{R_{fe}}{A_e} + \frac{1}{h_e \cdot A_e} \quad \text{Ec. 23}$$

Dónde:

$h_i$  = coeficiente de transferencia de calor por convección en el área interna.

$h_e$  = coeficiente de transferencia de calor por convección en el área externa.

$A_i = D_i \cdot l$  = Área interna de transferencia de calor.

$A_e = D_e \cdot l$  = Área externa de transferencia de calor.

$l$  = longitud de los tubos.

$D_e$  = Diámetro externo

$D_i$  = Diámetro interno.

$R_{fi}$  = factor de incrustación en la superficie interna.

$R_{fe}$  = factor de incrustación en la superficie externa.

Muy utilizado en el sector de refrigeración industrial para el cálculo de la influencia de las incrustaciones en la transferencia de calor.

### ***1.3.11. Diferencia Media Logarítmica de Temperatura***

Es un valor medio de temperaturas entre los fluidos que intercambian calor, que varía continuamente de uno a otro extremo del intercambiador.

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} \quad \text{Ec. 24}$$

Siendo:

$(\Delta T)_2$  = diferencia de temperaturas en el extremo caliente.

$(\Delta T)_1$  = diferencia de temperaturas en el extremo frío.

$$\Delta T_2 = T_{c2} - T_{f2} \quad \text{Ec. 25}$$

$$\Delta T_1 = T_{c1} - T_{f1} \quad \text{Ec. 26}$$

Dónde:

$T_{c1}$  = Temperatura final del fluido caliente.

$T_{c2}$  = Temperatura inicial del fluido caliente.

$T_{f1}$  = Temperatura final del fluido frío.

$T_{f2}$  = Temperatura inicial del fluido frío.

Se utiliza en el sector automotriz para tener en cuenta la variabilidad de temperaturas en el circuito de refrigeración.

### ***1.3.12. Área Total de Transferencia de Calor***

Es el área superficial total de transferencia de calor de los tubos.

$$A_s = n_t \cdot D \cdot l \quad \text{Ec. 27}$$

Dónde:

$A_s$  = Área superficial total de los tubos

$n_t$  = número de tubos

$D$  = diámetro interno o externo de los tubos

$l$  = longitud

Se utiliza en el dimensionamiento de intercambiadores de calor para el cálculo del área de transferencia de calor de los tubos.

### ***1.3.13. Resistencia del aislamiento***

Es la eficacia de los materiales de aislamiento en términos de la resistencia térmica del material por unidad de área superficial.

$$R = \frac{r_2}{k} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (\text{aislamiento de tubos}) \quad \text{Ec. 28}$$

Dónde:

$r_1$  = radio interior del aislamiento

$r_2$  = radio exterior del aislamiento

Una vez que se cuenta con el valor de R, se puede determinar la velocidad de la transferencia de calor a través del aislamiento a partir de:

$$Q = \frac{\Delta T}{\text{Valor } R} * \text{Área} \quad \text{Ec. 29}$$

Dónde:

$T$  = La diferencia de temperatura a través del aislamiento.

Área = Área superficial exterior para un cilindro.

Es utilizado en la industria alimenticia para determinar el mejor aislamiento que mantenga la temperatura alta o baja según la necesidad.

#### ***1.3.14. Eliminación de incrustaciones***

Para determinar la cantidad de cal necesaria, se considera que el calcio a eliminar se encuentra todo en forma de bicarbonatos, la eliminación de un mol de calcio (peso atómico 40 g), en forma de bicarbonato, requiere un aporte de un mol de hidróxido cálcico (74 g). La eliminación de una determinada concentración de calcio ( $C_{Ca}$ ), se producirá con la siguiente cantidad de hidróxido cálcico ( $HC_{Ca}$ ):

$$Hc_{ca} = \frac{Cca * 74}{40} = 1.85Cca \quad \text{Ec. 30}$$

Dónde:

( $C_{Ca}$ ): concentración de calcio.

( $HC_{Ca}$ ): cantidad de hidróxido cálcico.

La eliminación de un mol de magnesio (24,3 g) en forma de bicarbonatos, requiere dos moles de cal, ya que se necesita un mol para su transformación en carbonato de magnesio y otro mol para convertir éste en hidróxido de magnesio.

Por tanto, la eliminación de una determinada concentración de magnesio del agua ( $C_{Mg}$ ), se producirá con la siguiente cantidad de hidróxido cálcico ( $HC_{Mg}$ ):

$$Hc_{Mg} = \frac{C_{Mg} * (2 * 74)}{24.3} = 6.1C_{Mg} \quad Ec. 31$$

Dónde:

$C_{Mg}$ : concentración de magnesio del agua.

De esta forma puede obtenerse un valor aproximado para realizar la prueba del vaso mediante la siguiente expresión:

$$HC_T = HC_{Ca} + HC_{Mg} = 1.85 \cdot C_{Ca} + 6.1 \cdot C_{Mg} \quad Ec.32$$

Dónde:

$HC_T$ : es el aporte de cal calculado para el tratamiento (mg/l).

$C_{Ca}$ : concentración de calcio que se pretende eliminar del agua (mg/l).

$C_{Mg}$ : concentración de magnesio que se desea eliminar del agua (mg/l).

De utilidad en el pre tratamiento de agua de proceso para reducir la dureza temporal con el fin de no tener que dar un tratamiento tan intensivo al agua que participa en el proceso.

### ***1.3.15. Balance de Masa en la Cámara de Ebullición***

Es la cantidad de vapor producido en base a la alimentación de agua y las pérdidas.

$$F = V_{H_2O} \quad Ec. 33$$

Dónde:

F = Flujo de agua de alimentación

V<sub>H2O</sub> = Vapor de agua producido

Utilizado en la producción industrial de vapor para estimar las pérdidas o arrastres de agua en el vapor.

### ***1.3.16. Calor entregado por el combustible al sistema.***

Hace referencia al calor entregado por el combustible al sistema e influye en el balance de energía.

$$Q_{E\ sistema} = \eta_{diesel} \times Q_{u\ diesel} \quad \text{Ec.34}$$

Dónde:

Q<sub>E sistema</sub> = Calor entregado al sistema.(Kcal/h)

m<sub>diesel</sub> = Peso del combustible.(Kg)

Q<sub>u diesel</sub> = Poder calorífico del diesel.(Kcal/Kg)

De utilidad en la industria cerámica para calcular el calor entregado al sistema en base al consumo de combustible.

### ***1.3.17. Balance de energía en la caldera.***

Tiene en cuenta la energía entregada al sistema y la energía que arrastra el vapor así como las pérdidas.

$$Q_{E\ sistema} = Q_{V\ SAT.} + \Sigma P_{Calor} \quad \text{Ec.35}$$

Dónde:

Q<sub>E sistema</sub> = Calor entregado al sistema (kcal/h)

Q<sub>V sat.</sub> = Calor que arrastra el vapor saturado (Kcal/Kg)

P<sub>calor</sub> = Sumatoria de las pérdidas de calor. (Kcal/h)

Puesto en práctica en la industria alimenticia para considerar las pérdidas de calor que influirían al proceso de producción.

### **1.3.18. Rendimiento global de la caldera**

El rendimiento de una caldera de vapor es la relación entre su entrega efectiva dividida para la aportación de modo que:

$$r = \frac{\text{entrega efectiva}}{\text{aportación}} * 100 \quad \text{Ec. 36}$$

Dónde:

r = rendimiento del generador de vapor. (%)

Entrega efectiva = vapor generado/kg de combustible \* calor suministrado para transformar el agua en vapor. (Kcal/Kg diesel)

Calor suministrado para transformar el agua en vapor = H -h (Kcal/Kg)

H = Entalpia del vapor a la presión final (kcal/kg)

h = Entalpia del agua de alimentación (kcal/kg).

Aportación = poder calorífico del diesel (Qu). (Kcal/Kg diesel)

Tiene utilidad en la producción industrial de vapor para estimar pérdidas o consumo excesivo de combustible.

### **1.3.19. Factor de Vaporización**

Es la relación entre el calor absorbido por 1 kilogramo de agua de alimentación en las condiciones reinantes en la caldera y el calor absorbido por 1 kilogramo de agua a 100 C, al vaporizarla a 100 C, de donde resulta:

$$F = \frac{(H - h)}{h_{fg}} \quad \text{Ec. 37}$$

Dónde:

F = Factor de vaporización

H = Entalpia del vapor a la presión final (kcal/kg)

h = Entalpia del agua de alimentación (kcal/kg)

$h_{fg}$  = Entalpia de vaporización a 100 C (kcal/kg).

Se utiliza en calderas para estimar su producción máxima de vapor.

### **1.3.20. Vaporización Equivalente**

Son los kilogramos de agua por hora a 100 C, que se vaporizarían a 100 C, si se hubiese absorbido la misma cantidad de energía que en las condiciones observadas en la caldera, por lo tanto:

$$ve = \frac{mvp(H - h)}{h_{fg}} \quad Ec. 38$$

Dónde:

ve = Vaporización equivalente

mvp = Masa de vapor producido por la caldera(Kg/h)

H = entalpia de vapor a la presión de trabajo (kcal/kg).

h = Entalpia del agua de alimentación (kcal/kg).

$h_{fg}$  = Entalpía de vaporización a 100 C

Utilizada en producción de vapor para esterilización, para estimar la absorción de energía, por parte del líquido a evaporar, producida por la caldera

### **1.3.21. Calidad o título del vapor**

El título del vapor es el porcentaje en masa de vapor de una mezcla liquido-vapor y suele denotarse con la letra x

$$x = \frac{m_v}{m_v + m_l} \quad Ec. 39$$

Dónde:

$m_v$  = masa de vapor

$m_l$  = masa del liquido

Se utiliza en la esterilización de alimentos con vapor para estimar la calidad del vapor y por tanto su efectividad.

## CAPITULO II

### 2. PARTE EXPERIMENTAL

#### 2.1. Localización de la investigación

La investigación se desarrolló en la quesera “El nevadito ubicada en la provincia de Chimborazo, cantón San Juan, Comunidad Chimborazo, ubicada a 5 minutos de la carretera principal. Su posición geográfica se encuentra definida en: ALTITUD: 3511 m.s.n.m. LATITUD:1°34'43.08"S LONGITUD: 78°48'37.48"O (Magellan explorer XL- GPS).

La parte experimental consta de dos etapas. La una se refiere a la determinación de las velocidades de gas y de líquido de operación. La otra etapa se refiere a la obtención de los datos válidos para el cálculo del coeficiente total de transferencia de calor.

##### o Primera etapa.

Se inició con una inspección visual del sistema de generación de vapor para continuar con la determinación de las características técnicas del sistema. Posteriormente se realizaron mediciones para determinar las condiciones de operación del equipo y su periodo de operación.

##### o Segunda Etapa.

Dentro de esta etapa de la parte experimental se procedió a determinar los parámetros necesarios para el cálculo del coeficiente total de transferencia de calor para cada lado de los fluidos.

#### 2.1.1. Plan de muestreo

Para la toma de muestras que sirvieron para la determinación de los parámetros del agua de alimentación, y los parámetros de operación de la caldera, utilizamos un muestreo sistemático, debido a que la toma de muestras se extendió durante un periodo de cuatro semanas, obteniendo al final un total de diez muestras, divididas en dos grupos, en lo que compete al agua de alimentación, y en cuanto a los datos de operación del caldero se tomaron un total de cinco muestras que permitieron observar la variabilidad de los

parámetros de operación del sistema de generación de vapor, y recopilar información de parte de las personas involucradas en su operación.

### ***2.1.2. Plan de tabulación y análisis***

Todos los datos recolectados se los registrará en cuadros a fin de que permita realizar un análisis de cada uno de estos y poder determinar la condición en la que se encuentra el sistema de generación de vapor.

## **2.2. Metodología**

### ***2.2.1. Metodología de trabajo***

Se trabajó con las muestras los datos de operación del caldero y con las muestras de agua captada de la red de abastecimiento de la quesera, misma que sirve de abastecimiento al caldero, se tuvo en cuenta la temperatura a la que se encontraba. Las muestras fueron trasladadas el mismo día al Laboratorio de ANÁLISIS TÉCNICOS ubicado en la Facultad de Ciencias en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, luego se realizó el análisis físico – químico de las aguas.

### ***2.2.2. Tratamientos de muestras***

Se trabajó con los datos de la operación del caldero y con las muestras de agua recolectadas a las que se realizó la caracterización físico – química, realizada por 17 parámetros: pH, color, conductividad, turbiedad, cloruros, dureza, calcio, magnesio, alcalinidad, bicarbonatos, sulfatos, oxígeno disuelto, temperatura, hierro, fosfatos, sólidos totales, solidos disueltos, Además considerando estos parámetros, se determinó el índice de Langelier (**IL**) que nos indica si la tendencia del agua utilizada es de tendencia corrosiva o incrustante.

### 2.2.3. Equipos, materiales y reactivos

**TABLA 6-2: EQUIPOS, MATERIALES Y REACTIVOS**

Equipos	Materiales	Reactivos
<ul style="list-style-type: none"> <li>• pHmetro</li> <li>• Conductímetro Dridge Model 31</li> <li>• Fotómetro.</li> <li>• Turbidímetro Hatch Ratio/XR</li> <li>• Potenciómetro Orion Research Model 30</li> <li>• Equipo de reflujo</li> <li>• Baño María</li> <li>• Insufador de aire</li> <li>• Balanza analítica BOECO</li> <li>• Reverbero</li> <li>• Termómetro digital de resistencia de platino. Sper Scientific.</li> <li>• Termopar digital Hanna.</li> <li>• Mini anemómetro digital. Sper Scientific</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pipetas volumétricas 1, 5, 10 mL.</li> <li>• Buretas de 10, 25, 50 mL.</li> <li>• Probetas 10, 25, 50 mL.</li> <li>• Espátulas.</li> <li>• Balones aforados 50, 100, 250 mL.</li> <li>• Vasos de precipitación 100, 250, 500 mL.</li> <li>• Matraz erlenmeyer.</li> <li>• Buretas.</li> <li>• Embudo.</li> <li>• Papel filtro.</li> <li>• Desecador.</li> <li>• Pipeta volumétrica</li> <li>• Cápsula de porcelana</li> <li>• Estufa.</li> <li>• Desecador.</li> <li>• Balanza Analítica.</li> <li>• Pinza de crisol.</li> <li>• Erlenmeyer.</li> <li>• Bureta.</li> <li>• Pipeta.</li> <li>• Espectrofotómetro</li> <li>• Balones de 100 mL</li> <li>• Pipetas.</li> <li>• Botellas de vidrio con tapón</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solución valorada de dicromato de potasio 0,25 Normal</li> <li>• Solución valorada de sulfato ferroso amoniacal 0,25 Normal</li> <li>• Indicador de ferroina.</li> <li>• Solución de cloruro férrico.</li> <li>• Sulfato de magnesio.</li> <li>• Cloruro de calcio.</li> <li>• Sulfato manganoso</li> <li>• Solución de ácido sódica.</li> <li>• Ácido sulfúrico concentrado.</li> <li>• Tío sulfato de sodio</li> <li>• Ácido sulfúrico ( 0,05 Normal )</li> <li>• Fenolftaleína.</li> <li>• Naranja de metilo.</li> <li>• Solución patrón de fosfato ácido de sodio.</li> <li>• Solución de amonio molibdato.</li> <li>• Solución de cloruro estannoso.</li> <li>• Solución de Na (OH) 6 Normal.</li> <li>• Solución de Cloruro de Aluminio.</li> </ul>

Realizado por: Torres, G.

## 2.2.4. Métodos y técnicas

### 2.2.4.1. Métodos

**TABLA 7-2: DESCRIPCION DEL METODO DE ANALISIS PARA EL CALDERO**

<b>DETERMINACIÓN</b>	<b>MÉTODO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Temperatura de Caldera	Práctico	Con un termómetro digital, medir la temperatura de la carcasa en diferentes puntos
Temperatura Gases de Combustión	Práctico	Utilizando un termómetro digital, medir introduciendo la aguja a la entrada de los gases y a la salida en la chimenea.
Velocidad de los gases de combustión	Práctico	Utilizando un anemómetro, medir la velocidad del aire empujado por el ventilador del atomizador
Gases de Combustión	Práctico	Utilizando un equipo para análisis de gases, determinar el porcentaje de O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CO
Presión del vapor de agua producido	Práctico	Tomar el dato registrado por el manómetro.
Temperatura del agua de alimentación	Práctico	Utilizando un termómetro digital medir la temperatura del agua de alimentación.
Consumo de combustible de la caldera	Práctico	Determinar el combustible utilizado.

FUENTE: UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR. Técnica Guía Laboratorio Operaciones Unitarias.

### 2.2.4.2. Técnicas

Se utilizaron técnicas documentales y de campo para organizar los procedimientos operativos y recopilar la información necesaria para desarrollarlo.

#### *2.2.4.2.1. Técnica documental*

**a) Fuentes primarias de información:** Se incluyó el empleo de documentos que corroborarán el conocimiento inmediato de la investigación como: libros, informes técnicos y manuales de operación.

**b) Fuentes Secundarias de Información:** se tuvo en cuenta como fuentes secundarias, los manuales, y la bibliografía entre otros, cuyos datos se basaran en documentos primarios.

**c) Instrumentos para Investigación Documental:** La investigación documental implicó plasmar el contenido a través de citas, que facilitarían el desarrollo del proyecto.

#### *2.2.4.2.2. Técnica de campo*

Se desarrolló mediante el empleo y análisis de la distinta información recopilada en el lugar, y la información de funcionamiento del equipo, los cuales fueron tratados mediante las técnicas descritas a continuación y serán de gran ayuda dentro de la investigación para la optimización de su funcionamiento

2.2.4.2.3. *Determinación del Potencial de hidrógeno pH*

**TABLA 8-2: DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE HIDRÓGENO PH**

Concepto	Materiales	Reactivos	Procedimiento	Cálculos
<p>El pH es el parámetro que nos indica la alcalinidad o acidez del agua, en un escala numérica de 1 a 14. Si el agua es ácida el pH es menor a 7, si es básica mayor a 7, si es igual a 7 es neutro.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pHmetro digital.</li> <li>• Un vaso de precipitación de 250 mL.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Soluciones buffer pH 4 y pH 7 y pH 10</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificar que el pHmetro este calibrado utilizando las soluciones buffer (el siguiente orden 4,7 y 10 de pH) estas que se encargan de realizar pequeños cambios de su potencial de estado y mantener a este.</li> <li>• Colar el electrodo dentro del vaso.</li> <li>• Leer directamente el valor en el equipo.</li> </ul>	<p>Lectura directa</p>

Fuente: STANDARD METHODS 2550 Edición 17

2.2.4.2.4. Comparación del color

**TABLA 9-2: MÉTODO HACH; COMPARACIÓN DEL COLOR**

<b>Concepto</b>	<b>Materiales</b>	<b>Procedimiento</b>
<p>El color es causado por la presencia de sólidos suspendidos, material coloidal y sustancias en solución. El color producido por sólidos suspendidos se denomina Color Aparente. Mientras que el color causado por sustancias disueltas y coloidales se demonizan color verdadero. Este parámetro puede influir en problemas de arrastre y formación de espuma.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Colorímetro HACH</li> <li>• Vaso de precipitado de 250mL</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tomar la muestra en un vaso de precipitación y colocar en la celda.</li> <li>• Colocar la rueda colorimétrica de aguas crudas y leer comparativamente.</li> <li>• De la misma manera colocar la rueda colorimétrica para aguas limpias y leer comparativamente.</li> <li>• Anotar la lectura directamente.</li> </ul>

Fuente: HACH MODEL DR/4000V

2.2.4.2.5. *Determinación de la conductividad*

**TABLA 10-2: STANDARD METHODS 2510-B: DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD**

Concepto	Materiales	Reactivos	Procedimiento	Cálculos
<p>Es la capacidad de una solución para transportar corriente eléctrica, depende de la presencia de iones y su concentración total, de su movilidad valencia y sus concentraciones relativas así como de la temperatura</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conductímetro</li> <li>• Vaso de precipitado de 250 mL</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Colocar la muestra problema en un vaso de precipitación y vertimos en el recipiente que trae el conductímetro.</li> <li>• Tomar la lectura en el conductímetro el cual trae tres diferentes escalas (0-1, 0-10, 0-1000) micro ohms *cm, la misma que tenemos que regular de acuerdo a la escala que se requiera.</li> </ul>	<p>Lectura directa</p>

Fuente: STANDARD METHODS 2550 Edición 17.

