



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

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS
DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN DE UNA CALDERA PIROTUBULAR, EN UNA INDUSTRIA
PROCESADORA DE ALIMENTOS**

Blancandrea Divas Reynosa

Asesorado por Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, febrero 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS
DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN DE UNA CALDERA PIROTUBULAR, EN UNA INDUSTRIA
PROCESADORA DE ALIMENTOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

BLANCANDREA DIVAS REYNOSA

ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, FEBRERO 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

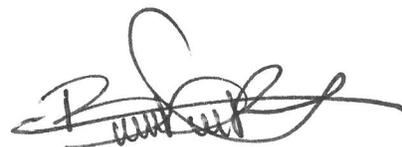
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza González
EXAMINADORA	Inga. Hilda Piedad Palma Ramos
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS
DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN DE UNA CALDERA PIROTUBULAR, EN UNA INDUSTRIA
PROCESADORA DE ALIMENTOS**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 24 julio 2015.



Blancandrea Divas Reynosa

Guatemala 04 de Octubre de 2019

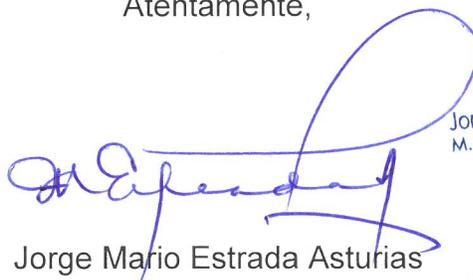
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado: **"IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN DE UNA CALDERA PIROTUBULAR, EN UNA INDUSTRIA PROCESADORA DE ALIMENTOS"**, elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química, **Blancandrea Divas Reynosa**, quien se identifica con el registro académico **2010-20802** y con el CUI **2156 56539 01 01**.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



Jorge Mario Estrada Asturias
ASESOR

Ingeniero Químico
Colegiado activo no. 685

Jorge Mario ESTRADA ASTURIAS
M. Sc. Ingeniero Químico Col. 685
PROFESOR TITULAR
Facultad de Ingeniería
Registro USAC 20080059



Guatemala, 14 de noviembre de 2019.
 Ref. EIQ.TG-IF.047.2019.

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

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **33-2015**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Blancandrea Divas Reynosa**.
 Identificado con número de carné: **2156565390101**.
 Identificado con registro académico: **201020802**.
 Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.
 En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

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

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN DE UNA CALDERA PIROTUBULAR, EN UNA INDUSTRIA PROCESADORA DE ALIMENTOS

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Jorge Mario Estrada Asturias, profesional de la Ingeniería Química

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

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Adela María Marroquín González
 Adela María Marroquín González
 Profesional de la Ingeniería Química
 COORDINADOR DE TERNA
 Tribunal de Revisión
 Trabajo de Graduación



C.c.: archivo





Ref.EIQ.TG.005.2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación, de la carrera de Ingeniería Química, de la estudiante, **BLANCANDREA DIVAS REYNOSA** titulado: **"IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN DE UNA CALDERA PIROTUBULAR, EN UNA INDUSTRIA PROCESADORA DE ALIMENTOS"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Williams G. Alvarez Mejía; M.I.Q., M.U.F.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, febrero de 2020

Cc: Archivo
WGAM/ale

Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.044-2020

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN DE UNA CALDERA PIROTUBULAR, EN UNA INDUSTRIA PROCESADORA DE ALIMENTOS**, presentado por la estudiante universitaria: **Blancandrea Divas Reynosa** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, febrero de 2020.

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por guiarme durante toda mi vida y brindarme las oportunidades que me permitieron llegar a este momento. Para ti toda gloria y honra.
- Mis padres** Alida Reynosa Franco y Flavio Divas Villagrán. Por darme la vida y brindarme apoyo en los estudios durante toda mi vida, e inspirarme a cumplir mis metas y sueños.
- Mis hermanos** Flavio Fernando, Alisson Pamela, Alida Stephany, Pablo Alejandro y Nathalie Abigail Divas Reynosa. Por ser una compañía agradable, fuente de fortaleza y motivo de inspiración para ser un buen ejemplo como hermana mayor.
- Mi esposo** Harry Aissa Pérez Urizar, por ser mi apoyo en esta última etapa de la carrera y por ser mi pareja ideal.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser una fuente de conocimiento y aprendizaje para toda persona que lo busca.
Facultad de Ingeniería	Por abrirme las puertas y darme la oportunidad de cerrar una carrera.
Escuela de Ingeniería Química	Por darme todos los conocimientos sobre mi carrera.
Mis amigos de la Facultad	Vania López, Marilyn Aja, Sucely Zapeta, Jorge González, Carlos López, por ser mi compañía diaria en la Universidad y acompañarme en todo momento durante la carrera.
Jorge Mario Estrada	Por ser mi asesor y formarme diariamente como una futura ingeniera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Química del agua	3
2.1.1. Equilibrio iónico.....	4
2.1.2. Disociación de electrolitos soluciones acuosas	5
2.1.3. Producto de solubilidad	5
2.2. Caldera.....	6
2.3. Tipos de calderas	7
2.3.1. Calderas acuatubulares.....	7
2.3.2. Calderas pirotubulares.....	7
2.4. Equipos auxiliares	9
2.4.1. Quemador.....	9
2.4.2. Soplador	9
2.4.3. Válvula de seguridad y desahogo.....	10

2.4.4.	Chimenea	11
2.4.5.	Condensador.....	12
2.4.6.	Suavizador	13
2.5.	Materiales utilizados para fabricar las calderas.....	14
2.6.	Condiciones del agua de alimentación en una caldera	15
2.7.	Control de parámetros fisicoquímicos	16
2.7.1.	pH.....	16
2.7.2.	Dureza.....	16
2.7.2.1.	Dureza temporal.....	17
2.7.2.2.	Dureza permanente.....	17
2.7.3.	Alcalinidad.....	18
2.7.4.	Fosfatos.....	18
2.7.5.	Sílice	18
2.7.6.	Sólidos disueltos totales	19
2.8.	Problemas comunes de las calderas.....	19
2.8.1.	Incrustación	19
2.8.2.	Corrosión.....	20
2.9.	Determinación de problemas en la caldera	22
2.9.1.	Índice de saturación de Langelier.....	22
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	25
3.1.	Variables	25
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	25
3.3.	Recursos humanos disponibles	26
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	26
3.4.1.	Equipo de laboratorio	26

3.4.2.	Kit de análisis.....	27
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	28
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	30
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de información	31
3.8.	Análisis estadístico	31
3.9.	Plan de análisis de los resultados	32
4.	RESULTADOS	33
4.1.	Medición de parámetros fisicoquímicos del agua de alimentación de la caldera pirotubular	33
4.2.	Determinación del índice de Langelier	34
4.3.	Manual de control de parámetros fisicoquímicos de agua de caldera.....	35
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	43
	CONCLUSIONES	47
	RECOMENDACIONES.....	49
	BIBLIOGRAFÍA.....	51
	APÉNDICES	55

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Principios básicos de una caldera.....	6
2.	Caldera acuotubular y sus características.....	7
3.	Caldera pirotubular y sus características	8
4.	Quemador	9
5.	Soplador	10
6.	Válvulas	11
7.	Chimenea	12
8.	Condensador	13
9.	Suavizador	13
10.	Incrustación en tuberías de una caldera	20
11.	Corrosión en tubería de una caldera.....	21
12.	Kit de análisis	27
13.	Determinación índice de Langelier	34
14.	Medidor de pH digital	36
15.	Medidor de TSD digital	37
16.	Kit de dureza	37
17.	Kit de alcalinidad	38
18.	Kit de fosfatos y sílice	38

TABLAS

I.	Límites recomendados para agua de alimentación de una caldera	15
II.	Variables.....	25
III.	Interpretación del índice de Langelier.....	29
IV.	Registro: control de parámetros fisicoquímicos.....	30
V.	Parámetros fisicoquímicos de agua de alimentación de la caldera	33
VI.	Control de parámetros.....	39
VII.	Interpretación índice de Langelier	41
VIII.	Acciones correctivas según clasificación.....	41

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Alcalinidad
C	Calcio como dureza
CaCO₃	Carbonato de calcio
d	Función de la alcalinidad
b	Función de la temperatura del agua
a	Función de los sólidos concentrados totales
c	Función del calcio como dureza
K	Kelvin
ppm	Partes por millón
pH	Potencial de hidrógeno
pHs	Potencial de hidrógeno de saturación
T	Temperatura
TDS	Total de solidos disueltos

GLOSARIO

Agua de alimentación	Agua utilizada en la entrada de una caldera para producir vapor.
Alcalinidad	Capacidad ácido neutralizante de una solución. La alcalinidad indica la cantidad de cambio que ocurrirá en el pH con la adición de cantidades moderadas de ácido, ya que está compuesta de iones carbonatos y bicarbonatos.
Caldera pirotubular	Dispositivo industrial que se usa principalmente para sistemas de calefacción y producción de vapor requerido en los procesos.
Carbonato de calcio	Es una sal inorgánica ternaria u oxosa cuya fórmula química molécula es CaCO_3 .
Corrosión	Deterioro de un material por reacción química o electroquímica con su medio ambiente.
Dureza	Concentración de compuestos minerales que hay en una determinada cantidad de agua, en particular sales de magnesio y calcio.

Fosfato	Sal formada por combinación del ácido fosfórico con una base.
Incrustación	Impurezas que son precipitadas directamente sobre la superficie de transferencia de calor o por materia suspendida en el agua que se asienta en el metal; se vuelve dura y adherente.
Índice de Langelier	Indicación del grado de saturación del carbonato de calcio en el agua, el cual se basa en el pH, alcalinidad y dureza. Refleja el equilibrio del pH del agua con respecto al calcio y la alcalinidad. Es utilizado en la estabilización del agua para controlar la corrosión y la incrustación.
Kit	Conjunto de análisis que incluye un folleto de indicaciones para realizar una medición específica.
Manual de operación	Guía de inducción y referencia que contiene toda la información sobre cómo funciona un proceso.
Potencial de Hidrógeno	Medida que indica la concentración de iones de hidrógeno presentes en determinadas soluciones.

Partes por millón	Unidad de medida de concentración que mide la cantidad de unidades de sustancia que hay por cada millón de unidades del conjunto.
Sílice	Material donde su componente principal proviene de rocas, arena, cuarcita, granito, entre otros. Las incrustaciones de sílice son típicamente muy duras, adherentes vidriosas y difíciles de remover.
Total sólidos disueltos	Representa la concentración total de sustancias disueltas en el agua. Se compone de sales inorgánicas comunes que se pueden encontrar en el agua incluyen calcio, magnesio, potasio y sodio, carbonatos, nitratos, bicarbonatos, cloruros y sulfatos.

RESUMEN

La implementación de un sistema de control de parámetros fisicoquímicos del agua de alimentación de una caldera pirotubular inició con la investigación del flujo de proceso de la caldera pitotubular. Identificación de agua de ingreso, equipos para el pretratamiento, puntos de muestreo; de variables fisicoquímicas de control involucradas: pH, temperatura, alcalinidad, dureza, fosfato, sílice y total de sólidos disueltos. Todas estas variables fisicoquímicas se eligieron debido a que son indicadores de las condiciones del agua de alimentación, además de ser utilizadas en el cálculo del índice de Langelier, el cual fue elegido en este estudio para determinar los efectos que puede tener el uso del agua en la caldera. Se establecieron las de mediciones necesarias para un muestreo representativo. Siendo estas doscientas mediciones realizadas cada una con una frecuencia diaria.