2.2.4.2.6. *Determinación de la turbiedad*

**TABLA 11-2: MÉTODO HACH 46500-88: DETERMINACIÓN DE LA TURBIEDAD**

Concepto	Materiales	Reactivos	Procedimiento	Cálculos
<p>La turbiedad mide la intensidad de color en el agua que se obtiene en la captación de agua cruda y luego de la filtración (agua tratada), este equipo identifica toda impureza finamente dividida, cualquiera que sea su naturaleza, que pueda ser suspendida. Estas impurezas pueden ser de origen inorgánicas tales como las arcillas, limos, carbonatos de calcio, sílice, hidróxido férrico, azufre, etc. O pueden ser de naturaleza orgánica tales como materia vegetal finamente dividida, aceites, grasas, microorganismos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2100P Turbidímetro HACH Chemical Company</li> <li>• Celda</li> <li>• Pizeta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua Problema</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Colocar en la celda el agua recolectada en el tanque de recepción. Y agua tomada luego del proceso de filtración</li> <li>• Colocar la celda en el turbidímetro.</li> <li>• Leer directamente el valor según la escala deseada (0-1, 0-10, 0-100 NTU).</li> </ul>	<p>Lectura directa</p>

Fuente: HACH MODEL 2100P TURBIDIMETER

2.2.4.2.7. *Determinación de la concentración de cloruros*

**TABLA 12-2: STANDARD METHODS 4500-CL<sup>-</sup>C: DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CLORUROS**

Concepto	Materiales	Reactivos	Procedimiento	Cálculos
El cloruro en la forma de iones Cl <sup>-</sup> , es uno de los principales aniones presentes en el lodo. Los mismos que pueden encontrarse en altas concentraciones esto depende de la formación de la que procede.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bureta</li> <li>• Erlenmeyer de 100 mL</li> <li>• Probeta de 100 mL</li> <li>• Pipeta de 1 mL</li> <li>• Vaso de precipitado de 250 mL</li> <li>• Piceta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dicromato de Potasio.</li> <li>• Nitrato de plata 0,01 N.</li> <li>• Agua destilada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tomar 25mL de la muestra en un Erlenmeyer.</li> <li>• Agregar unas gotas de indicador de dicromato de potasio, el cual nos dará una coloración amarilla</li> <li>• Titular con nitrato de plata hasta cambio de color.</li> </ul>	Dígitos * 0.5 * factor de Dilución

Fuente: STANDARD METHODS 2550 edición 17

2.2.4.2.8. *Determinación de la dureza*

**TABLA 13-2: STANDARD METHODS 2340-C: DETERMINACIÓN DE LA DUREZA**

Concepto	Materiales	Reactivos	Procedimiento	Cálculos
<p>La dureza total mide la capacidad del agua para consumir jabón. Las aguas duras son usualmente menos corrosivas que las blandas. Contienen sales de calcio y magnesio que están disueltos generalmente en forma de carbonatos que por calentamiento pueden formar bicarbonatos que son la causa de incrustación en los sistemas de producción de vapor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Probeta de 100 mL.</li> <li>• Pipeta de 1 mL.</li> <li>• Vaso de precipitación de 250 mL.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestra problema</li> <li>• Cianuro de potasio KCN.</li> <li>• Buffer de dureza</li> <li>• Negro de Eriocromo T</li> <li>• Solución de EDTA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tomar 25 mL de muestra</li> <li>• Añadir 1 mL de KCN</li> <li>• Anadir 2 mL de buffer pH 10</li> <li>• Añadir indicador Negro de Eriocromo T.</li> <li>• Titular con EDTA (0.02M) de rojo / azul.</li> </ul>	<p>mL valorados por 20</p>

Fuente: STANDARD METHODS 2550 Edition 17.

2.2.4.2.9. *Determinación de calcio*

**TABLA 14-2: STANDARD METHODS 3500-CA –D: DETERMINACIÓN DE CALCIO**

Concepto	Materiales	Reactivos	Procedimiento	Cálculos
<p>El calcio es el 5º elemento en abundancia en la corteza terrestre, su presencia en las aguas naturales se debe a su paso sobre depósitos de piedra caliza, yeso y dolomita.</p> <p>La cantidad de calcio puede variar desde cero hasta varios cientos de mg/l, dependiendo de la fuente y tratamiento del agua.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bureta</li> <li>• Pipeta de 1 mL</li> <li>• Vaso de precipitado de 250 mL</li> <li>• Erlenmeyer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cianuro de potasio</li> <li>• Hidróxido de sodio 1N</li> <li>• Murexida</li> <li>• EDTA 0,02M</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Colocar 25 mL de muestra</li> <li>• Añadir 1 mL de KCN</li> <li>• Añadir 1 mL de NaOH (1N)</li> <li>• Añadir 1g de indicador Murexida</li> <li>• Titular con EDTA (0.02M)</li> </ul>	<p>Multiplicar por el factor correspondiente.</p>

Fuente: STANDARD METHODS 2550 edition 17

2.2.4.2.10. Determinación de la alcalinidad

**TABLA 15-2: STANDARD METHODS 4500HB: DETERMINACIÓN DE LA ALCALINIDAD**

Concepto	Materiales	Reactivos	Procedimiento	Cálculos
La alcalinidad del agua es la capacidad para neutralizar los ácidos y constituye la suma de todas las bases titulables, el valor medido puede variar significativamente con el pH. Depende del contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos por los que se puede tomar como una medida directa de la concentración de estos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Probeta de 50 mL</li> <li>• Pipeta de 1 mL</li> <li>• Vaso de precipitados de 250 mL</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestra problema.</li> <li>• Anaranjado de metilo</li> <li>• Fenolftaleína</li> <li>• Ácido sulfúrico 0,02N</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tomar 25 mL de muestra</li> <li>• Agregar 2 gotas de Fenolftaleína si cambia a color rosado titular con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> hasta incoloro.</li> <li>• Si no cambia de color añadir 3 gotas de Naranja de Metilo titular con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de naranja / rosado</li> <li>• Leer el valor de titulación.</li> </ul>	mL valorados por 20

Fuente: STANDARD METHODS 2550 Edición 17

2.2.4.2.11. Determinación de sulfatos

**Tabla 16-2: DETERMINACIÓN DE SULFATOS: METODO ASTM D-1339 C**

FUNDAMENTO	MATERIALES	TECNICA	CALCULO
<p>El sulfato (<math>\text{SO}_4^{2-}</math>) se encuentra frecuentemente en las calderas y agua de alimentación de las mismas, donde se usa para inhibir la corrosión reduciendo el oxígeno disuelto. A las elevadas temperaturas y presiones de las calderas, el sulfato puede degradarse produciendo bióxido de azufre y, en presencia de álcalis, sulfuro de hidrógeno que contamina el vapor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erlenmeyer de 250 ml</li> <li>• vaso de precipitación</li> <li>• Pipeta</li> <li>• Bureta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Colocar 5 ml de muestra en un Erlenmeyer de 250 ml.</li> <li>• Adicionar 100 ml de muestra estabilizada con EDTA.</li> <li>• Adicionar 1 ml de solución de almidón</li> <li>• Adicionar 5 ml de KI</li> <li>• Valorar con <math>\text{KIO}_3</math> hasta que aparezca un color azul.</li> </ul>	$\text{ppm SO}_4^{2-} = \frac{635 \cdot S}{B}$ <p>Dónde:  <b>ppm <math>\text{SO}_4^{2-}</math></b> = concentración de sulfatos            (S) = Volumen usado de <math>\text{KIO}_3</math>            (B) = Volumen usado de <math>\text{KIO}_3</math> con el blanco</p>

Fuente: METODO ASTM D-1339 C

2.2.4.2.12. Determinación del oxígeno disuelto

**TABLA 17-2: MODIFICACION DEL PERMANGANATO 4500 O.D.: DETERMINACION DEL OXIGENO DISUELTO**

Concepto	Materiales	Reactivos	Procedimiento	Cálculos
Los niveles de Oxígeno disuelto (OD) en aguas naturales y residuales dependen de la actividad física, química y bioquímica del sistema de aguas. El análisis de O.D. es una prueba clave en la contaminación del agua, y en el agua de calderas puede producir espuma, que arrastra a los sólidos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erlenmeyer de 250 ml</li> <li>• vaso de precipitación</li> <li>• Pipeta</li> <li>• Bureta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\text{KMnO}_4</math> diluido</li> <li>• Solución de oxalato de potasio <math>\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}</math></li> <li>• <math>\text{H}_2\text{SO}_4</math> Conc.</li> <li>• <math>\text{KMnO}_4</math></li> <li>• KF</li> </ul>	A 250 ml de muestra añadir 0.70 ml de $\text{H}_2\text{SO}_4$ Conc. 1 ml de $\text{KMnO}_4$ diluido y eliminar el color totalmente con $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ , luego añadir 1ml de $\text{MnSO}_4$ y 3 ml de reactivo álcali-yoduro-azida, tapar dejar precipitar, acidifique con $\text{H}_2\text{SO}_4$	Cuando se usan 0.7ml de ácido, 1 ml de $\text{KMnO}_4$ diluido, 1 ml de $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , 1 ml de $\text{MnSO}_4$ , y 3 ml de álcali yoduro azida( o un total de 6.7 ml de reactivos), tomese $200 \cdot 300 / (300 - 6.7) = 205$ ml para la titulación.

Fuente: STANDARD METHODS Edition 17

2.2.4.2.13. *Determinación de Hierro*

**TABLA 18-2: STANDARD METHODS 3500-FE –D: DETERMINACIÓN DE HIERRO**

Concepto	Materiales	Reactivos	Procedimiento	Cálculos
Es un constituyente inorgánico que está presente en las aguas de formación por lo tanto en los lodos provenientes de estas. El óxido de tubos de hierro o acero, también puede aumentar la concentración de materiales disueltos, así como la cantidad total de hierro.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erlenmeyer de 125 mL</li> <li>• Pipeta de 1mL</li> <li>• Piceta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cloruro de hidroxil-amina</li> <li>• Ácido clorhídrico conc.</li> <li>• Fenantrolina</li> <li>• Agua destilada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Colocar 50 mL de muestra en un erlenmeyer</li> <li>• Añadir 1 mL de Cloruro de hidroxil-amina</li> <li>• Añadir 2 mL de Ácido clorhídrico</li> <li>• Someter a reducción hasta un volumen de 15 a 20 mL</li> <li>• Dejar enfriar.</li> <li>• Añadir 8 mL de buffer pH 5.5</li> <li>• Añadir 2 mL de solución fenantrolina</li> <li>• Agregar 50 mL de la misma muestra</li> <li>• Dejar descansar por 15 minutos, medir en el fotómetro a 510 nm</li> </ul>	Lectura del espectrofotómetro.

Fuente: STANDARD METHODS 2550 edición 17

2.2.4.2.14. Determinación de fosfatos

**TABLA 19-2: DETERMINACIÓN DE FOSFATOS: METODO DEL MOLIBDATO DE AMONIO**

FUNDAMENTO	MATERIALES	TECNICA	CALCULO
<p>El fósforo se encuentra en las aguas naturales y aguas residuales casi exclusivamente como fosfato. Los fosfatos son muy usados en los sistemas de tratamiento de aguas municipales y privadas, y se agrupan comúnmente en tres tipos: Ortofosfatos, fosfatos condensados y fosfatos orgánicos</p>	<p>Balón de aforo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pipeta</li> <li>• Vaso de precipitación</li> <li>• Espectrofotómetro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tomar 25 ml de muestra</li> <li>• Diluir en un balón de aforo hasta 100 ml</li> <li>• Tomar 25 ml de esta dilución</li> <li>• Adicionar 1,45 ml de molibdato de amonio</li> <li>• Adicionar 1 ml de solución, 1 amino, 2 naptol, 4 sulfónico.</li> <li>• Permitir reposar 10 min.</li> <li>• Llevar a 50 ml con agua destilada</li> <li>• Realizar la lectura en el espectrofotómetro</li> <li>• Observar la absorbancia por muestra.</li> </ul>	$\text{ppm PO}_4 = \frac{\text{ppm observado} \times \text{valor}}{4}$ <p>Dónde: ppm PO<sub>4</sub> = concentración de fosfatos en ppm (mg / L)</p>

Fuente: STANDARD METHODS 2550 edition 17

2.2.4.2.15. *Determinación de sólidos totales disueltos*

**TABLA 20-2: STANDARD METHODS 2540-B: DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS**

Concepto	Materiales	Reactivos	Procedimiento	Cálculos
Los sólidos totales es la cantidad de materia disuelta en un volumen de agua. Se puede calcular tomando la suma de las concentraciones de todos los cationes y aniones indicados en la parte del análisis del agua o puede también ser medida evaporando una muestra de agua para secarla y posteriormente pesar sus residuos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caja petri</li> <li>• Pipeta 25 mL.</li> <li>• Baño maría.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pesar una caja petri</li> <li>• Colocar 25 mL de muestra en la caja</li> <li>• Someter a baño María hasta sequedad</li> <li>• Introducirla en la estufa</li> <li>• Colocarla en el desecador</li> <li>• Pesar</li> </ul>	Diferencia de pesos.

Fuente: STANDARD METHODS Edition 17

## **2.3. Datos Experimentales**

### **2.3.1. Diagnóstico**

El crecimiento en la pequeña y mediana industria de nuestro país, ha incrementado la demanda energética en el sector industrial, además de la competitividad y necesidad de implementación de mejores prácticas de manufactura, teniendo como consecuencia la necesidad de cumplimiento de normas técnicas más estrictas.

Es por estas razones que como estudiante de la Escuela de Ingeniería Química consciente de esta realidad, se vio la necesidad de realizar un estudio preliminar para la optimización del sistema de generación de vapor de mencionada quesera.

El caldero que genera el vapor necesario para la pasteurización en la quesera “El Nevadito”, se abastece actualmente de agua de la red pública, la cual posee una concentración alta de calcio y magnesio, y el único tratamiento que se le da al agua, es la adición de un anti incrustante a base de fosfatos, y sílice que ayuda a reducir las incrustaciones, aunque añade algunas características indeseables como una alcalinidad alta, y un aumento de sólidos en suspensión que no son buenos para el funcionamiento de la caldera ya que aumentan el peligro de corrosión caustica, además cuando se realiza este procedimiento es necesario llevar un adecuado nivel de purga, lo cual no posee este caldero, también se determinó por medio del análisis del agua el índice de Langelier el cual mostro que esta es un agua con tendencia muy corrosiva (ver anexo 5 ).

También en este caldero se tienen grandes pérdidas energéticas debido a la falta de aislamiento térmico de las tuberías de conducción de vapor y deterioro del existente en la caldera.

Las pérdidas de calor en la caldera se dan por medio de radiación y convección. Para determinar estas pérdidas se realizaron mediciones puntuales de la temperatura en la chapa exterior de la caldera, es decir de las paredes del sistema. Se utilizó para ello un termómetro digital de resistencia de platino. Además, se midió la concentración de carbono presente en los gases de combustión generados por el diesel utilizado para el funcionamiento del equipo. Esta medición de los gases de combustión es necesaria para conocer la eficiencia de combustión de la caldera.

### 2.3.2. Datos Experimentales

**TABLA 21-2: DATOS OPERATIVOS DEL CALDERO**

<b>DETERMINACIÓN</b>	<b>RESULTADO</b>	<b>UNIDAD</b>
Temperatura promedio de la carcasa de la Caldera	78	C
Temperatura Gases de Combustión a la entrada	466.4	C
Velocidad de los gases de combustión a la entrada	1.9	m/s
Temperatura Gases de Combustión a la salida	230.2	C
Presión del vapor de agua producido	30	PSI
Temperatura del agua de alimentación	19	C
Consumo de combustible de la caldera	1.1	gal/h

Fuente: Torres G.

**TABLA 22-2: CARACTERIZACIÓN FÍSICO- QUÍMICA DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN AL CALDERO**

	<b>Unidades</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>Grupo I</b>
<b>pH</b>	Unid.	6.68	6.66	6.68	6.67	6.66	6,67
<b>Color</b>	Und CoPt	20	20	20	20	20	20
<b>Conductividad</b>	μSiems/cm	175	176	176	176	177	176
<b>Turbiedad</b>	UNT	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1,0
<b>Cloruros</b>	mg/L	2.7	2.8	2.9	2.8	2.8	2,8
<b>Dureza</b>	mg/L	88.0	88.0	88.1	87.9	88.0	88,0
<b>Calcio</b>	mg/L	22.3	22.4	22.5	22.4	22.4	22,4
<b>Magnesio</b>	mg/L	7.7	7.8	7.9	7.8	7.8	7,8
<b>Alcalinidad</b>	mg/L	99.9	100.0	100.2	100.0	99.9	100,0
<b>Bicarbonatos</b>	mg/L	122.0	123.0	120.0	123.0	122.0	122,0
<b>Sulfatos</b>	mg/L	2.9	2.8	3.1	2.8	3.0	2,9
<b>Oxígeno Disuelto</b>	mg/L	5.1	5.1	5.0	5.3	5.2	5,1
<b>Temperatura</b>	C	21.3	21.1	21.1	21.1	21.1	21,2
<b>Hierro</b>	mg/L	0.018	0.018	0.015	0.017	0.017	0,017
<b>Fosfatos</b>	mg/L	1.427	1.428	1.430	1.427	1.428	1,428
<b>Sólidos Totales</b>	mg/L	139.0	140.0	142.0	139.0	140.0	140,0
<b>Sólidos Disueltos</b>	mg/L	108.8	108.9	109.1	108.9	108.8	108,9

Fuente: Laboratorio de análisis técnicos. Facultad de Ciencias.

**TABLA 23-2: CARACTERIZACIÓN FÍSICO- QUÍMICA DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN AL CALDERO**

	<b>Unidades</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>	<b>Grupo II</b>
<b>pH</b>	Unid.	6.61	6.62	6.61	6.63	6.62	6,62
<b>Color</b>	Und CoPt	31	31	27	30	31	30
<b>Conductividad</b>	μSiems/cm	64	64	62	65	63	64
<b>Turbiedad</b>	UNT	3.6	3.4	3.4	3.3	3.3	3,4
<b>Cloruros</b>	mg/L	5.7	5.6	5.7	5.9	5.6	5,7
<b>Dureza</b>	mg/L	55.9	55.9	55.9	56.2	56.1	56,0
<b>Calcio</b>	mg/L	12.8	12.8	12.6	13.0	12.7	12,8
<b>Magnesio</b>	mg/L	5.8	5.9	5.8	5.9	5.6	5,8
<b>Alcalinidad</b>	mg/L	40.0	39.9	40.0	40.1	39.9	40,0
<b>Bicarbonatos</b>	mg/L	48.8	48.9	48.8	48.9	48.6	48,8
<b>Sulfatos</b>	mg/L	0.6	0.5	0.6	0.5	0.8	0,6
<b>Oxígeno Disuelto</b>	mg/L	5.4	5.5	5.4	5.6	5.6	5,5
<b>Temperatura</b>	C	20.9	20.8	20.9	20.8	21.0	20,9
<b>Hierro</b>	mg/L	0.078	0.078	0.077	0.079	0.078	0,078
<b>Fosfatos</b>	mg/L	0.229	0.231	0.230	0.231	0.233	0,231
<b>Sólidos Totales</b>	mg/L	270.0	272.0	272.0	271.0	275.0	272,0
<b>Sólidos Disueltos</b>	mg/L	39.4	39.7	39.7	39.6	40.0	39,7

Fuente: Laboratorio de análisis técnicos. Facultad de Ciencias.

**TABLA 24-2: CARACTERIZACIÓN FÍSICO- QUÍMICA DEL AGUA DE PURGA DEL CALDERO**

	<b>Unidades</b>	<b>Valor Ref.</b>	<b>Resultado</b>
<b>pH</b>	Unid.	10-10,5	9,58
<b>Conductividad</b>	μSiems/cm	7000	1321
<b>Turbiedad</b>	UNT		83,1
<b>Cloruros</b>	mg/L		141,8
<b>Dureza</b>	mg/L	2	400,0
<b>Calcio</b>	mg/L		64,0
<b>Magnesio</b>	mg/L		58,3
<b>Alcalinidad</b>	mg/L	700	800,0
<b>Bicarbonatos</b>	mg/L		292,8
<b>Sulfatos</b>	mg/L		187,0
<b>Hierro</b>	mg/L	3	0,045
<b>Fosfatos</b>	mg/L	60	1,676
<b>Sólidos Totales</b>	mg/L		18168,0
<b>Sólidos Sedimentables</b>	mg/L	200	28000,0
<b>Sólidos disueltos</b>	Mg/L	3500	819,0

Fuente: Laboratorio de análisis técnicos. Facultad de Ciencias

## CAPITULO III

### 3. CÁLCULOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR

#### 3.1. Cálculos Para La Optimización Del Caldero

##### 3.1.1. Cálculo del coeficiente total de transferencia de calor.

###### 3.1.1.1. Cálculo de la densidad de la mezcla gaseosa

De la Ecuación 13 se tiene:

$$\rho_{mezcla\ 466,4} = \rho_{CO_2} * \% CO_2 + \rho_{H_2O} * \% H_2O + \rho_{O_2} * \% O_2 + \rho_{N_2} * \% N_2 + \rho_{SO_2} * \% SO_2$$

$$\rho_{mezcla\ 466,4} = 0,76(0,092) + 0,31(0,10) + 0,55(0,05) + 0,48(0,75) + 1,12(1*10^{-5}).$$

$$\rho_{mezcla\ 466,4} = 0,49\ kg/m^3$$

###### 3.1.1.2. Cálculo de la viscosidad ( $\mu$ )

De la ecuación 14:

$$\mu_{mezcla\ 466,4} = \mu_{CO_2} * \% CO_2 + \mu_{H_2O} * \% H_2O + \mu_{O_2} * \% O_2 + \mu_{N_2} * \% N_2 + C_p SO_2 * \% SO_2$$

$$\mu_{mezcla\ 466,4} = 3,076*10^{-5}(0,092) + 2,52*10^{-5}(0,10) + 3,68*10^{-5}(0,05) + 3,12*10^{-5}(0,75) + 2,82*10^{-5}(1*10^{-5}).$$

$$\mu_{mezcla\ 466,4} = 3,06*10^{-5}\ kg/m.s = 0,110\ kg/m.h$$

###### 3.1.1.3. Cálculo del calor específico de la mezcla

De la Ecuación 15:

$$C_{pmezcla\ 466,4} = C_{pCO_2} * \% CO_2 + C_{pH_2O} * \% H_2O + C_{pO_2} * \% O_2 + C_{pN_2} * \% N_2 + C_{pSO_2} * \% SO_2$$

$$C_{pmezcla\ 466,4} = 0,264(0,092) + 0,496(0,10) + 0,244(0,057) + 0,260(0,75) + 0,186(1*10^{-5})$$

$$C_{pmezcla\ 466,4} = 0,282\ Kcal/kg$$

#### 3.1.1.4. Cálculo del coeficiente de conductividad térmica

De la Ecuación 16

$$K_{\text{mezcla } 466,4} = K_{\text{CO}_2} * \% \text{CO}_2 + K_{\text{H}_2\text{O}} * \% \text{H}_2\text{O} + K_{\text{O}_2} * \% \text{O}_2 + K_{\text{N}_2} * \% \text{N}_2 + K_{\text{SO}_2} * \% \text{SO}_2$$

$$K_{\text{mezcla } 466,4} = 0,0416 (0,092) + 0,0507 (0,10) + 0,0479 (0,057) + 0,0438 (0,75) + 0,0232 (1 * 10^{-5})$$

$$K_{\text{mezcla } 466,4} = 0,044 \text{ kcal/m.h.C.}$$

Para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor, se tiene:

#### 3.1.1.5. Cálculo del Reynolds

De la Ec. 18:

$$v = 1,9 \text{ m/s}$$

$$D = 0,0267 \text{ m}$$

$$Re = \frac{v \cdot \delta \cdot D}{\mu}$$

$$Re = \frac{1,9 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{0,49 \text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,0267 \text{m}}{3,06 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot \text{s}}$$

$$Re = 812,34$$

#### 3.1.1.6. Cálculo del Prandtl

De la Ec.19

$$Pr = \frac{Cp \cdot \mu}{k}$$

$$Pr = \frac{0,282 \frac{kcal}{kg} * \frac{0,110kg}{m} \cdot h}{\frac{0,044kcal}{m \cdot h \cdot C}} = 0,7$$

### 3.1.1.7. Cálculo de Nusselt

En el caso de los gases, el Prandtl es prácticamente constante e igual a 0,7, de la ecuación 20 se tiene:

$$\begin{aligned} Nu &= 0,021 Re^{0.8} \\ Nu &= 0,021 (812,34)^{0.8} \\ Nu &= 0,021 (212.71) \\ Nu &= 4,47 \end{aligned}$$

### 3.1.1.8. Cálculo del coeficiente de convección referido a la superficie interna

De la Ec 20:

$$\begin{aligned} Nu &= h \frac{D}{k} \\ h &= \frac{Nu \cdot k}{D} \\ h_i &= \frac{4,47 \cdot 0,044 \frac{kcal}{m \cdot h \cdot C}}{0,0267 m} \end{aligned}$$

$$h_i = 7,37 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}$$

### 3.1.1.9. Cálculo del coeficiente de convección para el lado de agua

El caudal de agua para 20 minutos de operación es 19.6 L, de lo que se obtiene 0.98 L/min

$$0,98L/min = 1,63 * 10^{-5} \text{ m}^3/s$$

### Cálculo de la velocidad

De = 0.0334 m

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2}$$
$$v = \frac{4(1,63 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s})}{\pi (0,0334\text{m})^2}$$
$$v = 0,019 \text{ m/s}$$

### Cálculo del Reynolds

El agua se encuentra a 30 PSI (2,04 atm) y a una temperatura media de 70.1 C, a presiones diferentes de 1 atm, las propiedades del vapor de agua pueden estimarse así:

- ✓ Densidad a partir de volumen específico.
- ✓ Calor específico por la igualdad aproximada  $C_p = h / t$
- ✓ Viscosidad absoluta aumenta ligeramente con la presión, pero el aumento puede despreciarse en primera aproximación a presiones menores de 20 atm.
- ✓ Conductividad, se aplica lo mismo que la viscosidad.

De la Ec.5, se tiene:

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot D}{\mu}$$
$$Re = \frac{0,019 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 977,52 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,0334 \text{ m}}{0,407 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}}$$
$$Re = 1524,16$$

Fluido en el exterior de tubos

Para líquidos con  $Re > 200$  y gases ( $0,1 < Re < 1000$ ) Nusselt de la Ec. 8 se expresa como:

$$Nu = Pr^{0,3} (0,35 + 0,47 Re^{0,52})$$

**Cálculo del Prandtl, de la Ec. 6, se tiene**

$$Pr = \frac{Cp \cdot \mu}{k}$$

$$Pr = \frac{4,83 \frac{kcal}{kg \cdot C} \cdot 0,407 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{m \cdot s}}{1,61 \cdot 10^{-4} \frac{kcal}{m \cdot s \cdot C}}$$

$$Pr = 12,20$$

**Cálculo del Nusselt**

De la EC. 8, se tiene:

$$Nu = Pr^{0,3} (0,35 + 0,47 Re^{0,52})$$

$$Nu = (12,20)^{0,3} [ (0,35 + 0,47 (1524,16)^{0,52}) ]$$

$$Nu = (2,12) [ (0,35 + 0,47 (45,20)) ]$$

$$Nu = 78,58$$

**Cálculo del coeficiente de convección**

De la Ec. 10, se tiene:

$$Nu = h \frac{D}{k}$$

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D}$$

$$h = \frac{78,58 \cdot 0,580 \frac{kcal}{m \cdot h \cdot C}}{0,0334 m}$$

$$he = 1364,49 \frac{kcal}{m \cdot h \cdot C}$$

En la ecuación 22 referido al área de superficie interna será:

$$Ui = \frac{1}{\frac{1}{hi} + \frac{e}{km} \frac{Di}{Dm} + \frac{1}{he} \frac{Di}{De}}$$

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{7,37 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}}} + \frac{3,35 \cdot 10^{-3} \text{m}}{25 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{C}}} \frac{26,7 \text{ mm}}{30 \text{ mm}} + \frac{1}{1364,49 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}}} \frac{26,7 \text{ mm}}{33,4 \text{ mm}}}$$

$$U_i = \frac{1}{0,136 + 1,19 \cdot 10^{-4} + 1,06 \cdot 10^{-3}}$$

$$U_i = 7,28 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}}$$

Calculo del coeficiente integral de transmisión de calor referido al área de superficie externa, de la ecuación 21, se tiene:

$$U_e = \frac{1}{\frac{1}{h_i} \frac{D_e}{D_i} + \frac{e}{k_m} \frac{D_e}{D_m} + \frac{1}{h_e}}$$

$$U_e = \frac{1}{\frac{1}{7,37 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}}} \frac{33,4 \text{ mm}}{26,7 \text{ mm}} + \frac{3,35 \cdot 10^{-3} \text{m}}{25 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{C}}} \frac{33,4 \text{ mm}}{30 \text{ mm}} + \frac{1}{1364,49 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}}}}$$

$$U_e = \frac{1}{0,136 + 1,49 \cdot 10^{-4} + 7,33 \cdot 10^{-4}}$$

$$U_e = 7,30 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}}$$

### 3.1.2. Efecto de la incrustación sobre el coeficiente de transferencia de calor total

#### 3.1.2.1. Cálculo de las resistencias térmicas

De la Ec. 23, se tiene

$$De = 0,0334 \text{ m}$$

$$Di = 0,0267 \text{ m}$$

$$l = 0,60 \text{ m}$$

$$R = \frac{1}{h_i \cdot A_i} + \frac{R_{fi}}{A_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} + \frac{R_{fe}}{A_e} + \frac{1}{h_e \cdot A_e}$$

### 3.1.2.2. Cálculo del área interna, para cada tubo

De la ecuación 26, se tiene:

$$A_i = \pi \cdot D_i \cdot L$$

$$A_i = (0,0267 \text{ m}) \cdot 0,60 \text{ m}$$

$$A_i = 0,050 \text{ m}^2$$

### 3.1.2.3. Cálculo del área externa, para cada tubo

De la ecuación 27, se tiene:

$$A_e = \pi \cdot D_e \cdot L$$

$$A_e = (0,0334 \text{ m}) \cdot 0,60 \text{ m}$$

$$A_e = 0,063 \text{ m}^2$$

### 3.1.2.4. Cálculo de las resistencias térmicas

Teniendo en cuenta el factor de incrustación

$$R_{fi} \text{ gases de escape maquinas diesel, anexo IV} = 0,01 \text{ pie}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{F}/\text{BTU}$$

$$\text{BTU} = 0,2520 \text{ kcal}$$

$$\text{Pie}^2 = 0,0929 \text{ m}^2$$

$$C = 33,8 \text{ F}$$

$$k = 25 \text{ kcal/m} \cdot \text{h} \cdot \text{C}$$

$$R_{fe} = 0,0002 \text{ m}^2 \cdot \text{C}/\text{W} = 0,0002 \text{ m}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{h}/\text{kcal} \text{ (lado de agua)}$$

$$\frac{0,01 \text{ pie}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{F}}{\text{BTU}} \cdot \frac{0,2520 \text{ kcal}}{\text{BTU}} \cdot \frac{0,0929 \text{ m}^2}{\text{pie}^2} \cdot \frac{C}{33,8 \text{ F}} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{h}/\text{kcal}$$

$$R = \frac{1}{7,07 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}} \cdot 0,050 \text{ m}^2} + \frac{1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{h}/\text{kcal}}{0,050 \text{ m}^2} + \frac{\ln\left(\frac{33,4 \cdot 10^{-3}}{26,7 \cdot 10^{-3}}\right)}{2 \cdot \pi \left(25 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{C}}\right) 0,60 \text{ m}}$$

$$+ \frac{0,0002 \text{ m}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{h}/\text{kcal}}{0,063 \text{ m}^2} + \frac{1}{\frac{1364,49 \text{ kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}} \cdot 0,063 \text{ m}^2}$$

$$R = \frac{1}{0,403} + 2 \cdot 10^{-4} + \frac{0,228}{94,25} + 3,17 \cdot 10^{-3} + \frac{1}{85,96}$$

$$R = 2,71 + 2 \cdot 10^{-4} + 2,42 \cdot 10^{-3} + 3,17 \cdot 10^{-3} + 0,012$$

$$R = 2,72 \text{ C} \cdot \text{h}/\text{kcal}$$

### 3.1.2.5. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor total

Una vez conocida la resistencia térmica total producida por la incrustación, se determina un nuevo coeficiente de transferencia de calor total de la siguiente manera:

$$U_i = \frac{1}{R_{Ai}}$$

$$U_i = \frac{1}{(2,72 \text{ C} \cdot \text{h}/\text{kcal})(0,050 \text{ m}^2)}$$

$$U_i = 7,35 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}}$$

$$U_e = \frac{1}{R_{Ae}}$$

$$U_e = \frac{1}{\left(2,72 \frac{\text{C} \cdot \text{h}}{\text{kcal}}\right) (0,063 \text{ m}^2)}$$

$$U_e = \frac{5,84 \text{ kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{C}}$$

### 3.1.3. Cálculo de la media logarítmica de temperatura (LMTD)

De la Ec. 23, tenemos:

Temperatura de gases de salida = 230,2 C

Temperatura de gases de entrada = 466,4 C

Temperatura de agua a la entrada = 19 C

Temperatura de salida de vapor = 121,13 C

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

$$T_1 = T_{c.ent.} - T_{f.sal.}$$

$$T_2 = T_{c.sal.} - T_{f.ent.}$$

$$T_1 = T_{c.ent.} - T_{f.sal.}$$

$$T_1 = 466,4 \text{ C} - 121,13 \text{ C}$$

$$T_1 = 345,27 \text{ C}$$

$$T_2 = T_{c.sal.} - T_{f.ent.}$$

$$T_2 = 230,2 \text{ C} - 19 \text{ C}$$

$$T_2 = 211,2 \text{ C}$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{345,27 - 211,2}{\ln\left(\frac{345,27}{211,2}\right)}$$

$$\Delta T_{ml} = 273,61 \text{ C}$$

### 3.1.4. Cálculo de la capacidad de producción de la caldera

De la Ec. 25, tenemos:

$$15,7 * \text{HP de caldera (BHP)} = \text{kg/h Vapor}$$

$$15,7 * 3 \text{ HP} = 47,1 \text{ kg/h de vapor}$$

De la Ec. 26, tenemos:

$$8475,7 \frac{\text{kcal}}{\text{h.HP}} \times 3 \text{ HP} = 25427,1 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

### 3.1.4.1. Cálculo de la producción de vapor de caldera

Con la  $P_T = 30 \text{ Psi}$  y  $T_{aa} = 19 \text{ C}$  (Temperatura del agua de alimentación), en el Anexo I, se determina la masa de vapor producido por la caldera por cada BHP:

$$mv = 29,7 \frac{\text{lb}}{\text{h} \cdot \text{BHP}}$$

La masa de vapor total según la potencia de la caldera.

$$\begin{aligned} mvp &= mv \cdot \text{BHP} \\ mvp &= 29,7 \frac{\text{lb}}{\text{h} \cdot \text{BHP}} \times 3 \text{ BHP} \\ mvp &= 89,1 \frac{\text{lb}}{\text{h}} = 40,41 \text{ Kg/h} \end{aligned}$$

### 3.1.4.2. Cálculo del rendimiento de la caldera

De la Ec. 27, se tiene:

$$r = \frac{\text{entrega efectiva}}{\text{aportación}}$$

### Cálculo de vapor producido por kg de combustible

$$\frac{40,41 \text{ kg vapor}}{3,6 \text{ kg diesel}} = 11,22 \frac{\text{kg vapor}}{\text{kg diesel}}$$

### Cálculo del calor suministrado para transformar el agua en vapor:

De la Ec.26 se tiene:

$$\text{Calor suministrado} = 646,8 - 19,03 \text{ kcal/kg} = 627,8 \text{ kcal/kg}$$

### Cálculo de la entrega efectiva de la caldera

Entrega efectiva = vapor generado/kg de combustible \* calor suministrado.

$$\text{Entrega efectiva} = 11,22 \text{ kg /kg diesel} * 627,8 \text{ kcal/kg.}$$

Entrega efectiva = 7043,92 kcal/kg diesel

La aportación sería el poder calorífico del diesel (10526,8), de donde el rendimiento es:

$$r = \frac{7043,92}{10526,8}$$

$$r = 67 \%$$

### 3.1.5. Cálculo del calor perdido por los tubos de conducción de vapor

Es una tubería de hierro galvanizado, que conduce vapor saturado a 30 PSI a través de la sala de pasteurizado a 26 C, temperatura ambiente.

$$D = 6,03 \cdot 10^{-2} \text{ m.}$$

hierro galvanizado = 0,23

#### 3.1.5.1. Calor radiado al ambiente

De la Ec. 1.2.5.3-1, se tiene:

$$q_r/A = 4,92 \cdot \epsilon [ (T_1/100)^4 - (T_2/100)^4 ]$$

$$q_r = 4,92 \cdot 0,23 \cdot \pi \cdot 6,03 \cdot 10^{-2} \text{ m} (3,66^4 - 2,99^4)$$

$$q_r = 21,33 \text{ kcal/h}$$

#### 3.1.5.2. Calor transmitido por convección

De la Ec. 3, tenemos:

$$q_c = h_c \cdot A \cdot \Delta T$$

### Coefficiente de convección para tubos horizontales o verticales

$$h_c = 1,1 \left( \frac{\Delta T}{D} \right)^{0,25}$$

$$q_c = 1,1 \left( \frac{93 - 26}{6,03 \cdot 10^{-2}} \right)^{0,25} \cdot \pi \cdot 6,03 \cdot 10^{-2} (93 - 26)$$

$$q_c = 80,60 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

### Calor Total perdido por la tubería

$$Q_p = q_c + q_r$$

$$Q_p = 80,60 + 21,33 = 101,93 \text{ kcal/h}$$

#### 3.1.6. Cálculo del costo de producción de kilocalorías

Teniendo una entrega efectiva de:

$$7043,92 \frac{\text{kcal}}{\text{kg diesel}}$$

##### 3.1.6.1. Cálculo del costo en dólares de 700000 kilocalorías

$$7043,92 \frac{\text{kcal}}{\text{kg diesel}} \times \frac{3,6 \text{ kg diesel}}{1,1 \text{ glns diesel}} \times \frac{1 \text{ glns}}{1,03 \text{ dlrs}} = 22440,81 \frac{\text{kcal}}{\text{dlr}}$$

$$700000 \text{ kcal} \frac{\text{dlrs}}{22440,81 \text{ kcal}} = 31,19 \text{ dlrs}$$

#### 3.1.7. Cálculo del espesor óptimo del aislante

Para efectuar el aislamiento se dispone de dos opciones de aislantes, ambos para aplicarse en un espesor de 2 cm, con las demás características que se mencionan a continuación, y las temperaturas en ambas caras del aislante serán 93 C y 26 C.