Se realizó un formato para registrar los resultados de las mediciones y el resultado del cálculo del índice de Langelier. Para los análisis de los parámetros se utilizó el equipo y químicos, parte de un kit de medición. Se realizó la planificación de las mediciones según la programación establecida en el área de calderas. Adicional a realizar las mediciones, se elaboró un manual de operación indicando el punto de muestra (estandarización) para realizar las mediciones de los parámetros fisicoquímicos, cálculo del índice de Langelier y verificación de cumplimiento con los límites aceptables. Se designaron los responsables de toma de muestra, análisis de parámetros fisicoquímicos, cálculo del índice de Langelier, interpretación y seguimiento de acciones correctivas para continuar con las revisiones luego de finalizado este estudio.

Los datos fisicoquímicos obtenidos: pH, temperatura, alcalinidad, dureza, sílice, fosfatos y total de sólidos disueltos fueron comparados con los límites aceptables según El manual de calderas industriales de la Universidad de Burgos en España. Se determinó que la alcalinidad, pH y el sílice no cumple con estos límites establecidos. Los sólidos disueltos se encuentran solo parcialmente dentro de norma. Los fosfatos y dureza se encuentran, en su totalidad, dentro de lo establecido. A partir de estas mediciones se procedió al cálculo del índice de Langelier de cada una de las mediciones donde el resultado se sale del rango permitido, específicamente indicando que el agua de alimentación se presenta como incrustante no corrosiva y esta debe ser tratada con un paso adicional previo al ingreso a la caldera.

Se estableció el sistema de control mediante la estandarización del procedimiento de toma de muestra, la determinación de la frecuencia, análisis y cálculos a realizar, además del registro para evidenciar los resultados de los parámetros y cálculo del índice de Langelier. Los resultados de los parámetros fisicoquímicos se evaluarán de acuerdo al manual de calderas industriales y el resultado del índice de Langelier mediante la tabla de interpretación incluida también en el manual de calderas. Se realizó el manual de monitoreo y control del agua de alimentación de la caldera, en el que detalla el alcance, procedimiento de toma de muestra, frecuencia, procedimiento de análisis, registro a utilizar, procedimiento de cálculo del índice de Langelier, interpretación del índice y acciones correctivas.

OBJETIVOS

General

Implementar un sistema de control de parámetros fisicoquímicos del agua de alimentación de una caldera pirotubular en una industria procesadora de alimentos.

Específicos

1. Monitorear los parámetros fisicoquímicos: dureza, alcalinidad, pH, fosfatos y sílice, para determinar los que puedan afectar el agua de alimentación de una caldera pirotubular.
2. Calcular el índice de saturación de Langelier para determinar el potencial de incrustación o corrosividad del agua.
3. Establecer un sistema de control constante para la revisión del agua de la caldera con el propósito de evitar problemas comunes.
4. Elaborar un manual de monitoreo y control del agua de alimentación de la caldera pirotubular que incluya procedimientos analíticos, sistemas de control de datos y propuesta de sistemas de acondicionamiento del agua cuando la calidad no cumple con los requisitos de operación.

HIPÓTESIS

- **Hipótesis de Trabajo:**

Es posible implementar un sistema de control de los parámetros fisicoquímicos: dureza, alcalinidad, pH, sílice, fosfatos y sólidos disueltos del agua de alimentación de una caldera pirotubular mediante la medición semianalítica de los mismos, el cálculo del índice de Langelier y la realización de manuales para establecer los análisis, el control de datos obtenidos y el acondicionamiento del agua en caso no cumplan los parámetros del agua con la calidad requerida.

- **Hipótesis Estadística:**

- **Hipótesis de Investigación (Hi)**

Se tiene un alto coeficiente de correlación para los resultados del cálculo del índice de Langelier para el monitoreo del agua de alimentación de la caldera.

- **Hipótesis Nula (Ho)**

No se tiene un alto coeficiente de correlación para los resultados del cálculo del índice de Langelier para el monitoreo del agua de alimentación de la caldera.

INTRODUCCIÓN

El control de parámetros fisicoquímicos del agua es un tema abordado en todos los ámbitos de ingeniería, ya sea en tratamiento de aguas residuales de procesos, en aguas de desecho hasta el tratamiento de aguas para uso en partes de procesos en la industria alimenticia. Su importancia cae en la necesidad de agua con propiedades y características adecuadas al proceso o equipo seleccionado. Una de las ramas más importantes en el tratamiento de agua, es el tratamiento de agua de alimentación de calderas, agua de la cual puede depender factores importantes como la eficiencia de la caldera y su correcto funcionamiento durante un período de vida adecuado. En este estudio se evaluará específicamente una caldera pirotubular, caracterizándose por el paso del medio de calentamiento (fuego generado a partir de la combustión del Bunker) dentro de los tubos y agua afuera de estos. El vapor generado por la caldera es vital para procesos térmicos dentro de los alimentos para dar una preforma y estabilidad física. Adicional, se garantiza la eliminación de patógenos y carga microbiológica que puede afectar la inocuidad alimentaria.

De cualquier forma el tratamiento de agua se ha convertido en un pilar de soporte de la carrera de ingeniería química, en la cual intervienen temas como técnicas cuantitativas, cualitativas, equipos para purificación y tratamiento, eficiencia de purificación, control de contaminantes sólidos y líquidos, entre otros. Un correcto control del agua de alimentación de la caldera incluye equipos y procedimientos de tratamiento, análisis cuantitativos o cualitativos periódicos, comparación con rangos de aceptación y procedimientos de emergencia.

Se creará un sistema de control para el manejo de agua de suministro de una caldera pirotubular utilizada en una industria procesadora de alimentos, realizando los análisis y procedimientos mencionados anteriormente, con el fin de obtener la clasificación o condición del agua y lograr colocarla dentro de parámetros establecidos para asegurar el buen funcionamiento del equipo y la vida útil del mismo.

1. ANTECEDENTES

La implementación de un control de parámetros fisicoquímicos es una actividad que se ha realizado para una gran cantidad de procesos.

Mediante el constante control de los parámetros fisicoquímicos que afectan el agua de la caldera, se ha podido determinar si la producción del vapor es eficiente o ineficiente y si tiene impacto sobre la inocuidad de los productos elaborados con este vapor. A continuación, se mencionará trabajos de graduación que relacionan al control de parámetros fisicoquímicos del agua de una caldera.

- En la carrera de ingeniería mecánica se han hecho trabajos de graduación sobre mantenimiento preventivos para el agua de las calderas, con el fin de reducir los parámetros fisicoquímicos que puedan ocasionar incrustaciones, corrosiones y oxidaciones en las tuberías de la caldera el cual no se pueda ver representado por la ineficiencia de la producción de vapor. Un ejemplo de ello es la tesis de la Universidad de San Carlos de Guatemala, elaborada por Alfredo Arnoldo Andrade López en el año 2005, Mantenimiento preventivo para calderas y circuitos de refrigeración en función del tratamiento del agua de alimentación.

- En ingeniería química se han realizado diversos trabajos de graduación para la evaluación de agua que puede ser utilizada para otros fines. En el 2008 se presentó en la Universidad de San Carlos de Guatemala, el trabajo de graduación sobre la determinación cuantitativa de la agresividad y dureza total del agua subterránea de uso industrial, a través del índice de Langelier considerando iones ajenos al sistema carbonato, presentado por Marco Junio Villar Alvarado.
- En el 2008, se presentó un proyecto final de EPS, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, elaborado por Gerson Jonathan Martínez de la Rosa, sobre la evaluación de la calidad del agua de proceso en un ingenio azucarero identificándolo como un punto crítico de control. Esto se realizó con el fin de minimizar los riesgos de una contaminación del azúcar.
- En el año 2012, se realizó una tesis de la Universidad de San Carlos de Guatemala sobre la evaluación de dos agentes ablandadores de agua y su mezcla para ajustar el índice de Langelier, elaborada por Heidi Vanessa Páez Chávez. La experimentación se realizó a nivel industrial que se llevó a cabo en 3 empresas de alimentos.
- En el año 2013, se realizó un trabajo de graduación en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, sobre un diseño de un sistema para el tratamiento de alimentación a la caldera para prevenir la corrosión en una planta de lácteos, elaborado por Alvaro Luis Colcha Cambal.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Química del agua

El agua está formada por dos átomos de hidrógeno (H) y un átomo de oxígeno (O) unidos mediante enlaces covalentes, de manera que la molécula tiene una forma triangular plana. Además, el agua se comporta como un dipolo, es decir, tiene dos regiones con una cierta carga eléctrica. Una de ellas es positiva y la otra negativa.

El agua es la sustancia en donde los puentes de hidrógeno son más efectivos, en su molécula, los electrones que intervienen en sus enlaces, están más cerca del oxígeno que de los hidrógenos y por esto se generan dos cargas parciales negativas en el extremo donde está el oxígeno y dos cargas parciales positivas en el extremo donde se encuentran los hidrógenos.

Los puentes de hidrógeno mantienen las moléculas de agua fuertemente unidas, formando una estructura compacta que la convierte en un líquido casi incompresible. Al no poder comprimirse puede funcionar en algunos animales como un esqueleto hidrostático, como ocurre en algunos gusanos perforadores capaces de agujerear la roca mediante la presión generada por sus líquidos internos. Estos puentes se pueden romper fácilmente con la llegada de otra molécula con un polo negativo o positivo dependiendo de la molécula o con el calor.

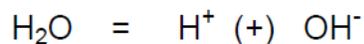
Su capacidad de disociación y la rápida emigración de los iones resultantes (H⁺ y OH⁻) explican la importancia crítica del pH en muchos

procesos biológicos. El agua se comporta como ácido y como base, ya que genera tanto H⁺ como OH⁻.

El agua es uno de los agentes ionizantes más conocidos. Puesto que todas las sustancias son, de alguna manera solubles en agua, se la conoce frecuentemente como el disolvente universal. El agua combina con ciertas sales para formar hidratos, reacciona con los óxidos de los metales formando ácidos y actúa como catalizador en muchas reacciones químicas importantes.

2.1.2. Equilibrio iónico

En el agua los iones se mantienen como tales con sus cargas eléctricas positivas para los cationes y negativas para los aniones, dotando al agua de un poder conductor eléctrico que no posee en su estado puro. El agua líquida es por sí sola un cuerpo débilmente ionizado, con una disociación molecular como lo muestra la siguiente reacción:



Para una temperatura determinada se cumple que el producto de las concentraciones de los iones es igual a una constante, función de la temperatura, cuyo valor es de 10⁻¹⁴ a 25°C. Se representa por concentraciones medidas en moles/litro.

$$[\text{H}^+] \times [\text{OH}^-] = 10^{-14}$$

Por igualdad de iones, el agua pura es aislante, es decir, prácticamente no conduce la corriente eléctrica. Para evitar cifras tan pequeñas se utiliza el valor de pH definido como:

$$\text{pH} = \log(1/[\text{H}^+])$$

El agua pura a 25°C tiene un valor de pH igual a siete. El grado de disociación y en consecuencia el pH varía con la temperatura. Indica la tendencia de acidez o alcalinidad de la solución, si ese valor es menor o mayor de siete respectivamente. En condiciones de acidez predominan los H⁺, y en solución alcalina predominarán los iones OH⁻. A pH = 7 la solución es neutra.