Además se toma en cuenta un año laboral de 260 días, cada uno de 6 horas, y para el aislamiento se considera una duración de 15 años.

También se considera el costo de producción de las kilocalorías para lo cual se obtuvo un costo de 31.19 dólares la producción de 700000 kilocalorías, luego se realiza el cálculo de la siguiente forma:

#### Aislante A. Lana de vidrio

$$e = 0,02 \text{ m}$$

$$\text{Costo total} = \$ 6 \text{ m}^2$$

$$k = 0,34 \text{ kcal/m. h. C}$$

Calor transmitido a través del aislante A, denominando n número de planchas

$$q = \frac{\Delta T}{R} = \frac{93 - 26}{\frac{0,02}{0,34}n}$$
$$q = \frac{1135,6 \text{ kcal}}{n \text{ m}^2\text{h}}$$

Coste del calor perdido

$$\frac{1135,6}{n} \cdot 6 \cdot 260 = \frac{31,19 \text{ dlrs}}{70^5 \text{ kcal}}$$

$$q = \frac{78,93}{n} = \frac{\text{dlrs}}{\text{m}^2\text{año}}$$

Coste del material por año y  $\text{m}^2$

$$q = \frac{6}{15}n = \frac{\text{dlrs}}{\text{m}^2\text{año}}$$

Coste total

$$\frac{78,93}{n} + \frac{6}{15} = \frac{78,93}{n} + 0,4n$$

La variación del coste con el espesor será:

$$\frac{dc}{dn} = -\frac{78,93}{n^2} + 0,4$$

Para el costo mínimo  $\left(\frac{dc}{dn} = 0\right)$  resulta

$$n = \sqrt{\frac{78,93}{0,4}} = 14$$

$$\text{Espesor} = 14 \cdot 2 = 28 \text{ cm}$$

Coste total del aislante A

$$\frac{78.93}{n} + 0.4n = 5.64 + 5.6 = 11.24 \frac{\text{dlrs}}{\text{m}^2 \text{año}}$$

### Aislante B. Espuma de poliuretano

$$e = 0,02 \text{ m}$$

$$\text{Costo total} = \$ 8 \text{ m}^2$$

$$k = 0,034 \text{ kcal/m. h. C}$$

Calor transmitido a través del aislante b (espuma de poliuretano)

$$q = \frac{\Delta T}{R} = \frac{93 - 26}{\frac{0,02}{0,034} n}$$

$$q = \frac{113,6}{n} = \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{h}}$$

Coste del calor

$$q = \frac{113,6}{n} \cdot 6 \cdot 240 \frac{31,19}{70^4} = \frac{7,28 \text{ dlrs}}{n \text{ m}^2 \text{año}}$$

Coste del material

$$\frac{8}{15} n \frac{\text{dlrs}}{\text{m}^2 \text{año}} = 0,53n \frac{\text{dlrs}}{\text{m}^2 \text{año}}$$

Coste total

$$\frac{7,28}{n} + 0,53n$$

$$\frac{de}{dn} = -\frac{7,28}{n^2} + 0,53$$

$$n = \sqrt[2]{\frac{7,28}{0,53}} = 3,71 = 4$$

Espesor:

$$4 \cdot 2 = 8 \text{ cm}$$

Coste total del aislante B

$$\frac{7,28}{n} + 0,53 n = 1,82 + 2,12 = 3,94 \frac{\text{dlrs}}{\text{m}^2 \text{año}}$$

### 3.1.8. Cálculo del factor de vaporización

Para realizar los cálculos térmicos se trabaja con la presión de trabajo es:

$$P_T = 30 \text{ PSI}$$

Con los valores de  $P_T = 30 \text{ Psi}$ , en las tablas de vapor se obtiene el valor de:

$$H = 646,8 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

Y la entalpia del agua de alimentación

$$h = 19,03 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

Y la entalpia de vaporización a 100 C = 543,4 kcal/kg

De la Ec.37, se tiene:

$$F = \frac{(H - h)}{h_{fg}} = \frac{H - h}{543,4} = \frac{646,8 - 19,03}{543,4} = 1,2$$

#### 3.1.8.1. Cálculo de la vaporización equivalente

De la Ec. 38, tenemos:

$$ve = \frac{mvp(H - h)}{h_{fg}}$$

$$ve = \frac{40,41 \frac{kg}{h} (646,8kcal/kg - 19,03kcal/kg)}{543,4kcal/kg}$$

$$ve = 46,68 \text{ kg/h}$$

### 3.1.9. Cálculo del poder calorífico del diesel

**TABLA 25-3: PROPIEDADES DEL DIESEL**

<b>PROPIEDAD</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALOR</b>
Carbono (C)	% peso	86.5
Hidrogeno (H)	% peso	12.3
Oxigeno (O)	% peso	0.1
Azufre (S)	% peso	0.7
Agua (W)	% peso	0.1
Ceniza (Z)	% peso	0.01

**Fuente:** <http://www.energiaadebate.com/Articulos/Noviembre/SarmientoNov.htm>

De la Ecuación 11

$$Q_u = 8100C + 28500H + 2210S - 600W$$

$$Q_u = 8100 (0.865) + 28500 (0.123) + 2210 (0.007) - 600 (0.001)$$

$$Q_u = 10526,87 \frac{Kcal}{Kg}$$

### 3.1.10. Relación aire/combustible

Para la determinación de la relación aire/combustible (A/C), se utilizara la ecuación estequiométrica de combustión, teniendo en cuenta un 40% de exceso de aire:



Balance:

$$C: 12 = X$$

$$H_2: 26 = 2Y \longrightarrow Y = 13$$

$$O_2: 1,4 W = X + Y/2 + 0,4 W \longrightarrow 12 + 6,5 + 0,4W \longrightarrow (1,4 - 0,4) W = 18,5$$

$$W = 18,5$$

$$N_2 \longrightarrow (1,4 * 3,76) W = 97,38$$



$$A.C. = 123,284 kmol \frac{29 kg \text{ aire}}{1 kmol} = 3575,23 kg \frac{\text{aire}}{170 kg C_{12} H_{26}}$$

$$A/C = 21,03 \text{ kg de aire/kg combustible}$$

Moles totales: 129,78

$$X_{CO_2} = \frac{12}{129,78} = 9,24\%$$

$$X_{H_2O} = \frac{13}{129,78} = 10,21\%$$

$$X_{O_2} = \frac{7,4}{129,78} = 5,70\%$$

$$X_{N_2} = \frac{97,38}{129,78} = 75,03\%$$

### 3.1.11. Cálculo para la adición de reactivos

La eliminación de una determinada concentración de calcio ( $C_{Ca}$ ), se producirá con la siguiente cantidad de hidróxido cálcico ( $H_{Ca}$ ), según la ecuación 36:

$$H_{Ca} = \frac{C_{Ca} * 74}{40} = 1,85 C_{Ca}$$

$$H_{Ca} = \frac{17,6}{40} \frac{74}{84} = 32,56$$

Y según la ecuación 37

$$HC_{Mg} = \frac{C_{Mg} * (2 * 74)}{24,3} = 6,1 C_{Mg}$$

$$HC_{Mg} = \frac{6,8 (2 * 74)}{24,3} = 41,42$$

De la ecuación 38 puede obtenerse un valor aproximado para realizar la prueba del vaso mediante la siguiente expresión:

$$HC_T = HC_{Ca} + HC_{Mg} = 1,85 C_{Ca} + 6,1 C_{Mg}$$

$$HC_T = HC_{Ca} + HC_{Mg} = 32,56 + 41,42$$

$$HC_T = 73,98 \text{ mg/L de cal de aporte para el tratamiento}$$

### 3.1.11.1. Método de los pesos atómicos

Al asignar pesos atómicos en la reacción de carbonato sódico con cloruro cálcico la ecuación es la siguiente:



Si se utilizan 2 kg de carbonato sódico para tratar cloruro cálcico se obtendrían los pesos de la ecuación por la aplicación de la ecuación 39

$$P_{C_{tr}} = \frac{Pr_a(PaC_{tr})}{Pa r_a}$$

$$P(\text{CaCl}_2) = \frac{2(111,1)}{106}$$

$$P(\text{CaCl}_2) = 2,09 \text{ kg}$$

Lo que nos indica que para tratar 2.09 kg de  $\text{CaCl}_2$ , se adicionaría 2 kg de carbonato sódico. Y se obtienen los siguientes pesos de la ecuación.

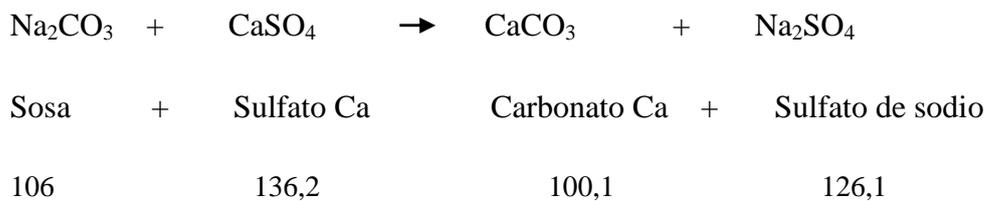
$$P(\text{CaCO}_3) = \frac{2(100,1)}{106}$$

$$P(\text{CaCO}_3) = 1,89 \text{ kg}$$

$$P(2\text{NaCl}) = \frac{2(117)}{106}$$

$$P(2\text{NaCl}) = 2,21 \text{ kg}$$

Y para la reacción del sulfato cálcico, asignando pesos moleculares a la reacción:



Si se usan 2 kg de carbonato sódico, se obtienen los siguientes pesos de la ecuación química cuando se utiliza el método de los pesos atómicos.

$$P(\text{CaSO}_4) = \frac{2(136,2)}{106}$$

$$P(\text{CaSO}_4) = 2,56 \text{ kg}$$

$$P(\text{CaCO}_3) = \frac{2(100,1)}{106}$$

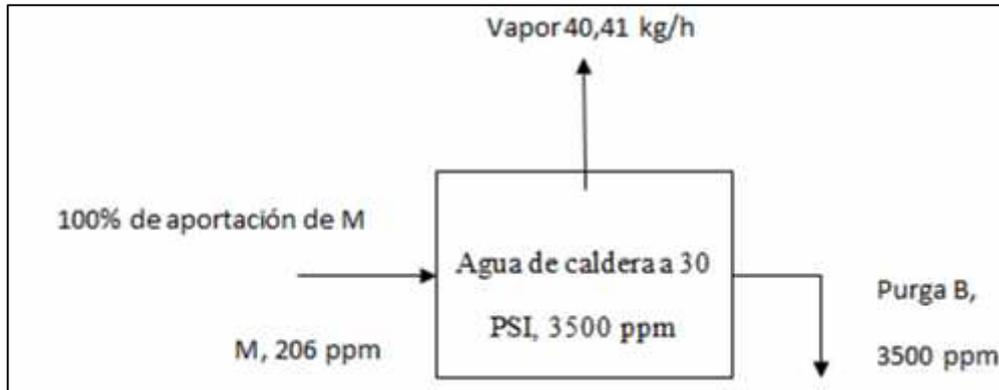
$$P(\text{CaCO}_3) = 1,89 \text{ kg}$$

$$P(\text{Na}_2\text{SO}_4) = \frac{2(126,1)}{106}$$

$$P(\text{Na}_2\text{SO}_4) = 2,38 \text{ kg}$$

### 3.1.12. Cálculo para el porcentaje requerido de purga

**FIGURA 3-3: DIAGRAMA DE LAYOUT PARA EL CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE PURGA**



Fuente: Torres, G.

Los límites recomendables para calderas de 0 a 300 PSI son 3500 ppm y para tratar de mantener estos niveles se calcula el nivel de purga necesario.

Llamaremos M al caudal de aportación en kg/h y B al caudal de purga en kg/h. Para mantener los sólidos a un nivel dado en calderas, la cantidad entrante con la aportación debe ser igual a la eliminada por la purga o sea:

$$206 M = 3500 B$$

$$B = \frac{206}{3500} M = 0,059 M = 5,9\% \text{ de } M$$

Para mantener a 3500 ppm de sólidos totales, el porcentaje de purga debe ser el 5.9% del caudal de aportación

Al 100% de aportación, agua de alimentación = aportación = caudal M

$$\text{Caudal de agua de alimentación} = 40.41 + \text{purga}$$

$$M = 40,41 + 0,059 M$$

$$0,941 M = 40,41$$

$$M = \frac{40,41}{0,941} = 42,94 \frac{kg}{h}$$

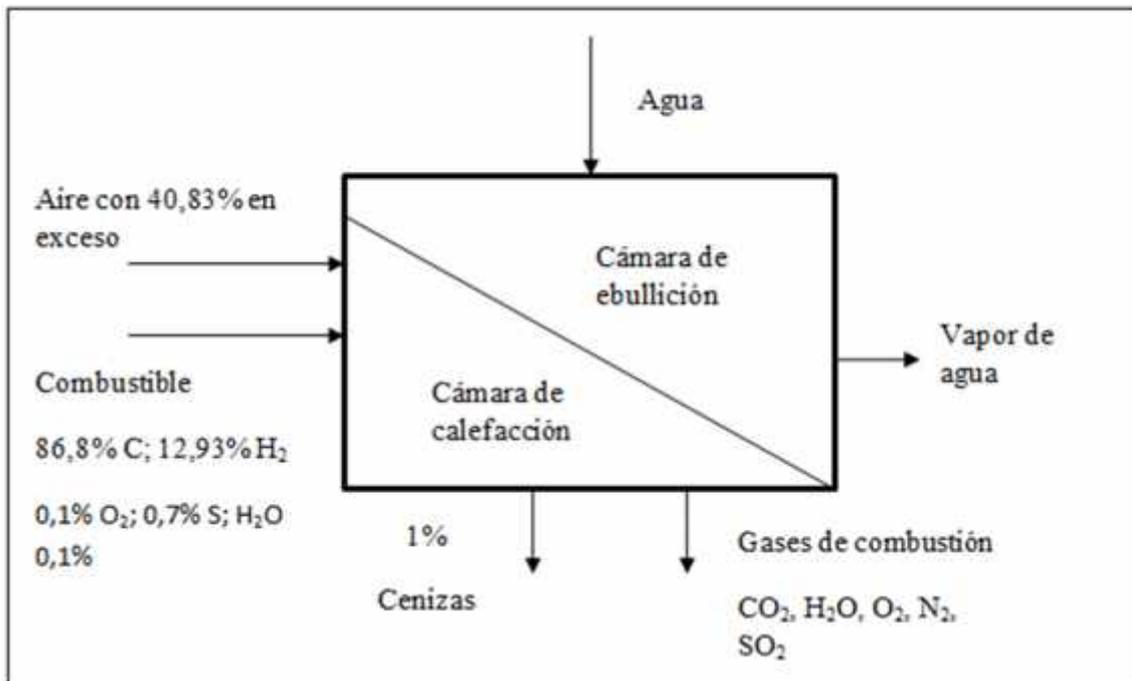
$$B = 0,059 \text{ M}$$

$$B = 0,059 (42,94) = 2,53 \text{ kg/h}$$

Para una aportación de 42,94 kg/h se debe tener un caudal de purga de 2,53 kg/h para mantener en una concentración aceptable los sólidos en el agua de caldera.

### 3.1.13. Balance de masa

**FIGURA 4-3: DIAGRAMA REPRESENTATIVO DE LA CALDERA PARA EL BALANCE DE MASA**



Fuente: Torres, G.

#### 3.1.13.1. Balance de Másico de la reacción de combustión

Se realiza el cálculo para una combustión completa de **1,1 glns/h** que son **3,6 kg/h** de combustible (diesel).

#### 3.1.13.2. Cálculo para el dióxido de carbono emitido

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

$$CO_2 = \frac{0,868 \text{ kg C}}{\text{kg comb}} * \frac{44 \text{ kg } CO_2}{12 \text{ kg C}} = 3,18 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{kg comb.}}$$

$$3,6 \text{ kg comb} \frac{3,18 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kg comb}} = 11,45 \text{ kg CO}_2$$

Se produce 11,45 Kg de CO<sub>2</sub> por cada 3,6 Kg de diesel que contiene 86.8% de carbono.

### 3.1.13.3. Cálculo para el agua producida



$$\text{H}_2\text{O} = 0,001 \text{ kg H}_2\text{O} + \frac{0,123 \text{ kg H}_2}{1 \text{ kg comb}} * \frac{36 \text{ kg H}_2\text{O}}{4 \text{ kg H}_2} = 1,12 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg comb.}}$$

$$3,6 \text{ kg comb} \frac{1,12 \text{ kg H}_2\text{O}}{1 \text{ kg comb}} = 4,03 \text{ kg H}_2\text{O}$$

Se produce 4,03 Kg de agua a partir de 0,123 Kg de Hidrógeno y 0.001 kg de agua en el combustible.

### 3.1.13.4. Cálculo para el SO<sub>2</sub> producido



$$\text{SO}_2 = \frac{0,007 \text{ kg S}}{1 \text{ kg comb}} * \frac{64 \text{ kg SO}_2}{32 \text{ kg S}} = 0,014 \frac{\text{kg SO}_2}{\text{kg comb.}}$$

$$3,6 \text{ kg comb} \frac{0,014 \text{ kg SO}_2}{1 \text{ kg comb}} = 0,050 \text{ kg SO}_2$$

Se produce 0,050 kg de SO<sub>2</sub> a partir de 0,007 kg de azufre presente en el combustible.

### 3.1.13.5. Cálculo de oxígeno consumido en la reacción

$$\begin{aligned} \text{O}_2 &= 0,868 \text{ kg C} * \frac{32 \text{ kg O}_2}{12 \text{ kg C}} + 0,123 \text{ kg de H}_2 * \frac{32 \text{ kg O}_2}{4 \text{ kg H}_2} + 0,007 \text{ kg S} \frac{32 \text{ kg O}_2}{32 \text{ kg S}} \\ &= 3,31 \frac{\text{kg O}_2}{\text{kg comb.}} \end{aligned}$$

O<sub>2</sub> consumido para el CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> consumido para el H<sub>2</sub>O + O<sub>2</sub> consumido para el SO<sub>2</sub>

3.1.13.6. *Balace de Masa en la Cámara de Ebullición*

$$F = V_{H_2O}$$

*Alimentación = Vapor generado*

3.1.13.7. *Cálculo del flujo de alimentación*

A una T<sub>aa</sub> = 19 C, por tablas de las propiedades físico-químicas del agua, hallamos en anexo III = 0,9984 Kg/L.

El volumen de agua utilizado es 19,6 L, para un proceso de 20 min, teniendo en cuenta que la proporción de agua es 70/30, se tendría 19,6 (0.70) = 13.72

$$F = \frac{13,72 L}{20 min} \times \frac{0,998 Kg}{L} \times \frac{60 min}{h} = 41,08 \frac{Kg agua}{h}$$

3.1.13.8. *Cálculo del flujo de vapor generado*

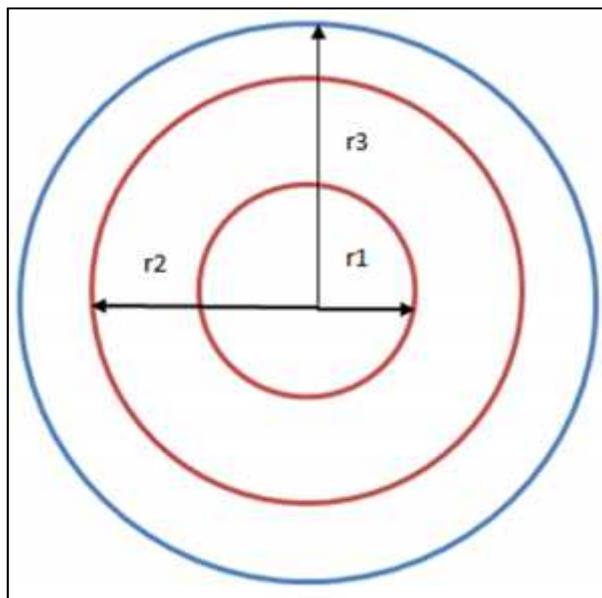
A una T<sub>aa</sub> = 19 C y P<sub>T</sub> = 30 PSI, mediante el uso del diagrama de las capacidades de las calderas se obtiene:

$$mvp = 40,41 \frac{Kg}{h}$$

3.1.14. *Balace de Energía*

**Tipología de la Transferencia de Calor**

**FIGURA 5-3: REPRESENTACIÓN DE LA TIPOLOGÍA DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR**



Fuente: Torres, G.

## Ecuación térmica de Equilibrio

$$Q_{E\ sistema} = Q_{V\ SAT.} + \Sigma P_{calor}$$

### 3.1.14.1. Cálculo del calor entregado por el combustible al sistema.

Para el balance tomamos como base de cálculo 1.1 galones de diesel por hora, que son 3,6 kg de diesel hora, el poder calorífico, designado por  $Q_u$ .

$$Q_{E\ sistema} = n_{diesel} \times Q_{u_{diesel}}$$
$$Q_{E\ sistema} = 3,6 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times 10526,87 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}}$$
$$Q_{E\ sistema} = 37896,73 \text{ Kcal/h}$$

### 3.1.15. Cálculo del calor aportado al agua

Por el balance de masa en el calderín, se calculó que se tiene una masa de agua de 41.08 kg/h, que se tomarán como la masa de agua que se suministrará el calor, o el calor que arrastra el vapor saturado:

$$Q_T = Q_S + Q_L$$

#### 3.1.15.1. Cálculo del calor sensible

$$m = 41,08 \text{ kg/h}$$

$$Q_S = m \cdot C_p \cdot T$$

$$Q_S = 41,08 \text{ kg/h} \cdot 1,001 \text{ kcal/kg} \cdot \text{C} (121,13 - 19 \text{ C})$$

$$Q_S = 4199,7 \text{ kcal/h}$$

#### 3.1.15.2. Cálculo del calor latente

$$Q_{LV\ agua\ a\ 121,13\ C\ (T\ de\ saturación)} = 526,7 \text{ kcal/kg}$$

$$Q_L = m \cdot Q_{LV}$$

$$Q_L = 41,08 \text{ kg/h} \cdot 526,7 \text{ kcal/kg}$$

$$Q_L = 21636,83 \text{ kcal/h}$$

$$Q_T = Q_S + Q_L$$

$$Q_T = 4199,7 + 21636,83 = 25836,53 \text{ kcal/h}$$

$$Q_{\text{vsat}} = Q_T = 25836,53 \text{ kcal/h}$$

### 3.1.16. Cálculo de las pérdidas

$$\Sigma P_{\text{calor}} = Q_{E \text{ sistema.}} - Q_{V \text{ SAT}}$$

$$\Sigma P_{\text{calor}} = 37896,73 \text{ Kcal/h} - 25836,53 \text{ Kcal/h}$$

$$\Sigma P_{\text{calor}} = 12060,2 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

#### 3.1.16.1. Cálculo del flujo de calor (perdida en la carcasa)

La carcasa está fabricada de acero inoxidable de 1,5 mm de espesor según tablas (anexo VII), y cubierta por material aislante de lana de vidrio de 5 cm de espesor, y al final otra capa de acero inoxidable de 1.5 mm de espesor, con un diámetro externo de 1 m, y diámetro interno de 0.9485 m, con lo que se puede calcular la cantidad de calor perdido por hora y metro cuadrado, considerándolo como un conducto cilíndrico:

$$K_{\text{acero}} = 25 \text{ kcal/m. h. C}$$

$$k \text{ (fibra de vidrio)} = 0,34 \text{ kcal/m. h. C}$$

$$e \text{ (fibra de vidrio)} = 0,05 \text{ m.}$$

#### Cálculo de las áreas de transferencia

$$A = \pi \frac{A_2 - A_1}{2,303 \log(A_2/A_1)}$$

$$A_1 = \pi \frac{0,9985 - 0,9485}{2,303 \log\left(\frac{1}{0,9485}\right)}$$

$$A_1 = \pi \frac{0,05}{2,303 \log(0,022)}$$

$$A_1 = 3,021 \text{ m}^2$$

$$A_2 = \pi \frac{1 - 0.9985}{2,303 \log\left(\frac{1}{0,9985}\right)}$$

$$A_2 = \pi \frac{0,0015}{2,303 \log(8,7^{-4})}$$

$$A_2 = 2,36 \text{ m}^2$$

### Cálculo de la resistencia al paso de calor

$$R = \frac{e}{k \cdot A}$$

$$R_1 = \frac{0,05}{0,34 \cdot 3,021}$$

$$R_1 = 0,049 \text{ C. h/kcal}$$

$$R_2 = \frac{0,0015}{25 \cdot 2,36}$$

$$R_2 = 2,54 \cdot 10^{-5} \text{ C. h/kcal}$$

$$R = 0,049 \text{ C. h/kcal}$$

### Cálculo del calor perdido por la carcasa

Se asume una temperatura de la cara interior la temperatura de los gases de combustión de 466.4 C y un promedio de la temperatura exterior en diferentes puntos de la carcasa de 78 C.

$$q = \frac{\Delta T}{\Sigma R}$$

$$q = \frac{466,4 - 78}{0,049}$$

$$q = 7926,53 \text{ kcal/h}$$

Valor que al relacionarlo con la sumatoria de las perdidas, obtenemos una diferencia de 4133.6 kcal/h que se interpreta como la perdida tanto en el intercambio de calor de los fluidos, y como en un arrastre de los gases de combustión a la salida ya que su temperatura es alta, al salir por la chimenea.

### 3.1.17. Cálculo de la calidad del vapor generado

$$x = \frac{m_{vapor}}{m_{liquido} + m_{vapor}}$$

Para una masa contenida en la caja de agua de 19,6 kg de agua y una relación agua/vapor correspondiente 70% de líquido saturado 30 % de vapor saturado, donde se tiene:

$$19,6(70 \%) = 13,72 \text{ kg} \quad \text{Líquido saturado}$$

$$19,6(30 \%) = 5,88 \text{ kg} \quad \text{Vapor saturado}$$

De donde se calcula el título de vapor:

$$x = \frac{5,88}{13,72 + 5,88}$$

$$x = 0,30$$

### 3.2.Resultados

**TABLA 26-3: RESULTADOS ANALÍTICOS DE GASES DE COMBUSTIÓN**

Parámetros	Unidad	Resultado
SO <sub>2</sub>	ppm	10
NO <sub>x</sub>	ppm	61
NO	ppm	61
NO <sub>2</sub>	ppm	0,1
CO	ppm	9
CO <sub>2</sub>	ppm	108000
O <sub>2</sub>	ppm	64300

Fuente: Centro de servicios técnicos y transferencia tecnológica ambiental

**TABLA 27-3: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL CALDERO**

PARÁMETRO	VALOR
Potencia del caldero (BHP)	3
Presión de Diseño (PSI)	60
Presión de Trabajo (PSI)	30
Masa de Vapor/hora (Kg/h)	40,41
Temperatura de Entrada de Agua (C)	19
Temperatura de Salida del vapor de Agua (C)	121,13
Temperatura Inicial de los Gases de Combustión (C)	466,4
Temperatura de Salida de los Gases de Combustión (C)	230,17
Número de Tubos	20
Altura de los Tubos (m)	0,85
Diámetro interno de los Tubos (m)	0,0267
Diámetro externo de los Tubos (m)	0,0334
Velocidad de los gases de escape (m/s)	1,9
Cantidad de agua necesaria para 20 min (L)	19,6

**Realizado por:** Torres G.

### 3.3. Análisis y Discusión de Resultados

- Al obtener del cálculo correspondiente una resistencia de 2,72 C.h/kcal, el 0,12 % de la resistencia térmica total, supuesta en cada tubo, lo que para los 20 tubos que conforman el calderín sería de 2,4%, que es una resistencia alta debida a incrustaciones que provoca una falta de tratamiento del agua de alimentación.
- Hay que notar que al obtener un  $U_i = 7,35$  y  $U_e = 5,84$  kcal/m<sup>2</sup>.h.C, difieren de forma significativa (en 21 %), debido a la diferencia considerable entre las áreas superficiales de transferencia de calor en el interior y exterior del tubo influenciada también por la resistencia que provoca las incrustaciones.
- Al calcular el espesor óptimo del aislante, resulta más conveniente el aislante B (espuma de poliuretano) que tiene un costo de 3.94 dlrs/m<sup>2</sup>.año, en relación a los 11.24 dlrs/m<sup>2</sup>.año, no solo por lo económico sino también por su duración, baja conductividad y facilidad de instalación.
- El agua que abastece al caldero de la quesera “El Nevadito” proviene de la red de consumo local, la cual a su vez proviene de origen subterráneo, por lo cual presenta un alto valor de dureza de alrededor de 72 ppm, y como se muestra en la tabla de valores óptimos para el agua de alimentación de caldero debe tener un valor menor de 2 ppm, es necesario un pretatamiento y tratamiento interno del agua de caldera, lo cual permitirá alargar la vida útil de esta.
- La producción del caldero luego de los cálculos realizados es de 40,41 Kg/h de vapor, y también se determina que tiene una eficiencia del 67 %, valor no muy óptimo de eficiencia, puesto que existen perdidas, no solo por la carcasa del caldero sino también en la transferencia de calor entre los tubos y se aprovecharía mejor la transferencia de calor teniendo un economizador que precaliente el agua de alimentación, al igual que se aumentaría la eficiencia del equipo mejorando la calidad del agua para tener un vapor de mejor calidad.

### 3.4.Propuesta

- Se propone para el ablandamiento del agua de abastecimiento a la caldera realizar un tratamiento en frío con cal  $Ca(OH)_2$  para la dureza temporal de bicarbonatos de calcio y magnesio, lo cual reduciría la dureza temporal, formando un lodo que puede ser eliminado por sedimentación y filtración.

- Y para la dureza permanente o de sulfatos y cloruros que forma una incrustación dura, la adición de sosa (carbonato sódico  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), que forma un lodo que precipita fuera de la solución, este lodo es altamente soluble y no forma incrustaciones. Estos métodos son tomados en cuenta por ser los más económicos, ya que sería mejor utilizar los métodos actuales y más completos de ablandamiento de agua, como un tratamiento por ablandador de membranas, pero requieren una alta inversión.
- Para mantener en niveles óptimos los sólidos en la caldera, y por consiguiente su conductividad y evitar el espumado, aumentar el nivel de purga, tanto superficial como de fondo a los niveles calculados por 42,94 kg/h de alimentación se tenga 2,53 kg/h de purga.
- Para reducir la pérdida de calor por la carcasa de la caldera que en este momento es alta, 7926,53 kcal/h, se propone cambiar el aislamiento térmico, que se encuentra deteriorado, por un aislamiento nuevo de fibra de vidrio o de espuma de poliuretano, que en los cálculos correspondientes es el más factible económicamente y por su duración.
- Reemplazar los tubos de conducción de vapor por tubos de acero inoxidable, que actualmente son de hierro galvanizado, que pierden la capa de galvanizado a los 60 C, y se oxidan, además aislarlos para reducir la pérdida de calor actual de 101,93 kcal/h, aproximadamente en un 15%.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES.

- Mediante la toma de datos y el análisis físico-químico del agua de alimentación del caldero se determinó las variables que intervienen directamente en la producción de vapor, como: Temperatura del agua de alimentación 19 C, Presión de trabajo 30 PSI, Producción de vapor en las condiciones de trabajo 40,41 kg/h, Temperatura de vapor saturado 121,13 C, Índice de Langelier -1.5.
- Se comprobó que las variables de proceso son determinantes para el funcionamiento del sistema de generación de vapor y que la variación extrema de una modificará el rendimiento del caldero.
- La caracterización físico – química del agua de alimentación, manifestó que la misma tiene una tendencia muy corrosiva teniendo en cuenta el índice de Langelier de -1.5, esto indica que es altamente perjudicial para los componentes del sistema de generación de vapor debido a que afecta directamente su rendimiento.
- Luego de realizar los cálculos respectivos para el coeficiente de transferencia de calor, el coeficiente de incrustación y además de las pérdidas de calor por conducción, convección y radiación todos referentes a la eficiencia del caldero se estableció que el mismo tiene una eficiencia del 67%, el cual no es óptimo pero si es aceptable para el proceso de pasteurización.
- La optimización del sistema de generación de vapor consistirá en un tratamiento previo del agua de alimentación para disminuir su alta corrosividad, seguido de la adición de 4.44 g de cal y el cambio del aislamiento de la carcasa del caldero y de la implementación del aislamiento en las tuberías de conducción de vapor del sistema.

## **RECOMENDACIONES.**

El lograr una operación óptima del sistema de generación de vapor depende mayormente de las acciones preventivas, por lo que es importante tomar en cuenta las siguientes recomendaciones para la operación:

- Realizar una inspección visual de sus componentes y partes antes de iniciar la operación de la caldera, así como conexiones eléctricas, agua de alimentación, combustible, lo cual permitirá garantizar un correcto arranque y un seguro y óptimo funcionamiento.
- Reducir las pérdidas de energía actuales, que son altas, tanto por el caldero, debido a la condición de su aislamiento, como por las tuberías que conducen el vapor al pasteurizador que al no estar aisladas tienen pérdidas de calor.
- Se propone como medida anticorrosiva la adición de sustancias básicas, como hidróxido de calcio y carbonato sódico (sosa), en las concentraciones óptimas calculadas.
- Implementar un pre tratamiento y tratamiento interno del agua de caldera, así como aumentar el nivel de purga.
- Reemplazar las tuberías que muestran corrosión, ya que son de hierro galvanizado, que como ya fue mencionado, pierde su película protectora al alcanzar una temperatura mayor a 70 C.
- Prevenir las incrustaciones que además de actuar como aislante reduciendo la transferencia de calor, generan peligro de rotura de los tubos por sobrecalentamiento.
- Procurar la mejor combustión, manteniendo los quemadores bien ajustados para una relación óptima del aire/combustible, con el exceso de aire apenas necesario.
- Implementar un nivel de purga adecuado para evitar los arrastres y espumado que significan pérdida de calor.
- Aislar el caldero de las condiciones ambientales, aislando el cuarto del caldero, recomendablemente no de una forma hermética, pero si para protegerlo del agua y del polvo que de otra forma dañarían la carcasa y el aislamiento térmico, provocando pérdidas y peligro en el funcionamiento, ya que el aislamiento mantiene la temperatura del caldero para la operación.

## **BIBLIOGRAFIA**

### **AGUA DE ALIMENTACIÓN PARA CALDERAS.**

Calderas de vapor. 2012. [http:// www.calderasvapor.com/agua\\_calderas](http://www.calderasvapor.com/agua_calderas).  
2013-04-06.

### **ANÁLISIS REGIONAL DE PRODUCCIÓN DE LÁCTEOS Y DERIVADOS.**

Consejo Consultivo de la leche. MINISTERIO DE AGRICULTURA GANADERÍA ACUACULTURA Y PESCA DEL ECUADOR. 2012.  
<http://www.pavasquez@mag.gov.ecMAG/> Consejo Consultivo de Leche y derivados.  
2013-03-20.

**CENGEL, A.**, Transferencia de calor y masa un enfoque práctico., Tomo I., 2ª ed., México., Mc Graw-Hill., 2007 Pp. 397-405.

**DEL ARCO, V.**, Termotecnia: calor industrial., Madrid: Mitre, 1984., Pp., 233-252, 260-285.

### **GENERACIÓN DE VAPOR. FENOSA (Generación de gas natural).** 2013

<http://www.empresaeiciente.com/es/catalogo-de-tecnologias/generacion-de-vapor>.  
2013-03-27.

### **HISTORIA DE LA CALDERA.** Construsur Argentina. 2013.

<http://www.sistemascalefaccion.com/calderas/vapor.html>.  
2013-03-11.

### **ÍNDICES DE LANGELIER, RYZNAR Y PUCKORIUS.** Construsur Argentina. 2013.

<http://www.construsur.com.ar/News-sid-93-file-article-pageid-2.html>.  
2013-04-11.

**KOHAN, A.**, Manual de Calderas., 4a ed., México., Mc Graw Hill., 2000., Pp. 10-20, 47-119, 410-414, 530-551, 560-563.

OCÓN, J. TOJO, G., Operaciones Básicas., Tomo I., 2a ed., Madrid Aguilar., 1992.  
Pp. 68-98.

**PARTES DE LA CALDERA.** Estructplan Consultora S.A. Argentina. 2013.  
<http://www.estructplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=2953>.  
2013-04-05.

**PRODUCCIÓN DE LÁCTEOS.** PSICOFXP S.A. Miembro del IAB Argentina.  
2013  
<http://www.psicofxp.com/forums/gastronomia.172/884-como-preparar-queso.html>.  
2013-03-18.

**SEVERNS, W. DEGLER, H.,** La producción de energía mediante vapor, aire o gas.,  
Tomo I., 2ª ed., Madrid., Reverté., 1974 Pp. 140-149.