2.1.3. Disociación de electrolitos en soluciones acuosas

Dependiendo del grado de disociación, las sustancias ionizables pueden dividirse en electrolitos fuertes, los que se disocian completamente como el ácido clorhídrico; y electrolitos débiles, los que se disocian parcialmente como el ácido carbónico. Los electrolitos débiles tienen la particularidad que estando en solución acuosa, mantienen un equilibrio entre sus distintas formas de iones ácidos porque se disocian parcialmente.

2.1.4. Producto de solubilidad

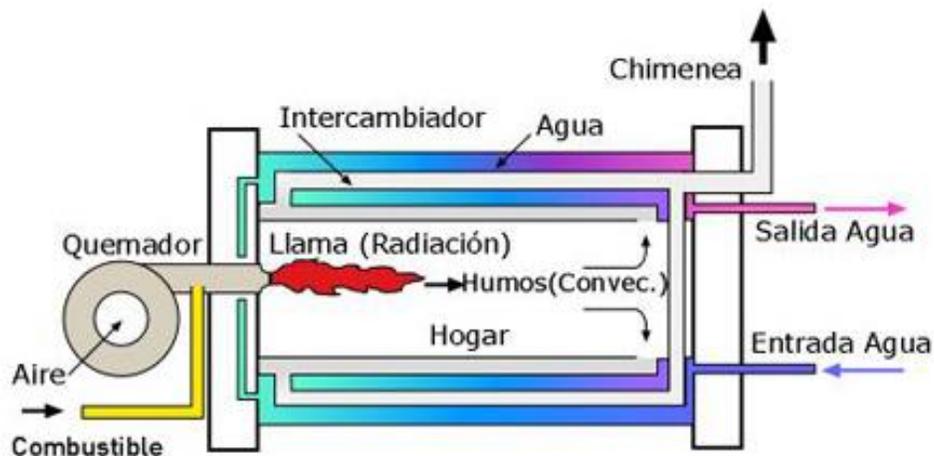
Una sustancia soluble en contacto con agua se disuelve hasta un límite en el que alcanza la saturación. Cuando se rebasa el producto de solubilidad, se tiende a precipitar las sustancias disueltas, y la solución pasa a estar sobresaturada.

2.2. Caldera

La caldera es un dispositivo utilizado para la producción de vapor por medio de transferencia de calor a una presión constante. La finalidad de este equipo es convertir el agua de alimentación en su fase líquida a su fase gaseosa obteniendo vapor saturado o sobrecalentado, por medio de la combustión de cualquier combustible, el cual proporciona la energía necesaria para romper los puentes de hidrógeno que permite el cambio de fase.

En su mayoría, la caldera es necesaria como fines industriales ya que el vapor generado puede ser utilizado como esterilización, calentamiento de otros fluidos, la generación de electricidad, entre otros.

Figura 1. Principios básicos de una caldera



Fuente: Caldera. <http://www.sogecal.com/mnk-2h-caldera-kestahl-de-2-hogares/>.

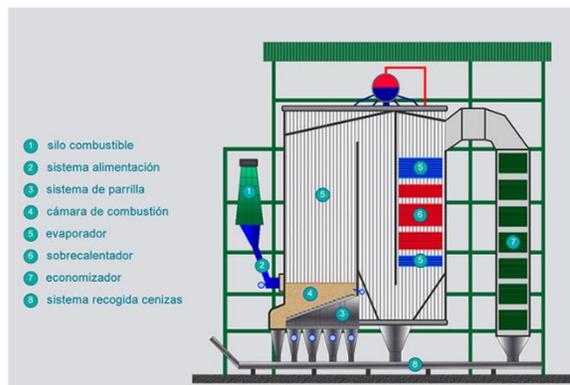
2.3. Tipo de calderas

Se clasifican según criterios relacionados con la disposición de fluidos y su circulación, el mecanismo de transmisión de calor, de intercambio de calor, la forma del quemado del combustible y de alimentación del agua, entre otros.

2.3.1. Calderas acuotubulares

Son utilizadas para obtener elevadas presiones y rendimiento. Su funcionamiento consiste que por el interior de los tubos pasa agua y es calentada por gases de combustión en contacto con las caras exteriores de los tubos.

Figura 2. **Caldera acuotubular y sus características**

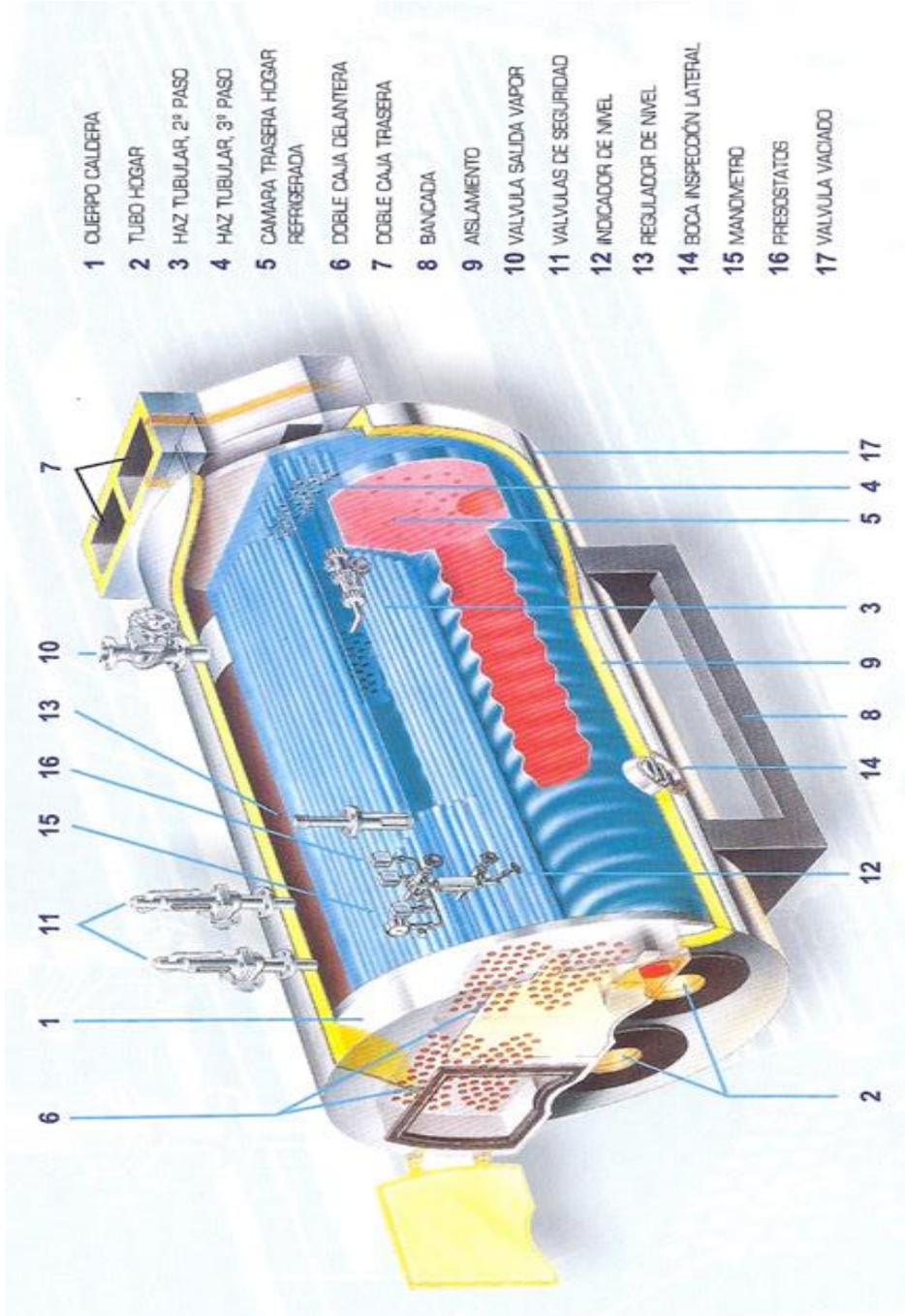


Fuente: Caldera. <http://www.sogecal.com/mnk-2h-caldera-kestahl-de-2-hogares/>.

2.3.2. Calderas piro-tubulares

En estas calderas los gases calientes pasan por el interior de los tubos, los cuales se hallan rodeados de agua. Generalmente tienen un hogar integral denominado: caja de fuego, tubo principal de humo o cámara de combustión, que está limitado por superficies enfriadas por agua.

Figura 3. Caldera pirotubular y sus características.



Fuente: Caldera. <http://www.sogecal.com/mnk-2h-caldera-kestahl-de-2-hogares/>.

2.4. Equipos auxiliares

Las calderas son utilizadas para que la energía de un combustible se transforme en calor para el calentamiento de un fluido. Las partes de una caldera son:

2.4.1. Quemador

Es un equipo en el que se genera la llama, mediante la combustión de la mezcla del combustible con el aire. Pueden ser atmosféricos o de tiro forzado (con ventilador de aire).

Figura 4. **Quemador**



Fuente: Equipos Auxiliares. <http://www.empresaeficiente.com/es/catalogo-de-tecnologias/sistemas-de-calefaccion-calderas-y-equipos-terminales>.

2.4.2. Soplador

Es un dispositivo mecánico utilizado durante el funcionamiento, para la limpieza de las deposiciones de ceniza del lado de humos de la caldera de forma periódica. También se utiliza para retirar las deposiciones y mantener la eficiencia de la transferencia de calor, al tiempo que previenen las obstrucciones de los

pasos de humos, estos aparatos proyectan, a través de sus toberas un medio de limpieza contra la ceniza acumulada en las superficies de transferencia de calor.

Figura 5. **Soplador**



Fuente: Equipos Auxiliares. <http://www.empresaeficiente.com/es/catalogo-de-tecnologias/sistemas-de-calefaccion-calderas-y-equipos-terminales>. Fecha de consulta: 22/07/2015

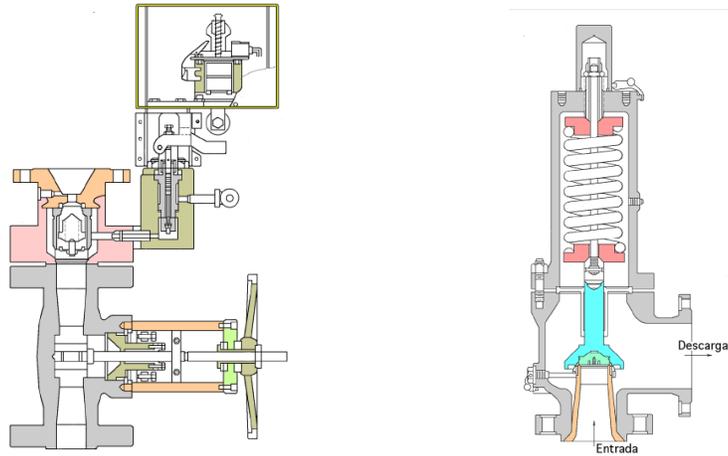
2.4.3. Válvula de seguridad y desahogo

La válvula más crítica en una caldera es la de seguridad; su misión es limitar la presión interna de la caldera en un punto que esté dentro de un nivel seguro de operación; para ello se instalan una o más válvulas de seguridad en el sistema de partes a presión de la caldera, sin que se puedan aislar del recinto que ocupa el vapor.