**SPIRAX-SARCO.,** Manual de referencia técnica., Argentina., 1999., Pp. 13-26.

**TRATAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DE AGUA PARA CALDERAS.**  
Quiminet Comunidad Andina. 2006.  
<http://www.quiminet.com/articulos/el-acondicionamiento-de-aguas-8284.html>  
2013-04-09

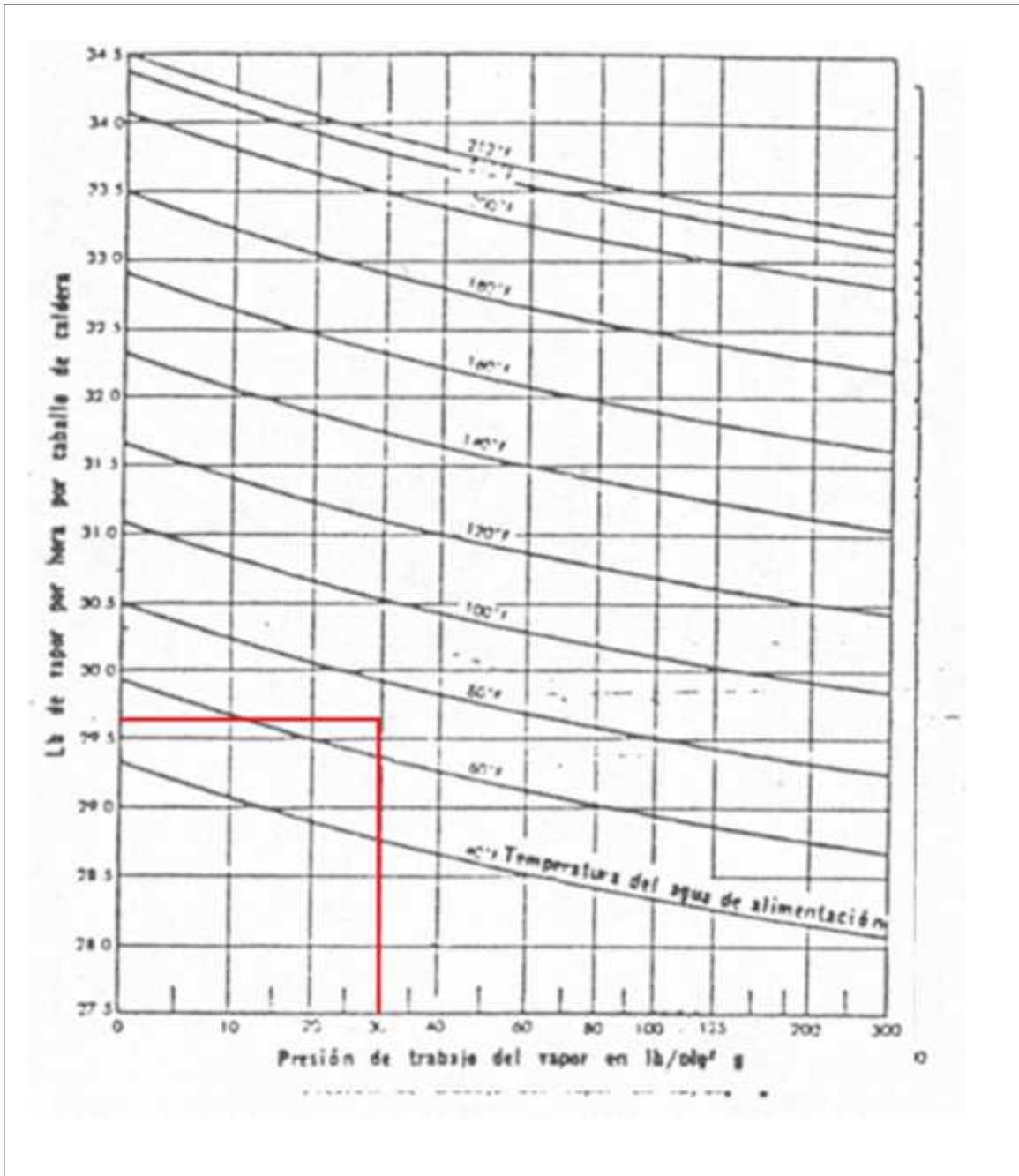
# ANEXOS

## ANEXO 1: PROPIEDADES DE LOS GASES

	T °C	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$C_p$ J/kg K	$\mu \times 10^6$ kg/m s	$k \times 10^3$ W/m K
Aire	0	1.293	1015	17.2	24.4
	20	1.205	1015	18.1	25.9
	100	0.946	1019	21.9	31.1
	200	0.745	1019	25.8	39.2
	300	0.613	1046	29.5	46.0
	400	0.526	1069	33.7	52.0
	500	0.456	1083	36.2	57.4
N <sub>2</sub>	1000	0.277	1185	49.0	80.7
	0	1.250	1030	16.7	24.3
	100	0.916	1054	20.7	31.5
	500	0.442	1115	33.9	55.8
O <sub>2</sub>	1000	0.268	1191	47.4	71.1
	0	1.429	915	19.4	24.7
	100	1.050	954	24.1	32.9
	300	0.504	1047	40.0	61.3
CO	1000	0.306	1122	36.5	85.8
	0	1.250	1038	16.6	23.2
	100	0.916	1045	20.7	30.1
	500	0.442	1130	34.4	54.1
CO <sub>2</sub>	1000	0.268	1231	48.7	80.6
	0	1.977	816	14.0	14.6
	100	1.447	915	18.2	22.8
	500	0.698	1156	33.9	54.9
SO <sub>2</sub>	1000	0.423	1290	31.5	86.1
	0	2.926	607	12.1	8.4
	100	2.140	662	18.1	11.1
	500	1.033	878	31.3	30.7
Gases de chimeneas	1000	0.426	887	49.2	57.6
	0	1.295	1045	15.8	22.8
	100	0.950	1068	20.4	31.3
	500	0.457	1185	34.8	65.6
H <sub>2</sub>	1000	0.275	1396	48.5	109.0
	0	0.0899	14070	8.4	171.1
	100	0.0697	14480	10.3	219.8
	500	0.0317	14660	16.8	387.3
NH <sub>3</sub>	1000	0.0192	15520	23.7	571.0
	0	0.771	2043	9.4	21.0
	100	0.564	2219	13.0	34.0
	500	0.272	2918	28.1	103.6
Vapor de agua	1000	0.165	3710	47.9	222.1
	100	0.598	1135	12.0	23.7
	500	0.284	1135	28.6	68.4
	1000	0.172	2483	52.4	140.7

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO  FACULTAD DE CIENCIAS  ESCUELA DE ING. QUÍMICA  GALO A. TORRES V.	Propiedades de los gases		
	Certificado Por Aprobar Aprobado	Por eliminar Por informar Por calificar		FECHA	LAMIN A	ESCALA
				19/12/2014	01	1:1

## ANEXO 2: CAPACIDAD DE LAS CALDERAS



NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO  FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUÍMICA  GALO A. TORRES V.	Capacidad de las calderas		
	Certificado	Por eliminar		FECHA	LAMINA	ESCALA
	Por Aprobar	Por informar		19/12/2014	02	1:1
	Aprobado	Por calificar				

**ANEXO 3: PROPIEDADES DEL VAPOR DE AGUA SATURADO**

Temperatura de saturación °C <i>t</i>	Presión de saturación Kg/cm <sup>2</sup> <i>p</i>	Volumen específico		Entropía Kcal/Kg·°K		Entalpía Kcal/Kg	
		Del líquido dm <sup>3</sup> /Kg <i>v'</i>	Del vapor m <sup>3</sup> /Kg <i>v''</i>	Del líquido <i>s'</i>	Del vapor <i>s''</i>	Del líquido <i>h'</i>	Del vapor <i>h''</i>
0	0,006228	1,0002	206,3	0	2,1863	0	597,2
5	0,008890	1,0000	147,2	0,0182	2,1551	5,03	599,4
10	0,012513	1,0004	106,4	0,0361	2,1253	10,04	601,6
15	0,017376	1,0010	77,99	0,0536	2,0970	15,04	603,8
20	0,02383	1,0018	57,84	0,0708	2,0697	20,03	606,0
25	0,03229	1,0030	43,41	0,0876	2,0436	25,02	608,2
30	0,04325	1,0044	32,93	0,1042	2,0187	30,00	610,4
35	0,05733	1,0061	25,25	0,1205	1,9947	34,99	612,5
40	0,07520	1,0079	19,55	0,1366	1,9718	39,98	614,7
45	0,09771	1,0099	15,28	0,1524	1,9498	44,96	616,8
50	0,12578	1,0121	12,05	0,1679	1,9287	49,95	619,0
55	0,16051	1,0145	9,584	0,1833	1,9085	54,94	621,0
60	0,2031	1,0171	7,682	0,1984	1,8891	59,94	623,2
65	0,2555	1,0199	6,206	0,2133	1,8702	64,93	625,2
70	0,3177	1,0228	5,049	0,2280	1,8522	69,93	627,3
75	0,3931	1,0258	4,136	0,2425	1,8349	74,94	629,3
80	0,4829	1,0290	3,410	0,2567	1,8178	79,95	631,3
85	0,5894	1,0323	2,830	0,2708	1,8015	84,96	633,2
90	0,7149	1,0359	2,361	0,2848	1,7858	89,98	635,1
95	0,8619	1,0396	1,981	0,2985	1,7708	95,01	637,0
100	1,03323	1,0435	1,673	0,3121	1,7561	100,04	638,9
105	1,2318	1,0474	1,419	0,3255	1,7419	105,08	640,7
110	1,4609	1,0515	1,210	0,3387	1,7282	110,12	642,5
115	1,7239	1,0558	1,036	0,3519	1,7150	115,18	644,3
120	2,0245	1,0603	0,8914	0,3647	1,7018	120,3	646,0
125	2,3666	1,0650	1,7701	0,3775	1,6895	125,3	647,7
130	2,7544	1,0697	0,6680	0,3901	1,6772	130,4	649,3
135	3,192	1,0746	0,5817	0,4026	1,6652	135,5	650,8
140	3,685	1,0798	0,5084	0,4150	1,6539	140,6	652,5
145	4,237	1,0850	0,4459	0,4272	1,6428	145,8	654,0
150	4,854	1,0906	0,3924	0,4395	1,6320	150,9	655,5
155	5,540	1,0963	1,3464	0,4516	1,6214	156,1	656,9
160	6,302	1,1021	0,3068	0,4637	1,6112	161,3	658,3
165	7,146	1,1082	8,2724	0,4756	1,6012	166,5	659,6
170	8,076	1,1144	0,2426	0,4874	1,5914	171,7	660,9
175	9,101	1,1210	0,2166	0,4991	1,5818	176,9	662,1
180	10,225	1,1275	0,1939	0,5107	1,5721	182,2	663,2
185	11,456	1,1345	0,1739	0,5222	1,5629	187,5	664,3
190	12,800	1,1415	0,1564	0,5336	1,5538	192,8	665,3
195	14,265	1,1490	0,1410	0,5449	1,5448	198,1	666,2

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO  FACULTAD DE CIENCIAS  ESCUELA DE ING. QUÍMICA  GALO A. TORRES V.	Propiedades del vapor de agua		
	Certificado	Por eliminar		FECHA	LAMINA	ESCALA
	Por Aprobar	Por informar		14/12/2014	03	1:1
Aprobado	Por calificar					

## ANEXO 4: FACTORES DE OBSTRUCCIÓN

TABLA 12. FACTORES DE OBSTRUCCION \* (Continúa)

Gases de escape de máquinas Diesel . . . . .	0.01	Unidades de destilación atmosférica :	
Vapores orgánicos . . . . .	0.0005	Vapores superiores sin tratar . . . . .	0.0013
Vapor (sin aceite) . . . . .	0.0	Vapores superiores tratados . . . . .	0.003
Vapores de alcohol . . . . .	0.0	Cortes intermedios . . . . .	0.0013
Vapor, de escape (con aceite) . . . . .	0.001	Unidades de destilación al vacío :	
Vapores refrigerantes (condensando de compresores recíprocos) . . . . .	0.002	Vapores superiores a aceite :	
Aire . . . . .	0.002	De la torre de burbujeo (condensador parcial) . . . . .	0.001
Vapores superiores en condensadores enfriados por agua: De la torre de burbujeo (condensador final) . . . . .	0.001	Del tanque flash (sin reflujo apreciable) . . . . .	0.003
Del tanque flash . . . . .	0.04	Aceite delgado . . . . .	0.002
Cortes intermedios :		Vapores superiores . . . . .	0.001
Aceite . . . . .	0.001	Gasolina . . . . .	0.0005
Para agua . . . . .	0.002	Debutanizador, Depropanizador, Depentanizador y unidades de Alkilación:	
Fondos residuales, menos de 20° API . . . . .	0.005	Alimento . . . . .	0.001
Fondos residuales, más de 20° API . . . . .	0.002	Vapores superiores . . . . .	0.001
Estabilizador de gasolina natural :		Enfriadores de producto . . . . .	0.001
Alimento . . . . .	0.0005	Calderetas de producto . . . . .	0.002
Vapores superiores, . . . . .	0.0005	Alimento del reactor . . . . .	0.002
Enfriadores de producto e intercambiadores . . . . .	0.0005	Unidades de tratamiento de lubricantes :	
Calderetas de producto . . . . .	0.001	Alimento de aceite solvente . . . . .	0.002
Unidades de eliminación de HS:		Vapores superiores . . . . .	0.001
Para vapores superiores . . . . .	0.001	Aceite refinado . . . . .	0.001
Intercambiadores enfriadores de solución . . . . .	0.0016	Intercambiadores calentadores de aceite refinado enfriados por agua ↓ . . . . .	0.003
Caldereta . . . . .	0.0016	Gomas y breas:	
Unidades de Cracking:		Generadores de vapor enfriados por aceite . . . . .	0.005
Alimento gas-oil :		Enfriados por agua . . . . .	0.003
Menos de 500°F . . . . .	0.002	Solvente . . . . .	0.001
500°F y más . . . . .	0.003	Unidades desasfaltizadoras :	
Alimento de nafta:		Aceite de alimento . . . . .	0.002
Menos de 500°F . . . . .	0.002	Solvente . . . . .	0.001
Más de 500°F . . . . .	0.004	Asfalto y resina:	
Separador de vapores vapores del separador, tanque flash, y vaporizador) . . . . .	0.006	Generadores de vapor enfriados por aceite. . . . .	0.005
		Enfriados por agua. . . . .	0.003
		Vapores de solvente . . . . .	0.001

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO	Factores de obstrucción			
	Certificado	Por eliminar		FACULTAD DE CIENCIAS	FECHA	LAMINA	ESCALA
	Por Aprobar	Por informar					
Aprobado	Por calificar	GALO A. TORRES V.	19/12/2014	04	1:1		

## ANEXO 5: PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA

*Propiedades físicas del agua, a 1 atm*

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho$ Kg/m <sup>3</sup>	$\mu$ 10 <sup>-3</sup> Kg/ m·seg	$C_p$ Kcal/ Kg·°C	$k$ Kcal/ mh·°C	$\beta$ 10 <sup>-4</sup> °C <sup>-1</sup>	$\lambda$ Kcal/Kg	$\nu$ 10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /seg	$\alpha$ 10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /seg	$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$	$\frac{g}{\nu^2}$ 10 <sup>12</sup> m <sup>-3</sup>
0	999,8	1,794	1,008	0,491	—	596,4	1,794	1,35	12,2	40,4
10	999,7	1,310	1,002	0,504	0,88	590,9	1,310	1,40	9,4	53,5
20	998,2	1,009	0,9995	0,517	2,07	585,5	1,011	1,44	7,02	67,4
30	995,7	0,800	0,9986	0,530	3,04	580,0	0,803	1,48	5,43	82,4
40	992,2	0,654	0,9987	0,543	3,85	574,5	0,659	1,52	4,33	97,7
50	988,1	0,549	0,9982	0,555	4,60	568,9	0,556	1,56	3,56	113,0
60	983,2	0,470	1,000	0,567	5,21	563,2	0,478	1,60	2,98	228,1
70	977,8	0,407	1,001	0,580	5,86	557,3	0,416	1,65	2,53	143,2
80	971,8	0,357	1,003	0,592	6,41	551,3	0,367	1,69	2,18	158,2
90	965,3	0,317	1,005	0,604	7,00	545,3	0,328	1,73	1,90	172,6
100	958,4	0,284	1,008	0,616	7,48	539,0	0,296	1,77	1,67	186,9
110	951,0	0,256	1,011	0,628	7,9	532,6	0,269	1,81	1,48	201
120	943,4	0,232	1,014	0,640	8,4	525,9	0,246	1,86	1,32	215
130	935,2	0,212	1,017	0,652	9,0	519,0	0,227	1,90	1,19	227
140	926,4	0,196	1,020	0,664	9,7	511,9	0,212	1,95	1,08	236
150	917,3	0,184	1,024	0,676	10,4	504,5	0,201	2,00	1,00	245
160	907,5	0,174	1,027	0,688	11,0	496,9	0,192	2,05	0,935	250

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO		Propiedades físicas del agua		
	Certificado	Por eliminar	FACULTAD DE CIENCIAS		FECHA	LAMINA	ESCALA
	Por Aprobar	Por informar	ESCUELA DE ING. QUÍMICA		19/12/2014	05	1:1
	Aprobado	Por calificar	GALO A. TORRES V.				

## ANEXO 6: PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES

Sólidos: Metales y aleaciones					
	$T$ °C	$k$ W/m K	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$C_p$ J/kg K	$\alpha \times 10^6$ m <sup>2</sup> /s
Aluminio	20	204.2	2707	896	84.2
Cobre	20	384	8954	385	112
Hierro	20	72.1	7897	452	20.4
Ploomo	20	34.7	11 393	130	23.4
Plata	20	406.8	10 524	235	164.5
Acero inoxidable	20	16.3	7820	460	4.53

Sólidos: No metales					
	$T$ °C	$k$ W/m K	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$C_p$ J/kg K	$\alpha \times 10^6$ m <sup>2</sup> /s
Ladrillo (construcción)	20	0.233-0.291	800-1500	—	—
Cartón ondulado	20	0.064	—	—	—
Tiza	50	0.9304	2000	897	0.529
Carbón	20	0.1861	1400	1306	0.102
Hormigón	20	1.279	2300	1130	0.492
Corcho aglomerado	20	0.0443	160	—	—
Vidrio	20	0.7443	2500	670	0.444
Hielo	0	2.25	920	2161	1.08
Cuero	30	0.1593	1000	—	—
Caucho	0	0.1628	1200	1392	0.0975
Arena	20	0.33	1500	800	0.275
Nieve, seca	< 0	0.4652	560	2093	0.397
Madera:					
Roble vetado	20	0.207	800	1759	0.147
Roble con grano	20	0.3629	800	—	—
Pino con grano	20	0.107	448	—	—
Pino vetado	20	0.2559	448	—	—

Plásticos			
	$k$ W/m K	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$C_p$ J/kg K
ABS	0.16-0.27	1020-1200	1510-1550
Nilon	0.17-0.34	1030-1140	1380-1670
Polycarbonato	0.19-0.22	910-1250	1170-1260
Poliétileno	0.42-0.49	913-968	2090-2300
Poliéster	0.33-0.91	1100-2010	1340-2090
PVC	0.14-0.19	1240-1550	1050
Espuma de poliestireno	0.03-0.04	16-32	—
Espuma de poliuretano	0.04	122	—

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO  FACULTAD DE CIENCIAS  ESCUELA DE ING. QUÍMICA  GALO A. TORRES V.	Propiedades físicas de los materiales		
	Certificado	Por eliminar		FECHA	LAMINA	ESCALA
	Por Aprobar	Por informar		19/12/2014	06	1:1
Aprobado	Por calificar					

## ANEXO 7: INFORME DE ANALISIS DE GASES DE COMBUSTIÓN

 <b>LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTAL E INSPECCIÓN LAB-CESTTA</b>	<b>ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO</b>  <b>CENTRO DE SERVICIOS TÉCNICOS Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA AMBIENTAL</b>  <b>FACULTAD DE CIENCIAS</b> Panamericana Sur Km. 1 ½ Telefón: (03) 2998232 RIOBAMBA - ECUADOR	<b>ACREDITADO</b>   <b>ENSAYOS</b> No OAE LE 2C 06-008
---	--	--

**INFORME DE ENSAYO No:** 0334  
**ST:** 12 - 039 ANÁLISIS DE GASES

**Nombre Peticionario:** QUESERA NEVADITO  
**Atn.** Sr. Galo Torres,  
**Dirección:** Cda. Fausto Molina Mz. 14 Villa 10

**FECHA:** 22 de Marzo del 2012  
**NUMERO DE MUESTRAS:** 3  
**FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB:** 2012 / 03 / 21 12:00  
**FECHA DE MUESTREO:** 2012 / 03 / 21  
**FECHA DE ANÁLISIS:** 2012 / 03 / 21 - 2012 / 03 / 22  
**TIPO DE MUESTRA:** Gases de Combustión  
**CÓDIGO LAB-CESTTA:** LAB- G 0209-12 a LAB- G 0211-12  
**CÓDIGO DE LA EMPRESA:** G-1 a G-3  
**PUNTO DE MUESTREO:** CALDERO / 17M 0743618 / 9825393  
**ANÁLISIS SOLICITADO:** Gases de Combustión  
**PERSONA QUE TOMA LA MUESTRA:** Dr. Kleber Isa.  
**CONDICIONES AMBIENTALES:** T: 25,5 °C

**RESULTADOS ANALÍTICOS:**

PARÁMETROS	MÉTODO/NORMA	UNIDAD	RESULTADO	VALOR LÍMITE PERMISIBLE (mg/Nm <sup>3</sup> )	INCERTIDUMBRE (k=2)
SO <sub>2</sub>	PEE/LAB-CESTTA/03 EPA-CTM-30 Celdas Electroquímicas	ppm	10	-	± 28%
NO <sub>x</sub>	PEE/LAB-CESTTA/03 EPA-CTM-30 Celdas Electroquímicas	ppm	61	-	± 15%
*NO	PEE/LAB-CESTTA/03 EPA-CTM-30 Celdas Electroquímicas	ppm	61	-	-
*NO <sub>2</sub>	PEE/LAB-CESTTA/03 EPA-CTM-30 Celdas Electroquímicas	ppm	0,1	-	-
CO	PEE/LAB-CESTTA/03 EPA-CTM-30 Celdas Electroquímicas	ppm	9	-	± 6%
*CO <sub>2</sub>	PEE/LAB-CESTTA/03 EPA-CTM-30 Celdas Electroquímicas	%	10,80	-	-

<b>NOTAS</b>	<b>CATEGORIA DEL DIAGRAMA</b>	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO	<b>Informe de análisis de gases de combustión</b>		
	Certificado    Por eliminar	FACULTAD DE CIENCIAS			
	Por Aprobar    Por informar	ESCUELA DE ING. QUÍMICA	FECHA	LAMINA	ESCALA
Aprobado    Por calificar	GALO A. TORRES V.	19/12/2014	07	1:1	

# ANEXO 8: INFORME ANALISIS FISICO-QUIMICO DE AGUA DE PURGA



## LABORATORIO DE ANALISIS TECNICOS FACULTAD DE CIENCIAS

Cualla 06 01 4703      Teléfono: 2598200 ext 311      Riobamba - Ecuador  
**INFORME DE ANALISIS FISICO-QUIMICO DE AGUA**  
 Solicitado por: Sr. Galo Torres  
 Fecha de emisión: 27 de marzo de 2012  
 Fecha de entrega de resultados: 30 de marzo de 2012  
 Tipo de muestra: Agua de purga de aditivos  
 Ubicación: Quequera El Navajito San Juan, Cantón Riobamba  
 T.A.T/Q-45-12

Determinaciones	Unidades	Resultados
pH	Unidad	9.56
Conductividad	µ.S/cm/cm	137
Acidez	mg/l	81.1
Alcalinidad	mg/l	151.6
Dureza	mg/l	409.9
Calcio	mg/L	64.6
Magnesio	mg/l	28.3
Aluminio total	mg/l	988.0
Bicarbonatos	mg/L	202.8
Sulfatos	mg/l	187.0
Hierro	mg/l	1.015
Fósforo	mg/L	1.876
Sólidos Totales	mg/L	19166.0
Sólidos Suspendedos	mg/l	28000.0
Sólidos Disueltos	mg/l	819.0

\* Valores referenciados para aguas de consumo doméstico

Observaciones:  
Acreditado

Dr. Galo Torres  
RESP. LAB. ANALISIS TECNICOS

Nota: El presente informe afecta solo a la muestra analizada.

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO  FACULTAD DE CIENCIAS  ESCUELA DE ING. QUÍMICA  GALO A. TORRES V.	Informe de análisis físico-químico del agua de purga		
	Certificado	Por eliminar		FECHA	LAMINA	ESCALA
	Por Aprobar	Por informar		19/12/2014	08	1:1
Aprobado	Por calificar					

## ANEXO 9: ANALISIS FISICO-QUIMICO AGUA DE ALIMENTACION



### LABORATORIO DE ANALISIS TECNICOS

FACULTAD DE CIENCIAS

Casilla 06-01-1700

Teléfono: 2998200 ext. 332

Riobamba - Ecuador

#### INFORME DE ANALISIS FISICO-QUIMICO DE AGUAS

*Realizado por:* Sr. Galo Torres

*Fecha de análisis:* 21 de febrero de 2014

*Fecha de entrega de resultados:* 24 de febrero de 2014

*Tipo de muestra:* Agua de alimentación en caliente

*Localidad:* Pangua San Juan, Centro Educativo

Código: LAFQ-17-12

Determinaciones	Unidades	% Val. Ref.	Resultados
pH	Unit	5.5 - 9.5	5.67
Color	DNOCU/1		25
Conductividad	µS/cm/cm		156
Turbiedad	NTU		1.0
Cloruro	mg/L		7.8
Fluoruro	mg/L	< 2	0.00
Cianuro	mg/L		0.00
Nitrogeno	mg/L		7.8
Sulfato	mg/L	< 25	100.0
Fosforo	mg/L		122.0
Sulfato	mg/L		2.0
Oxígeno Disuelto	mg/L	0.006	3.1
Temperatura	°C		31
Hierro	mg/L	< 0.05	0.017
Cadmio	mg/L		1.129
Sulfato Total	mg/L		140.0
Sulfato Disuelto	mg/L		105.0

Indicador Langmuir: 1.2 Trazando Corriente

*Observaciones:*

Dra. Gen. Alvarez P.



P.E.S.P. LAB. ANALISIS TECNICOS

Nota: El presente informe es válido e intransferible.

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO  FACULTAD DE CIENCIAS  ESCUELA DE ING. QUÍMICA  GALO A. TORRES V.	Análisis físico- químico del agua De alimentación		
	Certificado	Por eliminar		FECHA	LAMINA	ESCALA
	Por Aprobar	Por informar		19/12/2014	09	1:1
Aprobado	Por calificar					

# ANEXO 10: ANALISIS FISICO-QUIMICO AGUA DE ALIMENTACION



## LABORATORIO DE ANALISIS TECNICOS FACULTAD DE CIENCIAS

Código 06-01-4703      Teléfono 0998980114      RUC 161-01-0001  
**INTENSIVO DE ANALISIS FISICO QUIMICO DE AGUAS**  
 Solicitado por: Sr. Galo Torres  
 Fecha de análisis: 5 de marzo del 2012  
 Fecha de entrega de resultados: 07 de marzo de 2012  
 Tipo de muestra: Agua de alimentación en caliente  
 Localidad: Parroquia San Juan, Canton Riobamba  
 Cód. de muestra: LAT17040-12

Determinaciones	Unidades	*Val. Ref.	Resultados
pH	Unid.	6.5 - 9.5	6.63
Color	Unid. C.P.P.		36
Transparencia	g. Meters		0.9
Resistencia	DMT		1.4
Conduct	esp. l.		3.7
Acidez	esp. l.	0.2	26.0
Carbono	esp. l.		1.8
Nitrogeno	esp. l.		5.8
Amonio	esp. l.	0.25	0.00
Fosforo	esp. l.		0.8
Sulfato	esp. l.		0.6
Cloruro	esp. l.	0.004	5.5
Temperatura	°C		20.9
PH en	esp. l.	0.005	0.075
Aluminio	esp. l.		0.22
Sulfato Trioxido	esp. l.		272.0
Sulfato Aluminico	esp. l.		0.1

Instr. de Laboratorio: I S Tendencias para Corrección

Gobernador:  
Alcaldía:

*[Firma]*  
Dra. Ulma Alvarez R.



SEPT. 19/12/2014  
 Nota: El presente informe afecta solo a la muestra analizada

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUÍMICA GALO A. TORRES V.	Análisis físico- químico del agua De alimentación		
	Certificado	Por eliminar		FECHA	LAMINA	ESCALA
	Por Aprobar	Por informar		19/12/2014	10	1:1
	Aprobado	Por calificar				

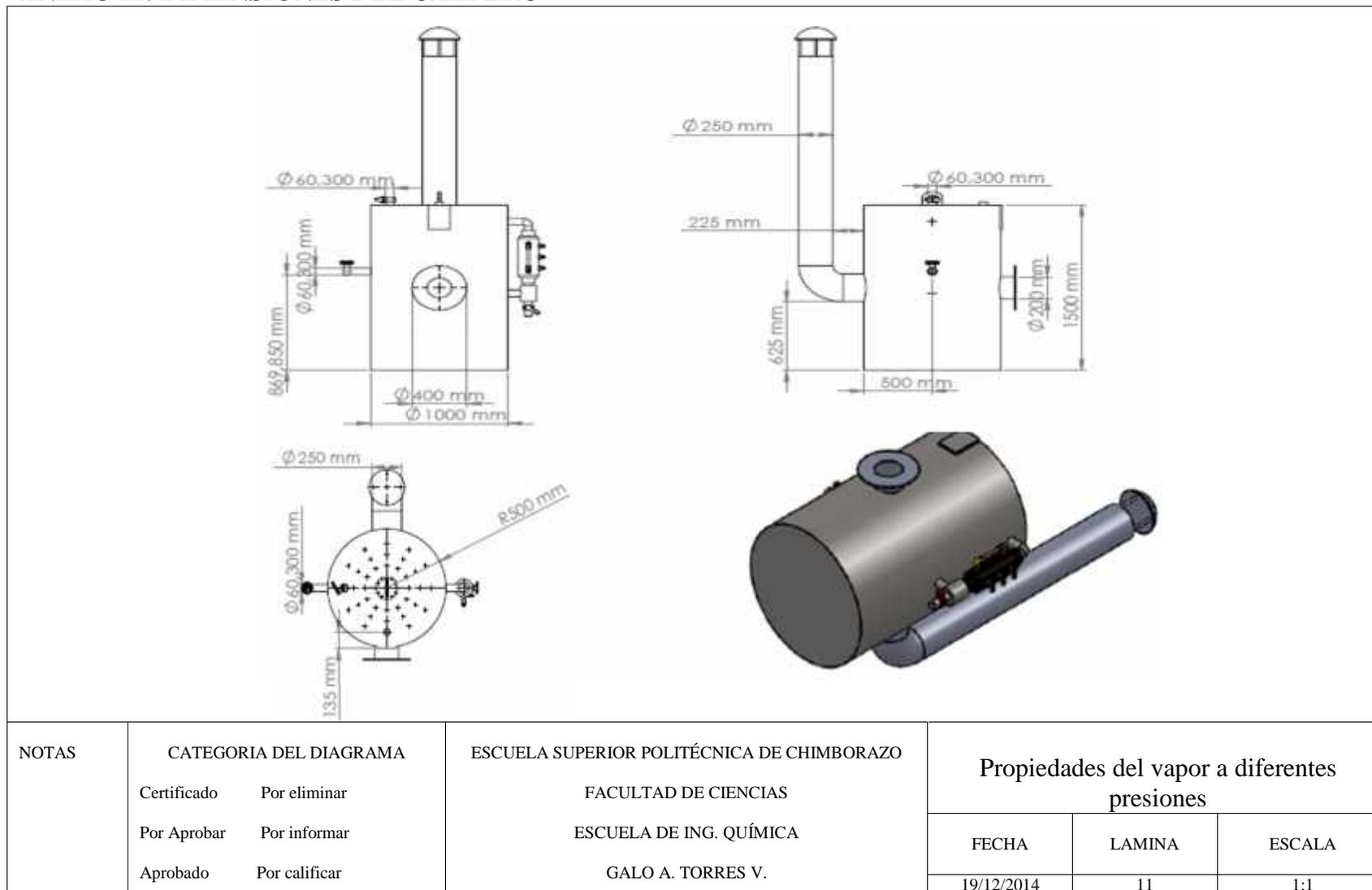
## ANEXO 11: PROPIEDADES DEL VAPOR A DIFERENTES PRESIONES

°C	1.0 at			5.0 at			10.0 at			25 at		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s	v	h	s
0	0.001000	0.1	0.0000	0.001000	0.1	0.0000	0.001000	0.2	0.0000	0.000000	0.6	0.0000
10	0.001000	10.1	0.0361	0.001000	10.2	0.0361	0.001000	10.3	0.0361	0.000000	10.6	0.0360
20	0.001002	20.1	0.0708	0.001002	20.1	0.0708	0.001001	20.2	0.0707	0.000000	20.5	0.0706
30	0.001004	30.1	0.1042	0.001004	30.1	0.1042	0.001004	30.2	0.1041	0.000000	30.5	0.1040
40	0.001008	40.1	0.1365	0.001008	40.1	0.1365	0.001008	40.2	0.1364	0.000000	40.5	0.1363
50	0.001012	50.0	0.1680	0.001012	50.0	0.1679	0.001012	50.2	0.1678	0.001011	50.4	0.1677
50	0.001017	50.0	0.1684	0.001017	50.0	0.1683	0.001017	50.1	0.1682	0.001016	50.4	0.1680
70	0.001023	69.9	0.2280	0.001023	70.0	0.2279	0.001022	70.1	0.2278	0.001022	70.4	0.2275
80	0.001029	89.9	0.2577	0.001029	90.0	0.2566	0.001029	90.1	0.2565	0.001028	90.4	0.2562
90	0.001035	99.9	0.2848	0.001035	90.1	0.2847	0.001035	90.1	0.2846	0.001035	90.4	0.2843
100	1.750	639.1	1.7526	0.001043	105.1	0.3150	0.001043	100.2	0.3139	0.001043	100.5	0.3116
110	1.781	644.2	1.7728	0.001051	110.3	0.3389	0.001050	110.3	0.3383	0.001050	110.5	0.3382
120	1.830	649.1	1.7862	0.001059	120.3	0.3646	0.001050	120.4	0.3645	0.001050	120.5	0.3642
130	1.879	653.0	1.7961	0.001070	130.5	0.3901	0.001059	130.5	0.3900	0.001059	130.5	0.3894
140	1.927	658.5	1.8096	0.001080	140.7	0.4150	0.001079	140.7	0.4149	0.001079	141.0	0.4145
150	1.976	663.2	1.8207	0.001091	150.9	0.4385	0.001090	151.0	0.4384	0.001090	151.2	0.4380
160	2.024	667.9	1.8316	0.001101	161.1	0.4624	0.001122	161.3	0.4623	0.001101	161.5	0.4620
170	2.072	672.5	1.8422	0.4026	166.9	1.6382	0.001114	171.7	0.4673	0.001113	171.9	0.4667
180	2.120	677.2	1.8526	0.4132	172.2	1.6699	0.1987	163.5	1.5785	0.001126	182.3	0.5100
190	2.167	681.5	1.8628	0.4230	177.2	1.6780	0.2048	170.3	1.5894	0.001140	192.9	0.5230
200	2.215	686.3	1.8727	0.4327	182.2	1.6886	0.2100	176.1	1.6024	0.001156	203.6	0.5368
210	2.263	691.1	1.8824	0.4426	187.2	1.6989	0.2161	181.6	1.6141	0.001172	214.6	0.5505
220	2.311	696.5	1.8920	0.4529	192.1	1.7090	0.2223	187.2	1.6251	0.001190	225.4	0.5609
230	2.358	700.5	1.9014	0.4628	197.0	1.7189	0.2282	192.4	1.6357	0.002067	235.0	1.5674
240	2.406	705.2	1.9106	0.4728	201.9	1.7285	0.2332	197.6	1.6450	0.002946	242.2	1.5216

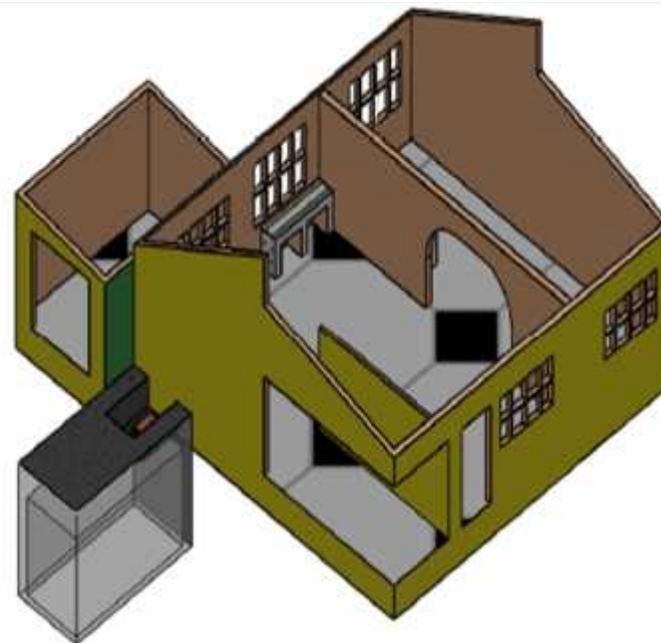
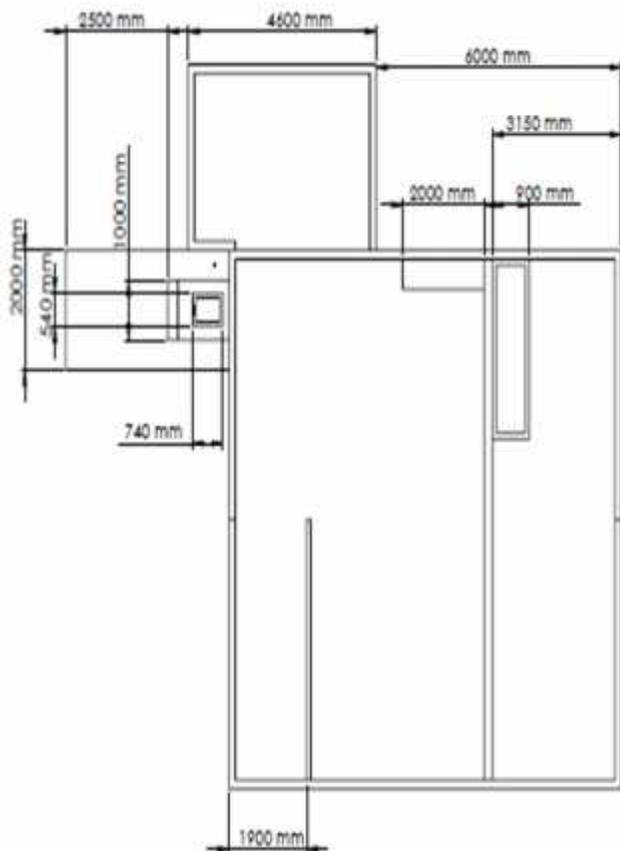
\*) v = volumen específico, m<sup>3</sup>/Kg. h = entalpía, Kcal/Kg. s = entropía, Kcal/\*K · Kg.  
 (Los datos de la parte superior de la tabla, para temperaturas inferiores a la de saturación, corresponden al líquido. El vapor no es estable en estas condiciones.)