Las válvulas tienen que estar taradas para que se activen a las presiones aceptadas para el punto de ajuste, y para que se cierren cuando la presión caiga hasta un determinado nivel.

Una válvula de desahogo es de acción automática para tener regulación automática de la presión. El uso principal de esta válvula es para servicio no comprimible y se abre conforme aumenta la presión.

Figura 6. Válvulas



a) Válvula de Seguridad

b) Válvula de Desahogo

Fuente: Equipos Auxiliares. <http://www.empresaeficiente.com/es/catalogo-de-tecnologias/sistemas-de-calefaccion-calderas-y-equipos-terminales>.

2.4.4. Chimenea

Para lograr la combustión completa de los combustibles se necesitan unos flujos de aire y de humos adecuados, que se crean y mantienen por medio de chimeneas y ventiladores que producen la diferencia de presión necesaria. El tiro es la diferencia entre la presión atmosférica y la presión estática de los humos en el hogar, en el paso de humos de la caldera, en un conducto o en una chimenea.

La chimenea debe ser de sección constante en todo su recorrido, pudiendo ser circular, cuadrada, rectangular u ovalada. Las superficies interiores de la chimenea deben ser lisas; en la salida de la chimenea al exterior no deben existir edificaciones cercanas.

Figura 7. **Chimenea**



Fuente: Equipos Auxiliares. <http://www.empresaeiciente.com/es/catalogo-de-tecnologias/sistemas-de-calefaccion-calderas-y-equipos-terminales>.

2.4.5. Condensador

Un condensador es un intercambiador de calor latente que convierte el vapor en vapor en estado líquido. El propósito es condensar la salida de vapor de la turbina de vapor para así obtener máxima eficiencia e igualmente obtener el vapor condensado en forma de agua pura de regreso a la caldera. Condensando el vapor del extractor de la turbina de vapor, la presión del extractor es reducida arriba de la presión atmosférica hasta debajo de la presión atmosférica, incrementando la caída de presión del vapor entre la entrada y la salida de la turbina de vapor. Esta reducción de presión, genera más calor por unidad de masa de vapor entregado a la turbina de vapor, por conversión de poder mecánico.

Figura 8. **Condensador**



Fuente: Equipos Auxiliares. <http://www.empresaeiciente.com/es/catalogo-de-tecnologias/sistemas-de-calefaccion-calderas-y-equipos-terminales>.

2.4.6. **Suavizador**

Es un dispositivo que por medios mecánicos, químicos y electrónicos le da tratamiento al agua de alimentación de una caldera para reducir el contenido de sales minerales que puedan provocar incrustaciones en tuberías.

Figura 9. **Suavizador**



Fuente: Equipos Auxiliares. <http://www.empresaeiciente.com/es/catalogo-de-tecnologias/sistemas-de-calefaccion-calderas-y-equipos-terminales>.

2.5. Materiales utilizados para fabricar las calderas

Los tubos y la carcasa para calderas se fabrican con materiales aptos para soportar altas temperaturas y altas presiones. Durante los procesos de producción y las pruebas de inspección se satisfacen los requisitos técnicos más estrictos, a fin de garantizar la durabilidad y confiabilidad del producto durante toda su vida útil.

Se describe los trabajos de fabricación de las piezas importantes que forman una caldera:

- Base: generalmente se construye con una plancha metálica de espesor, forma y dimensiones adecuadas.
- Hogar: el material que lo compone debe resistir la llama directa. Se construye esta pieza con chapa de aluminio, acero galvanizado o cobre.
- Caldera: está fabricada en acero inoxidable o cobre. Para reparar o construir calderas es más práctico y económico este último material. Para las tapas de la caldera se pueden usar bridas ciegas para los diámetros citados o se pueden fabricar coronas adaptables a estos tubos a partir de chapa de cobre dúctil.
- Orificio de llenado y tapón de la caldera: se puede recurrir a un canutillo de latón con rosca exterior para madera de 8 mm y roca interior M6 cuyo tapón será un tornillo cincado y arandela M6.
- La hornilla o cazoleta: que contiene el combustible puede fabricarse con un segmento de tubo de cobre rígido de 35 mm. El mango de la hornilla puede hacerse con una varilla de latón que se soldará al segmento.

2.6. Condiciones del agua de alimentación en una caldera

La composición del agua que se alimenta a la caldera debe ser tal que las impurezas presentes en la misma se puedan concentrar un número razonable de veces dentro del sistema sin que por ello se superen los límites permitidos por el fabricante. Si el agua no cumple este requisito será necesario tratarla para eliminar todas las impurezas antes de utilizarla.

Para el agua de alimentación de una caldera se recomiendan estos límites:

Tabla I. **Límites recomendados para agua de alimentación de una caldera**

Presión de caldera	Sólidos totales, ppm	Alcalinidad total, ppm como CaCO ₃	Sílice, ppm como SiO ₂	Dureza, ppm como CaCO ₃	Hierro, ppm como Fe	Cobre, ppm como Cu	Oxígeno, ppm como O ₂
0-300	3 500	700	70-50	0-1 Máx.	0,1	0,05	0,007
310-450	3 000	600	50-40	0-1 Máx.	0,1	0,05	0,007
451-600	2 500	500	45-35	0-1 Máx.	0,1	0,05	0,007
601-750	2 000	400	35-25	0-1 Máx.	0,05	0,03	0,007
751-900	1 500	300	20,0-8,0	0-1 Máx.	0,05	0,03	0,007
901 -1 000	1 250	250	10,0-5,0	0-1 Máx.	0,05	0,03	0,007
1 001 -1 500	1 000	200	5,0-2,0	0	0,01	0,005	0,007
1 501 -2 000	750	150	3,0-0,8	0	0,01	0,005	0,007
2 001 -2 500	500 (4)	100	0,4-0,2	0	0,01	0,005	0,007
2 501 -3 000	500 (4)	100	0,2-0,1	0	0,01	0,005	0,007

La materia orgánica del agua de alimentación debería ser cero y el pH, en el rango de 8,0 a 9,5. (2)

referencias y notas:

1. American Boiler Manufacturers Assoc. Manual de 1958
2. Por encima de 600 psig, el nivel de sílice seleccionado para producir vapor con 0,02 ppm SiO₂
3. Publicaciones Badcock&Wilcox:(a) Tratamiento de agua para calderas industriales, BR-884, 8-68; y (b) J. A. Lux, <Control de calidad de calderas en la planta de vapor de alta presión>, 9/62.
4. J.A. Lux, 3(b), recomienda niveles tan bajos como 15 ppm de sólidos totales disueltos por encima de 2 000 psig.

Límites de impurezas recomendados por un comité investigador de ASME, para el agua de alimentación y el agua de calderas, para calderas a diferentes presiones de trabajo.

Fuente: Manual de calderas industriales universidad de burgos.

https://www.academia.edu/25840481/Manual_de_Calderas.

2.7. Control de parámetros fisicoquímicos

El tratamiento del agua de alimentación y del agua contenida en las calderas representa una gran necesidad para garantizar una eficiente producción de vapor y evitar problemáticas como las incrustaciones y la corrosión.

Los principales parámetros involucrados en el tratamiento del agua de una caldera, son los siguientes:

2.7.1. pH

El pH es una medida de la concentración de iones hidrógeno que determina si una solución es ácida o alcalina y esto nos puede indicar en como afecta a los usos específicos del agua.

La mayoría de aguas naturales tienen un pH entre 6 y 8. Su medición se realiza fácilmente con un potenciómetro calibrado, por titulación o por papel específico para su medición. La neutralización es una forma de corregir el pH de una solución.

2.7.2. Dureza

La dureza del agua cuantifica, principalmente, la cantidad de iones de calcio y magnesio presentes en el agua así como también los carbonatos, los que favorecen la formación de depósitos e incrustaciones difíciles de remover sobre las superficies de transferencia de calor de una caldera.

La dureza indica la presencia de impurezas relativamente insolubles. Estas se clasifican en: sólidos disueltos, gases disueltos y sólidos en suspensión.

Existen dos tipos de dureza:

2.7.2.1. Dureza temporal

Está determinada por el contenido de carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio. Puede ser eliminada por ebullición del agua y posterior eliminación de precipitados formados por filtración, también se le conoce como Dureza de carbonatos.

Cuando el agua es calentada, el CO₂ se libera como gas y se forman precipitados insolubles de carbonato de calcio y de hidróxido de magnesio:



La reacción de equilibrio cuando el carbonato cálcico se disuelve en un medio acuoso.



2.7.2.2. Dureza permanente

Está determinada por todas las sales de calcio (Ca⁺) y magnesio (Mg⁺²) excepto carbonatos y bicarbonatos. No puede ser eliminada por ebullición del agua y también se le conoce como Dureza de no carbonatos. La forma de tratarlos es por medio de intercambio iónico:

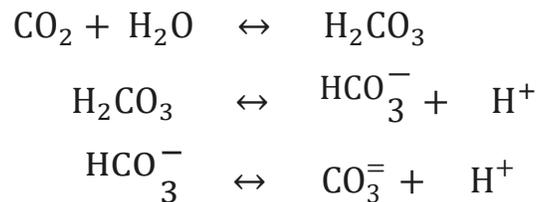


R, representa la resina. La reacción para el magnesio es idéntica.

2.7.3. Alcalinidad

La alcalinidad es una medida de la capacidad para neutralizar ácidos. Contribuyen a la alcalinidad principalmente los iones bicarbonato, CO_3H^- , carbonato, $\text{CO}_3^{=}$, y oxhidrilo, OH^- , pero también los fosfatos y ácido silícico u otros ácidos de carácter débil. Los bicarbonatos y los carbonatos pueden producir CO_2 en el vapor, que es una fuente de corrosión en las líneas de condensado. También pueden producir espumas, provocar arrastre de sólidos con el vapor y fragilizar el acero de las calderas.

La alcalinidad se corrige por descarbonatación con cal; tratamiento con ácido, o desmineralización por intercambio iónico.



2.7.4. Fosfatos

El ión fosfato, $\text{PO}_4^{=}$, en general forma sales muy poco solubles y precipita fácilmente como fosfato cálcico. Al corresponder a un ácido débil, contribuye a la alcalinidad de las aguas.

2.7.5. Sílice

La sílice tiene mucha importancia en los usos industriales porque forma incrustaciones en las calderas y sistemas de refrigeración. Su eliminación se consigue parcialmente por precipitación pero fundamentalmente mediante resina de intercambio iónico fuertemente básico.

2.7.6. Sólidos disueltos totales

Son compuestos inorgánicos que se encuentran en el agua, como sales, metales pesados y algunos rastros de compuestos orgánicos que se disuelven en el agua. Las sales inorgánicas comunes que se pueden encontrar en el agua incluyen calcio, magnesio, potasio y sodio, y carbonatos, nitratos, bicarbonatos, cloruros y sulfatos.

Algunas sustancias encontradas son las siguientes: Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , HCO_3^- , Cl^- , Br^- , I^- , SO_4^{-2} , NO_3 , PO_4^{-3} .

2.8. Problemas comunes de las calderas

Los mayores problemas en el rendimiento del circuito agua-vapor de las plantas están relacionados con la acumulación de depósitos. Una parte de los depósitos provienen del arrastre de los productos de corrosión generados en los sistemas previos a la caldera; otra parte proviene de la corrosión de los propios tubos de la caldera.

2.8.1. Incrustación

Las incrustaciones se deben fundamentalmente a las sales de calcio y magnesio que al calentarse se concentran y precipitan dando lugar a depósitos que forman una capa aislante que dificulta el intercambio de calor. Los efectos directamente ocasionados son:

- La reducción del coeficiente de transmisión de calor.
- La reducción de la sección libre de paso de fluido.
- La rotura de tubos por sobrecalentamiento, al ser el intercambio de calor menor.

Figura 10. **Incrustación en tuberías de una caldera**



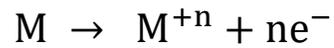
Fuente: Tratamiento de Agua para Calderas.
<http://norese.com/publicaciones/Tratamiento%20Agua%20Calderas.pdf>.

2.8.2. Corrosión

La corrosión es la reacción química o electroquímica que se produce entre un metal y el medio, que provoca su degradación y la pérdida de sus propiedades. Esta corrosión se produce por el oxígeno disuelto en el agua, por el dióxido de carbono o por ácidos. El ataque químico comienza en la superficie y se propaga hacia el interior. Diferentes zonas de la superficie metálica actúan como ánodo y cátodo. Los iones metálicos por difusión a través de la matriz metálica se oxidan en la zona anódica y los electrones, difundidos de igual modo, reaccionan en el oxígeno disuelto en la zona catódica.

Una reacción de corrosión puede expresarse parcialmente por la ionización de un metal, es decir, el proceso por el cual un átomo metálico pierde electrones y queda cargado con un exceso de cargas positivas

(iguales a las cargas negativas de los electrones que se perdieron). Dicha entidad cargada constituye un ión positivo o catión. Así pues:



Siendo M un metal de valencia n, M^{+n} su forma iónica y e^{-} el número de electrones cedidos.

Figura 11. **Corrosión en tubería de una caldera**



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

2.9. Determinación de problemas en la caldera:

Existen diferentes tipos de aguas y para poder establecer la mejor manera de tratar una en particular, es fundamental utilizar la teoría apropiada para determinar.

2.9.1. Índice de saturación de Langelier

El índice de saturación de Langelier es una fórmula que fue desarrollada a partir de estudios conducidos por el Dr. Wilfred Langelier a principios del siglo XX. Este índice funciona como sistema base para balancear el agua y los niveles de saturación. Es un modelo de equilibrio derivado del concepto teórico de saturación y proporciona un indicador para determinar el carácter incrustante o agresivo del agua.

El índice de saturación de Langelier, una medida de la capacidad de una solución para disolver o depositar carbonato de calcio, a menudo se usa como un indicador de la corrosividad del agua. El índice no está relacionado directamente con la corrosión, pero está relacionado con el depósito de una película o escala de carbonato de calcio. Esta cubierta puede aislar tuberías, calderas y otros componentes de un sistema del contacto con el agua. Cuando no se forma una escala protectora, el agua se considera agresiva y puede producirse corrosión. El agua altamente corrosiva puede causar fallas en el sistema debido al plomo disuelto y otros metales pesados. Un exceso de escala también puede dañar los sistemas de agua, lo que requiere reparación o reemplazo.

Al desarrollar el índice, Langelier obtuvo una ecuación para el pH al cual el agua está saturada con carbonato de calcio (pH_s). Esta ecuación se basa en las expresiones de equilibrio para la solubilidad del carbonato de calcio y la disociación del bicarbonato. Para aproximar las condiciones reales más de cerca, los cálculos de pH_s se modificaron para incluir los efectos de la temperatura y la fuerza iónica.

El índice de Langelier se define como la diferencia entre el pH real (medido) y los pH_s calculados. La magnitud y el signo del valor del índice muestran la tendencia del agua a formar o disolver escamas y, por lo tanto, a inhibir o fomentar la corrosión.

Aunque la información obtenida del índice de Langelier no es cuantitativa, puede ser útil para estimar los requisitos de tratamiento de agua para calderas de baja presión, torres de enfriamiento y plantas de tratamiento de agua. También sirve como un indicador general de la corrosividad del agua.

El índice de Langelier es un indicador de agua y si esta se precipitará o disolverá carbonato de calcio. Si el pH_s es igual al pH real, el agua se considera "equilibrada". Esto significa que el carbonato de calcio no se disolverá ni precipitará. Si el pH_s es menor que el pH real (el índice de Langelier es un número positivo), el agua tenderá a depositar carbonato de calcio y formará escamas. Si el pH es mayor que el pH real (el índice de Langelier es un número negativo), el agua no está saturada y disolverá el carbonato de calcio (agresivo).

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

A continuación, se presenta los parámetros fisicoquímicos con la clasificación si son controlables o dependientes.

Tabla II. **Variables**

Parámetros	Controlable/ No Controlable	Dependiente / Independiente
pH	No controlable	Independiente.
Dureza	No controlable	Independiente
Alcalinidad	No controlable	Independiente
Fosfatos	No controlable	Independiente
Sílice	No controlable	Independiente
Temperatura	No controlable	Independiente
Sólidos Disueltos	No controlable	Independiente

Fuente: elaboración Propia, empleando Excel.

3.2. Delimitación del campo de estudio

Se analizarán constantemente durante un periodo de tiempo, los parámetros fisicoquímicos de la caldera pirotubular utilizada en una empresa dedicada a la elaboración de alimentos.

3.3. Recursos humanos disponibles

Para la realización del presente trabajo se requiere de las siguientes personas:

- Investigadora: Blancandrea Divas Reynosa, encargada de implementar el sistema de control de los parámetros fisicoquímicos que pueden afectar el agua de alimentación de la caldera.
- Asesor: Ing. Jorge Mario Estrada, que guía al investigador para que la experimentación sea un éxito.

3.4. Recursos materiales disponibles

Para la determinación de los parámetros fisicoquímicos del agua de la caldera se tiene lo siguientes materiales:

3.4.1. Equipo de Laboratorio.

- Pipeta graduada 5 mL.
- 2 Beacker 100 mL.
- Mascarilla para polvo 3M
- Casco
- Lentes
- Guantes de latex
- Cofia de tela.

3.4.2. Kit de análisis

Se detallará el contenido del kit para análisis de agua:

- El kit contiene los siguientes reactivos almacenados en recipientes plásticos con goteros para tratar los parámetros fisicoquímicos:
 - Dureza total
 - Alcalinidad
 - Fosfato
 - Sílice
- Potenciómetro
- Medidor de TSD
- 4 probetas de 5 mL
- Un gotero de 3 mL
- Un termómetro

Figura 12. **Kit de análisis**



Fuente: Tratamiento de Agua para Calderas.

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

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa.

El índice de Langelier se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$IL = pH - pH_s$$

Ecuación No. 1 (Ref. no. 10)

Donde:

pH: pH medido del agua y

pH_s: es el pH del agua cuando está saturada con carbonato de calcio.

$$pH_s = 9.3 + a + b - c - d$$

Ecuación No. 2 (Ref. No. 10)

Donde:

a= función de los sólidos concentrados totales

b= función de la temperatura del agua

c= función del calcio como dureza (mg/L CaCO₃)

d= función de la alcalinidad al naranja de metilo

Cálculo del factor a:

$$a = \frac{\text{Log}(\text{TDS}) - 1}{10}$$

Cálculo del factor b:

$$b = -13,12 \log(T) + 34,55$$

Cálculo del factor c:

$$c = \log(C) - 0,4$$

Cálculo del factor d:

$$d = \log (A)$$

Donde:

TDS = sólidos totales disueltos (mg/L)

T = temperatura del agua en K

C = calcio como dureza (concentración de CaCO₃ mg/L)

A = Alcalinidad (concentración de CaCO₃ mg/L)

Con el índice de Langelier ya calculado, se procede a interpretarlo dependiendo de los resultados en la siguiente tabla:

Tabla III. **Interpretación del Índice de Langelier**

Índice de Langelier	Significado
-2,0 < IL < -0,5	Corrosión severa
-0,5 < IL < 0	Corrosión leve. No hay incrustación. Agua no saturada de carbonato de calcio.
IL = 0	Agua en equilibrio. Posibilidad de corrosión leve.
0,0 < IL < 0,5	Incrustación leve y corrosión. Agua saturada de carbonato de calcio.
0,5 < IL < 2	Incrustación sin corrosión.

Fuente: Tratamiento de Agua para Calderas.

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

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Para tener un mejor control de los datos, se utilizará un registro en donde estará detallada la fecha en que se hará la prueba, la hora, el responsable que hará la medición, qué parámetro va a medir, y por último la medición tomada.

Este registro se guardará en un cartapacio por 2 años de retención, donde estará ubicado en la oficina del Jefe de Ingeniería de la industria procesadora de alimentos.

3.8. Análisis estadístico

Se utiliza un modelo estadístico para determinar el número de pruebas convenientes a realizar durante la experimentación.

$$n = \frac{z^2 * p * (1 - p)}{e^2}$$

Ecuación no. (Referencia no. 3)

Donde:

n: el tamaño de la muestra que queremos calcular

Z: es la desviación del valor medio que aceptamos para lograr el nivel de confianza deseado. En función del nivel de confianza que se busca, se usará un valor determinado que viene dado por la forma que tiene la distribución de Gauss.

Los valores más frecuentes son:

Nivel de confianza 90 % -> Z=1,645

Nivel de confianza 95 % -> Z=1,96

Nivel de confianza 99 % -> Z=2,575

e = es el margen de error máximo que admito (5 %)

p = es la proporción que esperamos encontrar

Para este caso se utilizará un nivel de confianza del 95 % y un error de 5 %, esperando que nuestra proporción sea de 75 %.

$$n = \left(\frac{(1,96^2) * 0,85 * (1 - 0,85)}{0,05^2} \right) = 195,92$$

Entonces se requiere de 196 pruebas para la experimentación.

3.9. Plan de análisis de los resultados

Al tener los datos tabulados, se procede a una comparación con los límites máximos permisibles para determinar si el agua cumple con los requisitos.

Se elaborará manuales de operación y de mantenimiento en donde se detallará el procedimiento para el control de parámetros fisicoquímicos y se dará propuestas de solución en caso que el agua de alimentación de la caldera no cumpla con los normativos estipulados para la industria procesadora de alimentos.

4. RESULTADOS

4.1. Medición de parámetros fisicoquímicos del agua de alimentación de la caldera pirotubular.

Los parámetros fisicoquímicos necesarios para mantener la calidad del agua son: temperatura, pH, total de sólidos disueltos, dureza, alcalinidad, fosfato y sílice.