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO  FACULTAD DE CIENCIAS  ESCUELA DE ING. QUÍMICA  GALO A. TORRES V.	Propiedades del vapor a diferentes presiones		
	Certificado	Por eliminar		FECHA	LAMINA	ESCALA
	Por Aprobar	Por informar				
	Aprobado	Por calificar		19/12/2014	11	1:1

## ANEXO 12: DIMENSIONES DEL CALDERO

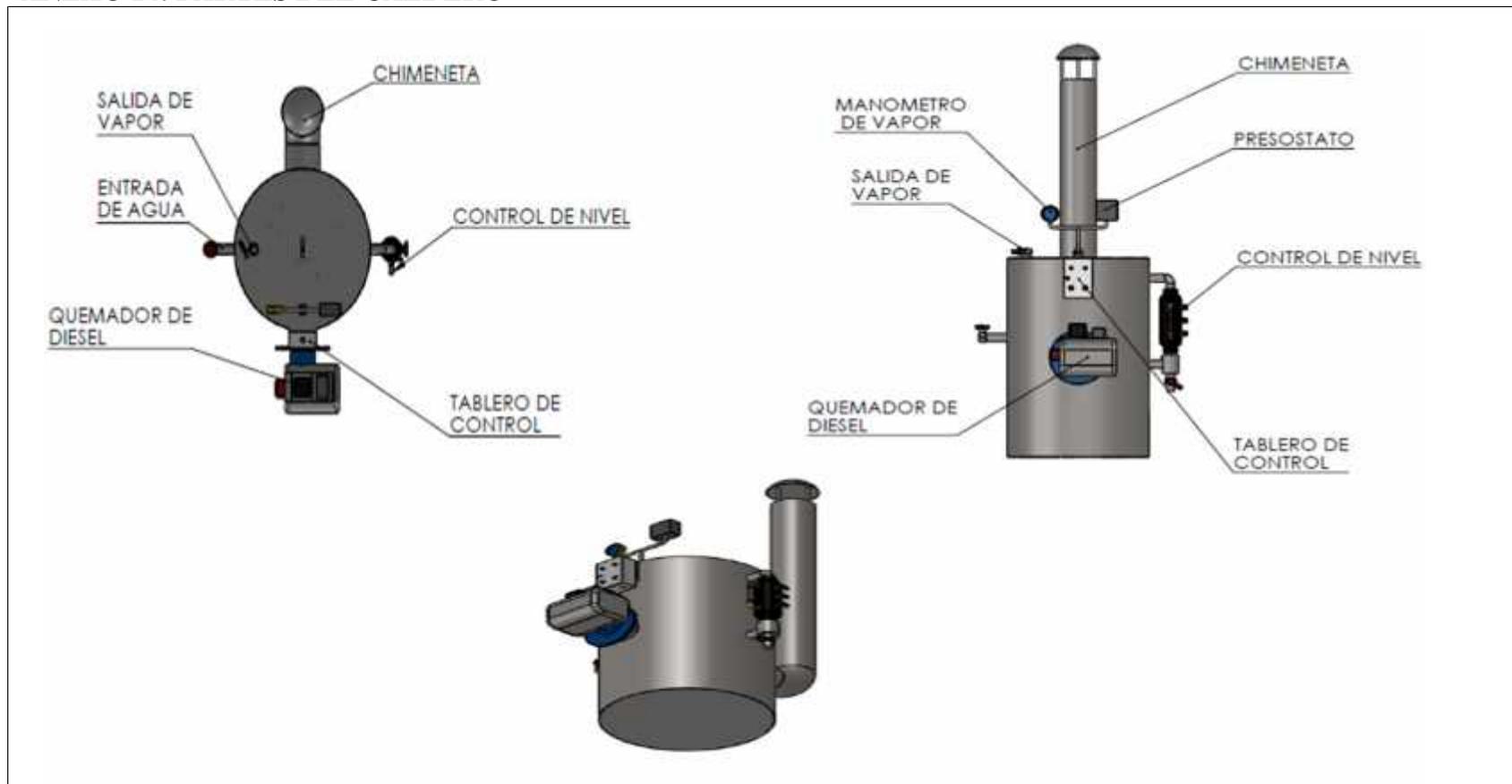


### ANEXO 13: PLANO DE QUESERA



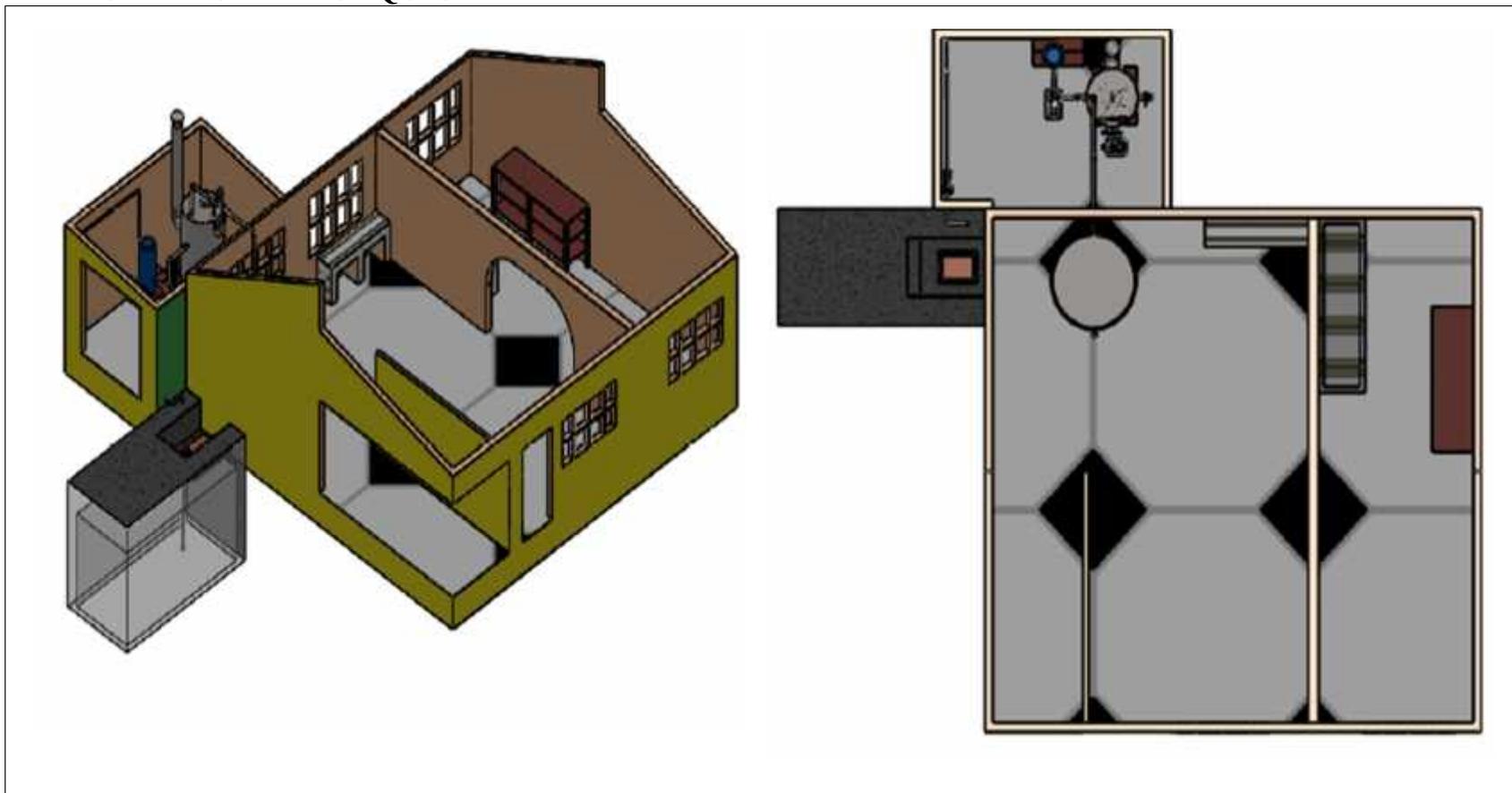
NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUÍMICA GALO A. TORRES V.	Propiedades del vapor a diferentes presiones		
	Certificado	Por eliminar		FECHA	LAMINA	ESCALA
	Por Aprobar	Por informar		19/12/2014	11	1:1
	Aprobado	Por calificar				

## ANEXO 14: PARTES DEL CALDERO



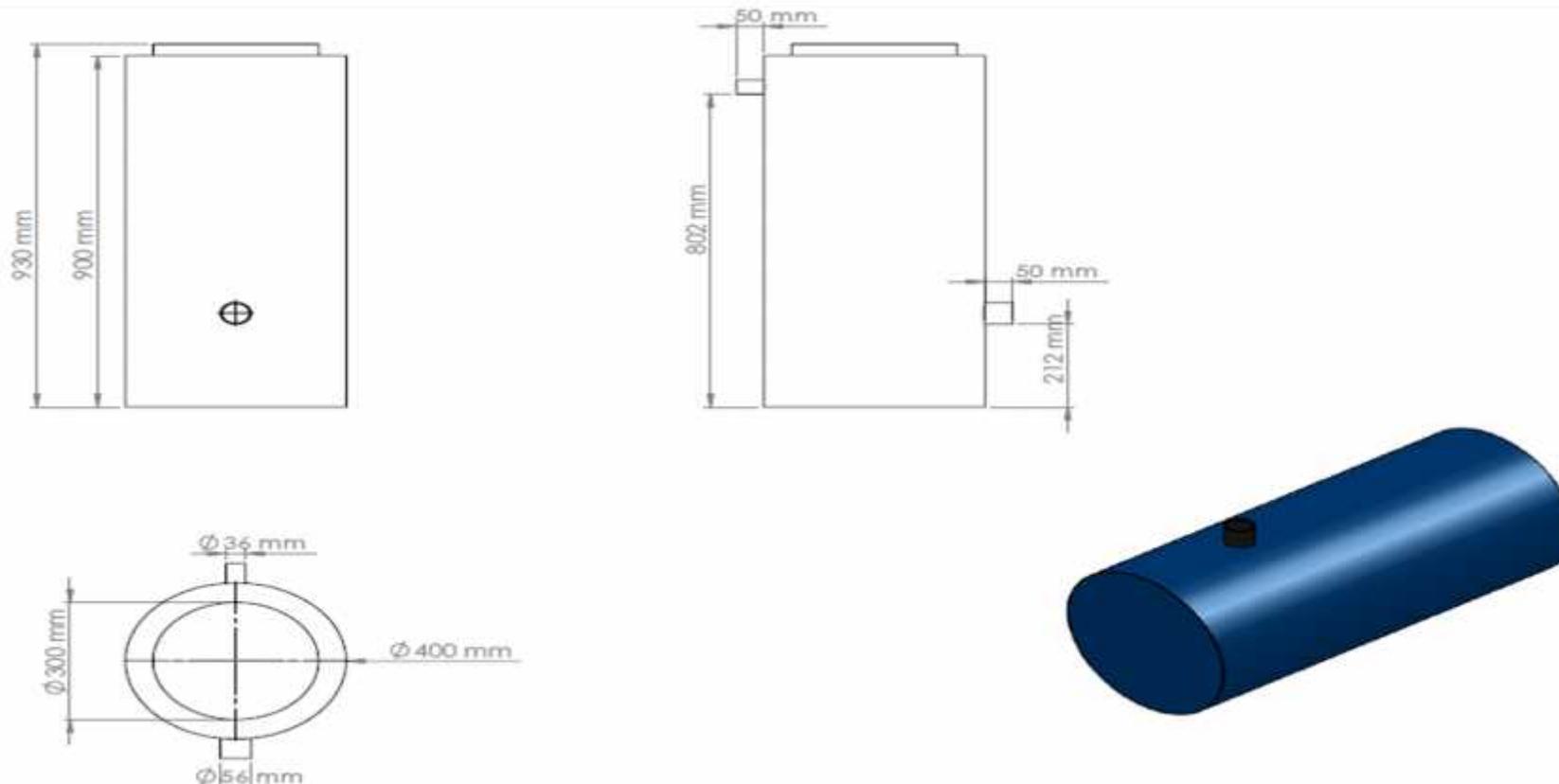
NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO  FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUÍMICA  GALO A. TORRES V.	Propiedades del vapor a diferentes presiones		
	Certificado	Por eliminar		FECHA	LAMINA	ESCALA
	Por Aprobar	Por informar		19/12/2014	11	1:1
	Aprobado	Por calificar				

### ANEXO 15: ENSAMBLAJE QUESERA



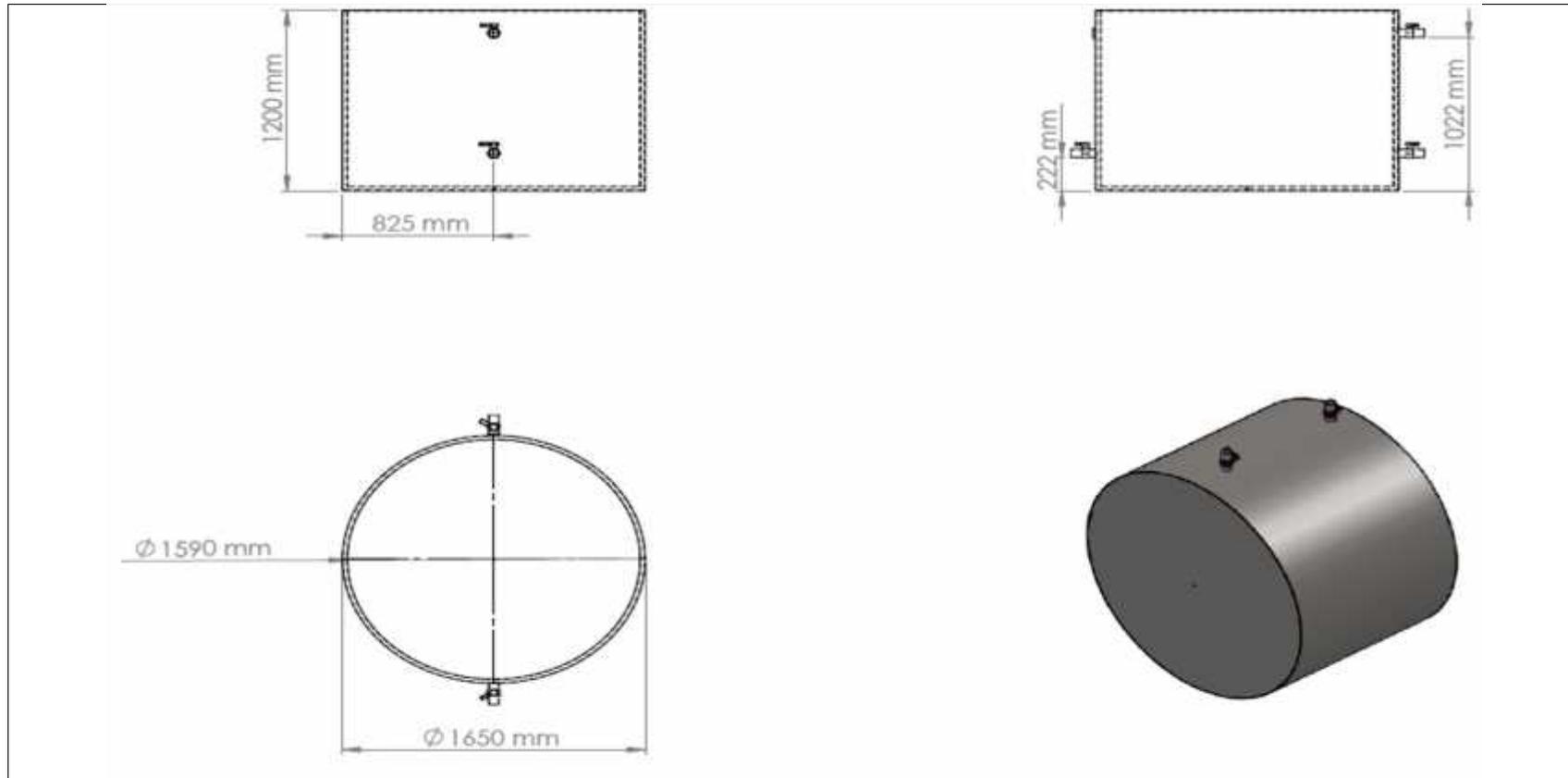
NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO  FACULTAD DE CIENCIAS  ESCUELA DE ING. QUÍMICA  GALO A. TORRES V.	Propiedades del vapor a diferentes presiones		
	Certificado	Por eliminar		FECHA	LAMINA	ESCALA
	Por Aprobar	Por informar		19/12/2014	11	1:1
	Aprobado	Por calificar				

## ANEXO 16: TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE AGUA



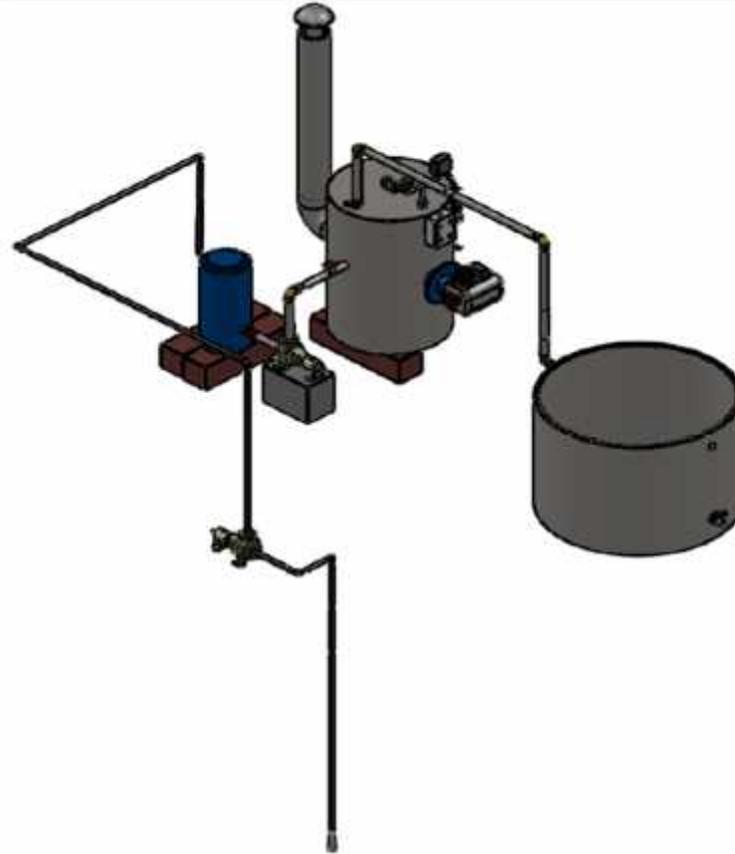
NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUÍMICA GALO A. TORRES V.	Propiedades del vapor a diferentes presiones		
	Certificado	Por eliminar		FECHA	LAMINA	ESCALA
	Por Aprobar	Por informar		19/12/2014	11	1:1
	Aprobado	Por calificar				

**ANEXO 17: PASTEURIZADOR**



NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO  FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUÍMICA  GALO A. TORRES V.	Propiedades del vapor a diferentes presiones		
	Certificado	Por eliminar		FECHA	LAMINA	ESCALA
	Por Aprobar	Por informar		19/12/2014	11	1:1
	Aprobado	Por calificar				

## ANEXO 18: ENSAMBLE DEL CALDERO



NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUÍMICA GALO A. TORRES V.	Propiedades del vapor a diferentes presiones		
	Certificado	Por eliminar		FECHA	LAMINA	ESCALA
	Por Aprobar	Por informar		19/12/2014	11	1:1
	Aprobado	Por calificar				

**ANEXO 19: CALDERO**



NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO  FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUÍMICA  GALO A. TORRES V.	Propiedades del vapor a diferentes presiones		
	Certificado	Por eliminar		FECHA	LAMINA	ESCALA
	Por Aprobar	Por informar		19/12/2014	11	1:1
	Aprobado	Por calificar				