Tabla V. **Parámetros fisicoquímicos de agua de alimentación de la caldera.**

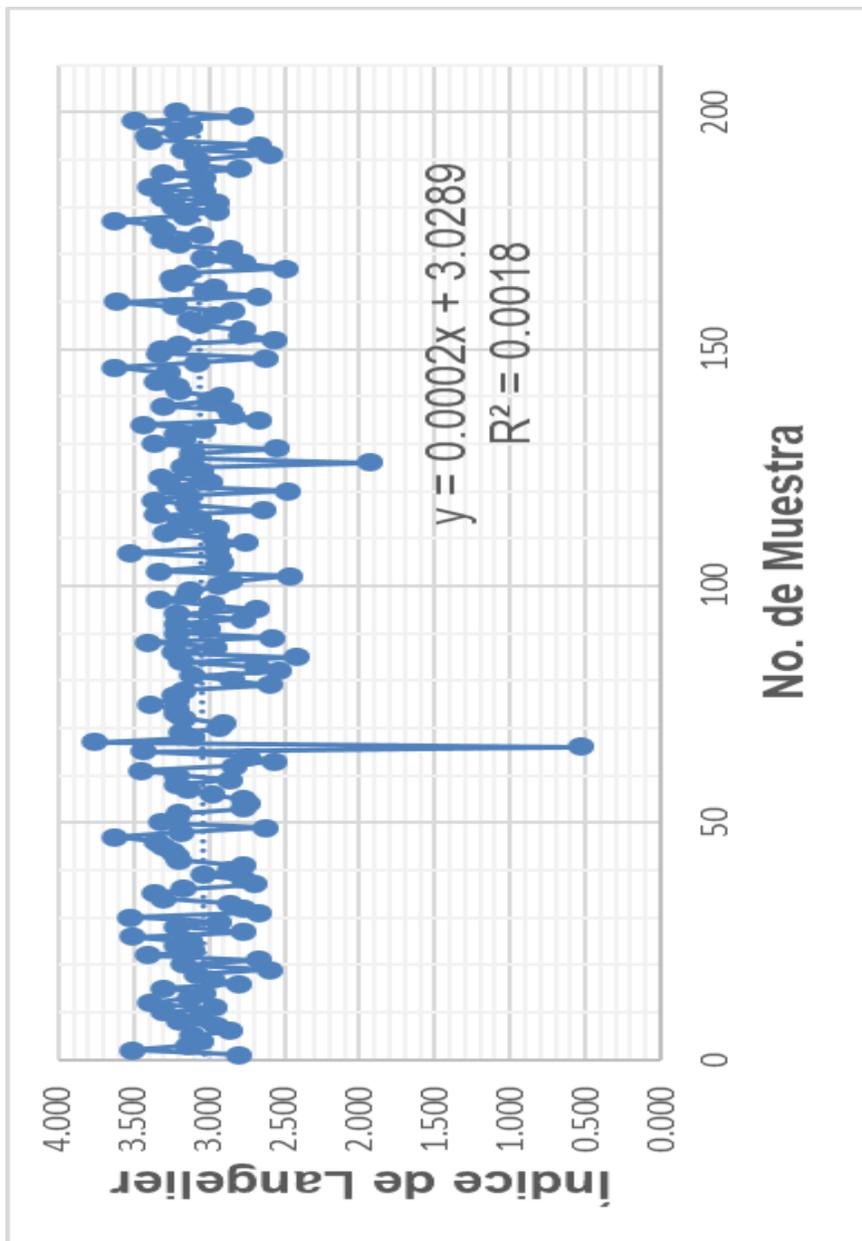
No.	Temperatura (K)	pH	TDS (ppm)	Dureza (ppm)	Alcalinidad M (ppm)	Fosfato (ppm)	Sílice (ppm)
1	308,15	11	3 200	0	785	36	110
2	343,15	11	3 200	0	795	35	115
3	333,15	11	2 800	0	770	36	110
4	328,15	11	3 200	0	790	36	110
5	332,15	11	3 000	0	770	35	100
6	318,15	11	2 640	0	750	35	110
7	328,15	11	2 800	0	765	35	110
8	343,15	11	3 000	0	770	35	115
9	328,15	11	3 100	0	775	35	110
10	343,15	11	2 800	0	770	35	110
11	323,15	11	3 120	0	790	36	110
12	348,15	11	3 200	0	790	37	115
13	326,15	11	2 900	0	780	36	110
14	338,15	11	2 300	0	775	35	110
15	338,15	11	3 200	0	745	35	110
16	308,15	11	3 200	0	785	36	110
17	318,15	11	2 800	0	780	36	110
18	313,15	12	3 200	0	785	36	110
19	308,15	11	3 000	0	785	35	110
20	318,15	12	3 200	0	785	35	110

Fuente: elaboración propia, empleando excel.

4.2. Determinación del índice de Langelier.

A continuación se grafica el comportamiento del índice de Langelier según mediciones.

Figura 13. **Determinación índice de Langelier**



Fuente: elaboración propia, empenado excel.

4.3. Manual de control de parámetros fisicoquímicos de agua de caldera

Se detalla el manual para el monitoreo constante de los parámetros fisicoquímicos del agua de alimentación de caldera.

4.3.1. Alcance

Todos los procedimientos, registros y controles establecidos en este manual existen con el objetivo de monitorear los parámetros fisicoquímicos del agua de caldera. En caso de cualquier desviación en los resultados, se tienen indicadas acciones correctivas.

4.3.2. Procedimiento de toma de muestra

La toma de muestra se hace directamente en el agua de alimentación después del suavizador, se deja drenar un tiempo y luego se reciben 100 ml.

4.3.3. Frecuencia

La toma de muestra y análisis de parámetros debe realizarse de forma diaria para asegurar que el agua de la caldera cumple con las especificaciones necesarias. El principal indicador de los parámetros será el índice de Langelier.

4.3.4. Personal involucrado

El personal encargado de la toma de muestra y análisis será el electromecánico, quien es el responsable del monitoreo y mantenimiento de la caldera. Este registro será revisado y validado por el supervisor de mantenimiento quien también será encargado del cálculo del índice de Langelier.

4.3.5. Llenado de los registros

El registro se llenará con lapicero, colocando la fecha, hora y responsable de la toma de muestra. La muestra será de 100 mL. Con esta se realizará la medición de temperatura, pH, total de sólidos disueltos, así como los análisis de dureza, alcalinidad M, fosfatos y sílice. Mediante estos resultados se calculará el índice de Langelier. En observaciones se debe colocar cualquier aspecto que se consideró relevante durante la toma de muestra.

4.3.6. Procedimientos

Se deben seguir los pasos descritos en los procedimientos proporcionados en el kit.

4.3.7. Medición de pH

Se realiza por medio de un potenciómetro:

Figura 14. **Medidor de pH digital**



Fuente: Área de calderas.

Sumersión directa a la muestra del agua, tomar lectura en los siguientes 45 segundos.

4.3.8. Medición de total de sólidos disueltos TSD

Se realiza por medio de un dispositivo específico para este parámetro:

Figura 15. **Medidor de TSD digital**



Fuente: Área de calderas.

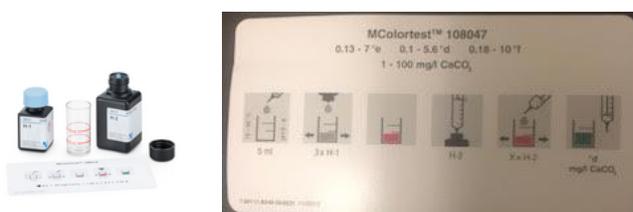
Sumersión directa a la muestra del agua, tomar lectura hasta detener la variación.

4.3.9. Medición de la dureza del agua

Toma de muestra 5 ml y aplicar 3 gotas reactivo H1

Aplicar pipeta de valoración con reactivo H2 y determinar el valor según valor marcado en la pipeta.

Figura 16. **Kit de dureza**



Fuente: Área de calderas

4.3.10. Medición de la alcalinidad

Toma de muestra de 5 ml

Aplicar 2 gotas de reactivo 1, vira a color amarillo

Aplicar luego reactivo 2 gota a gota hasta virar a rojo naranja

Determinar con pipeta de valoración (reactivo 3) hasta que la muestra vire a azul celeste.

Figura 17. **Kit de alcalinidad**



Fuente: Área de calderas.

4.3.11. **Medición de fosfatos y sílice**

Toma de muestras

Aplicar reactivo 1.

Aplicar reactivo 2.

Determinar por color el valor encontrado.

Figura 18. **Kit de fosfatos y sílice**



Fuente: Área de calderas

Donde:

a= es función de los sólidos concentrados totales.

b= es función de la temperatura del agua.

c= es función del calcio como dureza (mg/L CaCO₃).

d= es función de la alcalinidad al naranja de metilo.

Cálculo del factor a:

$$a = \frac{\text{Log}(\text{TDS}) - 1}{10}$$

Cálculo del factor b:

$$b = -13,12 \log(T) + 34,55$$

Cálculo del factor c:

$$c = \log(C) - 0,4$$

Cálculo del factor d:

$$d = \log (A)$$

Donde:

TDS = sólidos totales disueltos (mg/l).

T = temperatura del agua en °K.

C = calcio como dureza (concentración de CaCO₃ mg/l).

A = Alcalinidad (concentración de CaCO₃ mg/l).

Por último se procede al calculo del índice de Langelier:

$$IL = \text{pH} - \text{pH}_s$$

4.3.14. Interpretación de resultados

Con el calculo del índice de Langelier se procede a determinar el tipo de agua:

Tabla VII. Interpretación índice de Langelier

Índice de Langelier	Significado
$-2,0 < IL < -0,5$	Corrosión severa
$-0,5 < IL < 0$	Corrosión leve. No hay incrustación. Agua no saturada de carbonato de calcio.
$IL = 0$	Agua en equilibrio. Posibilidad de corrosión leve.
$0,0 < IL < 0,5$	Incrustación leve y corrosión. Agua saturada de carbonato de calcio.
$0,5 < IL < 2$	Incrustación sin corrosión.

Fuente: GERMAIN, Louis; COLAS, Luis. ROUQUET, Jean. Tratamiento de las aguas. p. 193.

4.3.15. Acciones correctivas

En caso de alguna desviación en los resultados del IL, se debe tomar la acción correspondiente.

Tabla VIII. Acciones correctivas según clasificación

IL	Significado	Acción a tomar
$-2,0 < IL < -0,5$	Corrosión severa	Ajustar pH ácido mediante dosificación de NaOH.

Continuación tabla VIII.

-0,5 < IL < 0	Corrosión leve. No hay incrustación. Agua no saturada de carbonato de calcio.	Ajustar pH ácido mediante dosificación de NaOH.
IL = 0	Agua en equilibrio. Posibilidad de corrosión leve.	N/A.
0,0 < IL < 0,5	Incrustación leve y corrosión. Agua saturada de carbonato de calcio.	Si los carbonatos presentes son cálcicos: revisión de batería de filtros de sílice para reducir carbonatos. Si los carbonatos presentes son magnésicos, dosificar lechada de CaOH al 5 %. Si los carbonatos son sódicos agregar CaCl. Ajustar pH de ser necesario con dosificación de NaOH.
0,5 < IL < 2	Incrustación sin corrosión.	Si los carbonatos presentes son cálcicos: revisión de batería de filtros de sílice para reducir carbonatos. Si los carbonatos presentes son magnésicos, dosificar lechada de CaOH al 5 %. Si los carbonatos son sódicos agregar CaCl.

Fuente: GERMAIN, Louis; COLAS, Luis. ROUQUET, Jean. Tratamiento de las aguas. P. 193.

5. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

La implementación del sistema de control de los parámetros fisicoquímicos de la caldera pirotubular se realizó en una industria procesadora de alimentos, ya que no se contaba con un estudio formal de los mismos y se desconocía el estado del agua de alimentación, lo cual ocasionaba en algunas veces la incrustación de la caldera y provocaba el constante mantenimiento del equipo.

Se empezó con la implementación de este monitoreo y control de parámetros mediante la toma de muestra diaria del agua de alimentación de la caldera, realizando un total de 200 muestreos y los análisis consecuentes de temperatura, dureza, alcalinidad, pH, fosfatos y sílice. En la tabla V se pueden observar los resultados de los análisis fisicoquímicos de todas las muestras tomadas. Como se puede observar en la tabla, la temperatura se mantuvo en un rango de 305,15 Kelvin a 363,15 Kelvin, el pH entre: 11 y 12, la cantidad de sólidos disueltos entre: 2 300 ppm y 4 100 ppm, la dureza se mantuvo constante en 0 ppm, la alcalinidad entre: 720 ppm y 800 ppm, los fosfatos entre: 34 ppm y 37 ppm y la sílice entre: 80 ppm y 125 ppm.

Al hacer comparación con la tabla I del marco teórico, tomando como referencia una presión de 80 psi, se puede observar que el promedio de los parámetros como la alcalinidad (menor a 700 ppm de acuerdo a la norma), el pH (entre 8 y 9) y la sílice (entre 50 a 75 ppm de acuerdo a la norma) se encuentran fuera del límite establecido. Algunas de las muestras de los datos de sólidos disueltos también se encuentran fuera de la norma (menor a 3 500 ppm). Los demás parámetros se encuentran dentro de especificación.

En la Figura 13 se observan en una gráfica todos los resultados del cálculo del índice de Langelier. Los resultados se encuentran dentro del rango de clasificación “incrustante no corrosiva”, al compararlo con la tabla de interpretación del Índice de Langelier descrita en la Tabla VII. La tendencia gráfica del índice de Langelier, se mantiene con datos variables pero dentro del rango mencionado anteriormente. Este comportamiento se debe a que la alcalinidad no está dentro de los límites aceptables, por lo que influye en el resultado del índice de Langelier. Se tuvieron dos puntos desfasados, con resultados de 0,5 y 1,9 que representan los días en que se realizó el mantenimiento trimestral de la caldera. Los valores calculados del índice de Langelier se encuentran en un rango de 0,5 a 3,8. El coeficiente de correlación de la gráfica fue de 0,0018, por lo que no se observa una tendencia correlativa entre los resultados obtenidos.

Se realizó un manual de control de los parámetros, donde se estableció el alcance del documento siendo esta solamente para el proceso investigado en la planta de alimentos evaluada. Se dejaron definidos los responsables de la toma de muestra, control que llevará de ahora en adelante el área de mantenimiento. Así mismo se definieron los responsables de la realización de análisis y del cálculo de índice de Langelier. Se dejó establecida la frecuencia de toma de muestra diaria, tal como se había estado trabajando; esta puede ser modificada de ser necesario por el encargado de mantenimiento. Se dejó el procedimiento de toma de muestra de agua, indicando el punto adecuado para asegurar un proceso estandarizado. Se redactaron los procedimientos para hacer los análisis, de acuerdo a los “Kits” entregados por el proveedor. Se adjuntó el registro que debe ser utilizado para colocar los resultados obtenidos de los análisis de los parámetros, adicional se estableció un procedimiento para llenarlos. Se dejó la ecuación para calcular el índice de Langelier, así como la explicación de la forma de realizar los cálculos para determinarlo. Se dejó la tabla de implementación del índice resultante del cálculo y la clasificación del agua de

de acuerdo a este. Se dejaron definidas las acciones correctivas correspondientes dependiendo del resultado de los cálculos del índice de Langelier para cada muestreo. En algunos casos la tabla requiere pretratamientos con los que no se cuentan en la planta de tratamiento actual . El área de mantenimiento y producción de la planta evaluada deben considerar la implementación o no de los equipos adicionales con el objetivo de mejorar las condiciones del agua y reducir los efectos adversos en la caldera pirotubular evaluada. No se dejó un procedimiento establecido para la realización de acciones preventivas, sin embargo , estas deberán de realizarse y documentarse según lo vea necesario el encargado de mantenimiento.

Este manual se dejó a cargo del supervisor de mantenimiento para que le dé seguimiento a todo el estudio realizado con el objetivo de que este sistema de monitoreo se continúe para mejorar el desempeño global de la caldera pirotubular.

CONCLUSIONES

1. Se tomaron doscientas muestras con periodicidad diaria, para realizar los análisis de los parámetros fisicoquímicos: dureza, pH, alcalinidad, total de sólidos disueltos, fosfatos y sílice, esto del agua de alimentación de la caldera pirotubular. De estos los parametros de alcalinidad, pH y sílice se encuentran fuera de especificación en todos sus datos. De sólidos disueltos solo parte de los datos se encuentran sobre la norma. Los parámetros de dureza y fosfatos se encuentran dentro del rango de acuerdo al Manual de calderas industriales.
2. El cálculo del índice de saturación de Langelier se realizó con los resultados de la medición de los parámetros fisicoquímicos del agua. El resultado del cálculo del índice de Langelier para todas las muestras tomadas corresponden a la clasificación de agua incrustación sin corrosión.
3. Fue realizado el sistema de control mediante la estandarización del procedimiento de toma de muestra, la determinación de la frecuencia, análisis y cálculos a realizar, además del registro para evidenciar los resultados de los parámetros y cálculo del índice de Langelier. Los datos obtenidos de los parámetros fisicoquímicos se evaluaron de acuerdo al manual de calderas industriales y el resultado del índice de Langelier mediante la tabla de interpretación también del Manual de calderas.

4. Se realizó el manual de monitoreo y control del agua de alimentación de la caldera, en el que se detalla el alcance, procedimiento de toma de muestra, frecuencia , procedimiento de análisis, registro a utilizar, procedimiento de cálculo del índice de Langelier, interpretación del índice y acciones correctivas.

RECOMENDACIONES

1. Considerar la medición de otros parámetros como cobre, oxígeno y hierro para realizar un monitoreo más completo según los parámetros establecidos para el agua de alimentación de la caldera en el Manual de calderas industriales de la Universidad de Burgos.
2. Establecer un método de análisis de parámetros como volumetría para determinar dureza y alcalinidad, gravimetría para determinación de sólidos disueltos totales, espectrofotometría para determinación de fosfatos, entre otros, eliminando los kits de medición rápida dados por el proveedor.
3. Capacitar continuamente al personal encargado de toma de muestras y realización de análisis para asegurar que la medición y sus resultados sean veraces.

BIBLIOGRAFÍA

1. CASTAÑEDA, Maria Belén. *Procesamiento de Datos y Análisis Estadístico*. 1a ed. México. 136 p.
2. GERMAIN, Louis; COLAS, Luis. ROUQUET, Jean. *Tratamiento de las aguas*. Fusté Munné, Carmen (trad.). Barcelona: Omega, 1982. 193 p.
3. JIMÉNEZ PÉREZ, Zully Elizabeth. *Determinación de la calidad del agua del río Sigüacán para consumo humano y uso industrial del municipio de Pueblo Nuevo Tiquisate*. Facultad de Ingeniería. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2003.
4. KOHAN, Anthony L, *Manual de Calderas*. Claudio Míguez Gómez, Traductor. Tomo II. Madrid: Editorial McGraw-Hill, S.A., 2000. 201 p.
5. LANE, Russell W., *Control de incrustaciones y corrosión en instalaciones hidráulicas de edificios*. México: McGraw-Hill, 1995. 277 p.
6. LARSON, T. E., *Langelier and Aggressive Indices*. [en línea] <<https://stpnq.com/wp-content/uploads/2014/08/Langelier-index.pdf>> [Consulta: octubre 2019]

7. MAGUIRE, J. J. *Equipos Auxiliares*. [en línea] <<http://www.empresaeficiente.com/es/catalogo-de-tecnologias/sistemas-de-calefaccion-calderas-y-equipos-terminales>> [Consulta: julio 2015]
8. MARTÍNEZ DE LA ROSA, Gerson Jonathan, *Evaluación de dos agentes ablandadores de agua y su mezcla para ajustar el índice de langelier en recirculación de aguas de enfriamiento y estabilizar parámetros químicos en calderas de vapor*. Facultad de Ingeniería. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2012.
9. POWELL, Sheppard. *Aguas naturales y sus impurezas. Acondicionamiento de aguas para la industria*. 1a ed. México: Limusa, 1966. 7 p.
10. OELKER BEHN, Arnulfo. *Tratamiento de Agua para Calderas*. [en línea] <<http://norese.com/publicaciones/Tratamiento%20Agua%20Calderas.pdf>> [Consulta: mayo 2015]
11. PRADA, Jeffer. *Manual de calderas industriales*, Universidad de Burgos. [en línea] <https://www.academia.edu/25840481/Manual_de_Caldera> [consulta: octubre 2019]
12. PULL, E. *Calderas de vapor*. Editorial Gustavo Gili, S.A., Barcelona, 1977. 182 p.

13. ROBINSON, R. A. *Caldera*. [en línea] < <http://www.sogecal.com/mnk-2h-caldera-kestahl-de-2-hogares/>> [Consulta: julio 2015]

14. VILLAR, Marco Junio, *Determinación cuantitativa de la agresividad y la dureza total del agua subterránea de uso industrial, en el área metropolitana de guatemala (región i), a través del índice de langelier considerando iones ajenos al sistema carbonato*. Facultad de Ingeniería. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2008.

APÉNDICES

Apéndice 1. Parámetros fisicoquímicos de agua de alimentación de la caldera

No.	Temperatura (K)	pH	TDS (ppm)	Dureza (ppm)	Alcalinidad M (ppm)	Fosfato (ppm)	Sílice (ppm)
1	308,15	11	3 200	0	785	36	110
2	343,15	11	3 200	0	795	35	115
3	333,15	11	2 800	0	770	36	110
4	328,15	11	3 200	0	790	36	110
5	332,15	11	3 000	0	770	35	100
6	318,15	11	2 640	0	750	35	110
7	328,15	11	2 800	0	765	35	110
8	343,15	11	3 000	0	770	35	115
9	328,15	11	3 100	0	775	35	110
10	343,15	11	2 800	0	770	35	110
11	323,15	11	3 120	0	790	36	110
12	348,15	11	3 200	0	790	37	115
13	326,15	11	2 900	0	780	36	110
14	338,15	11	2 300	0	775	35	110
15	338,15	11	3 200	0	745	35	110
16	308,15	11	3 200	0	785	36	110
17	318,15	11	2 800	0	780	36	110
18	313,15	12	3 200	0	785	36	110
19	308,15	11	3 000	0	785	35	110
20	318,15	12	3 200	0	785	35	110
21	318,15	11	4 000	0	800	35	110
22	343,15	11	3 500	0	780	36	110
23	338,15	11	2 400	0	750	34	95
24	343,15	11	3 040	0	790	35	110
25	333,15	11	2 980	0	760	36	110

Continuación del apéndice 1

No.	Temperatura (K)	pH	TDS (ppm)	Dureza (ppm)	Alcalinidad M (ppm)	Fosfato (ppm)	Sílice (ppm)
26	343,15	11	3 200	0	790	36	110
27	323,15	11	1 600	0	740	35	95
28	338,15	11	3 080	0	775	36	110
29	333,15	11	3 200	0	780	35	110
30	338,15	12	3 450	0	790	36	115
31	318,15	11	2 900	0	760	35	110
32	323,15	11	3 400	0	790	35	110
33	323,15	11	3 320	0	785	35	110
34	343,15	11	3 080	0	785	36	115
35	328,15	12	3 500	0	810	36	118
36	323,15	11	3 200	0	790	37	120
37	313,15	11	2 800	0	790	35	105
38	318,15	11	2 900	0	780	35	100
39	333,15	11	2 800	0	770	36	100
40	323,15	11	2 600	0	750	35	110
41	318,15	11	2 900	0	760	36	100
42	343,15	11	2 720	0	750	35	105
43	338,15	11	2 600	0	760	35	110
44	333,15	11	3 200	0	790	35	115
45	343,15	11	3 200	0	765	36	110
46	358,15	11	2 900	0	775	35	110
47	363,15	11	3 200	0	780	35	110
48	348,15	11	2 800	0	760	35	100
49	343,15	11	1 600	0	760	33	80
50	338,15	11	3 200	0	780	36	110
51	343,15	11	3 000	0	790	35	115
52	343,15	11	2 700	0	760	36	110
53	323,15	11	2 920	0	785	35	110
54	316,15	11	2 900	0	790	35	105
55	323,15	11	2 600	0	780	35	115
56	335,15	11	3 120	0	780	35	110
57	333,15	11	3 200	0	775	35	115
58	343,15	11	3 000	0	780	35	115
59	328,15	11	3 000	0	785	35	110

Continuación del apéndice 1

No.	Temperatura (K)	pH	TDS (ppm)	Dureza (ppm)	Alcalinidad M (ppm)	Fosfato (ppm)	Sílice (ppm)
60	343,15	11	2 200	0	760	35	90
61	358,15	11	2 600	0	770	35	90
62	338,15	11	1 100	0	720	34	70
63	323,15	11	1 300	0	725	33	90
64	333,15	11	1 300	0	720	32	60
65	363,15	11	1 800	0	750	35	60
66	323,15	9	800	0	400	25	60
67	358,15	11	3 200	0	790	34	95
68	343,15	11	2 800	0	775	35	100
69	348,15	11	2 200	0	750	34	100
70	333,15	11	2 800	0	760	35	100
71	343,15	11	2 600	0	760	34	90
72	323,15	11	3 200	0	790	37	120
73	343,15	11	3 000	0	790	33	110
74	338,15	11	3 150	0	778	36	110
75	343,15	11	2 720	0	750	35	105
76	338,15	11	2 500	0	760	38	120
77	333,15	11	3 200	0	780	35	115
78	318,15	12	3 200	0	785	36	110
79	308,15	11	3 100	0	770	34	120
80	328,15	11	3 200	0	765	36	110
81	338,15	11	2 720	0	750	35	105
82	333,15	11	2 500	0	600	35	90
83	323,15	11	2 920	0	650	33	100
84	348,15	11	2 800	0	760	35	100
85	343,15	10	1 600	0	760	34	80
86	333,15	11	3 200	0	780	36	110
87	328,15	11	2 900	0	785	35	115
88	343,15	11	2 700	0	770	36	115
89	313,15	11	2 920	0	765	33	110
90	343,15	11	3 000	0	780	35	115
91	343,15	11	3 100	0	785	37	115
92	343,15	11	2 200	0	760	35	90
93	323,15	11	2 400	0	775	35	110
94	333,15	11	3 200	0	745	32	110

Continuación del apéndice 1

No.	Temperatura (K)	pH	TDS (ppm)	Dureza (ppm)	Alcalinidad M (ppm)	Fosfato (ppm)	Sílice (ppm)
95	308,15	11	3 200	0	760	36	115
96	318,15	11	2 650	0	780	36	110
97	333,15	11	3 200	0	785	37	115
98	333,15	11	2 800	0	770	36	110
99	333,15	11	3 150	0	765	38	115
100	327,15	11	3 000	0	770	35	100
101	318,15	11	2 700	0	750	35	110
102	323,15	11	2 730	0	780	35	90
103	349,15	11	3 400	0	850	40	95
104	333,15	11	1 650	0	740	35	100
105	338,15	11	3 080	0	770	36	110
106	333,15	11	3 200	0	780	37	110
107	338,15	12	3 500	0	800	36	110
108	323,15	11	2 900	0	760	35	110
109	323,15	11	3 400	0	780	36	110
110	327,15	11	3 300	0	850	35	110
111	343,15	11	3 080	0	740	36	110
112	328,15	11	2 860	0	770	34	110
113	343,15	11	3 000	0	770	35	115
114	329,15	11	3 100	0	780	35	105
115	343,15	11	2 800	0	850	36	110
116	323,15	11	3 100	0	740	36	110
117	333,15	11	2 800	0	790	36	105
118	328,15	12	3 220	0	790	37	110
119	333,15	11	3 000	0	770	35	95
120	318,15	11	3 000	0	780	35	110
121	343,15	11	2 260	0	850	35	90
122	338,15	11	2 300	0	700	34	105
123	338,15	11	3 200	0	770	35	110
124	328,15	11	3 120	0	790	36	110
125	343,15	11	2 720	0	700	35	105
126	339,15	10	2 500	0	600	34	95
127	348,15	11	3 025	0	650	33	95
128	338,15	11	2 780	0	760	35	100
129	338,15	11	1 600	0	780	34	85

Continuación del apéndice 1

No.	Temperatura (K)	pH	TDS (ppm)	Dureza (ppm)	Alcalinidad M (ppm)	Fosfato (ppm)	Sílice (ppm)
130	338,15	11	3 200	0	850	36	110
131	343,15	11	3 110	0	710	35	115
132	338,15	11	3 080	0	770	36	105
133	333,15	11	3 200	0	780	36	110
134	333,15	12	3 450	0	790	36	115
135	318,15	11	2 950	0	760	35	105
136	327,15	11	3 400	0	800	35	110
137	323,15	11	3 320	0	785	36	110
138	343,15	11	3 080	0	780	36	120
139	328,15	11	2 700	0	850	35	110
140	322,15	11	2 920	0	720	37	100
141	343,15	11	2 720	0	770	35	105
142	338,15	11	2 700	0	760	35	115
143	339,15	11	3 200	0	800	34	115
144	343,15	11	3 200	0	765	36	110
145	353,15	11	2 910	0	775	35	110
146	363,15	11	3 200	0	780	36	105
147	348,15	11	2 860	0	760	35	100
148	343,15	11	1 600	0	760	33	90
149	338,15	11	3 300	0	790	36	110
150	350,15	11	3 000	0	780	35	115
151	343,15	11	2 500	0	760	35	110
152	323,15	11	2 920	0	790	35	95
153	318,15	11	2 900	0	790	35	105
154	323,15	11	2 600	0	780	36	115
155	335,15	11	3 120	0	760	35	120
156	333,15	11	3 210	0	760	35	115
157	328,15	11	3 140	0	790	35	115
158	328,15	11	3 000	0	780	36	120
159	333,15	11	3 300	0	780	35	110
160	343,15	12	3 500	0	790	36	125
161	318,15	11	2 900	0	760	35	110
162	338,15	11	3 420	0	790	34	110
163	323,15	11	3 320	0	780	35	100
164	338,15	11	3 100	0	790	36	115

Continuación del apéndice 1

No.	Temperatura (K)	pH	TDS (ppm)	Dureza (ppm)	Alcalinidad M (ppm)	Fosfato (ppm)	Sílice (ppm)
165	328,15	11	3 500	0	780	36	118
166	323,15	11	3230	0	780	36	115
167	318,15	11	2 800	0	790	35	105
168	318,15	11	2 900	0	780	35	100
169	333,15	11	2 850	0	770	34	105
170	323,15	11	2 600	0	760	35	110
171	318,15	11	2 900	0	760	36	100
172	343,15	11	2 700	0	770	35	80
173	343,15	11	2 600	0	760	35	110
174	333,15	11	3 200	0	800	36	115
175	343,15	11	3 230	0	765	36	115
176	358,15	11	2 900	0	775	35	110
177	363,15	11	3 200	0	785	35	110
178	353,15	11	2 900	0	760	36	95
179	328,15	11	2 800	0	765	35	110
180	345,15	11	3 000	0	765	35	115
181	328,15	11	3 150	0	775	35	110
182	343,15	11	2 800	0	770	36	100
183	327,15	11	3 120	0	790	36	110
186	338,15	11	2 300	0	775	35	110
187	338,15	11	3 300	0	745	35	110
188	308,15	11	3 200	0	785	36	110
189	318,15	11	2 800	0	780	37	105
190	313,15	12	3 300	0	785	36	110
191	308,15	11	3 000	0	785	35	120
192	318,15	12	3 200	0	770	35	110
193	318,15	11	4 100	0	785	34	110
194	343,15	11	3 500	0	760	36	110
195	343,15	11	2 400	0	765	34	100
196	343,15	11	3 040	0	785	35	110
197	333,15	11	3 000	0	760	36	110
198	343,15	11	3 200	0	765	35	110
199	323,15	11	1 600	0	765	35	90
200	318,15	11	3 050	0	775	35	110

Fuente: Elaboración propia, empelando excel.

Apéndice 2. **Determinación del Índice de Langelier**

No.	a	b	d	pH de Saturación	Índice de Langelier
1	0,251	1,847	2,895	8,503	2,797
2	0,251	1,234	2,900	7,885	3,515
3	0,245	1,403	2,886	8,061	3,139
4	0,251	1,489	2,898	8,142	3,058
5	0,248	1,420	2,886	8,081	3,119
6	0,242	1,665	2,875	8,333	2,867
7	0,245	1,489	2,884	8,150	2,950
8	0,248	1,234	2,886	7,896	3,204
9	0,249	1,489	2,889	8,149	3,051
10	0,245	1,234	2,886	7,893	3,307
11	0,249	1,577	2,898	8,228	2,972
12	0,251	1,152	2,898	7,805	3,395
13	0,246	1,524	2,892	8,178	3,122
14	0,236	1,318	2,889	7,965	3,035
15	0,251	1,318	2,872	7,996	3,304
16	0,251	1,847	2,895	8,503	2,797
17	0,245	1,665	2,892	8,318	2,982
18	0,251	1,756	2,895	8,411	3,089
19	0,248	1,847	2,895	8,500	2,600
20	0,251	1,665	2,895	8,321	3,179
21	0,260	1,665	2,903	8,323	2,677
22	0,254	1,234	2,892	7,897	3,403
23	0,238	1,318	2,875	7,981	3,119
24	0,248	1,234	2,898	7,885	3,215
25	0,247	1,403	2,881	8,070	3,130
26	0,251	1,234	2,898	7,887	3,513
27	0,220	1,577	2,869	8,228	2,772
28	0,249	1,318	2,889	7,978	3,222
29	0,251	1,403	2,892	8,061	2,939
30	0,254	1,318	2,898	7,974	3,526
31	0,246	1,665	2,881	8,331	2,669
32	0,253	1,577	2,898	8,232	2,768

Continuación del apéndice 2.

No.	a	b	d	pH de Saturación	Índice de Langelier
33	0,252	1,577	2,895	8,234	2,866
34	0,249	1,234	2,895	7,888	3,312
35	0,254	1,489	2,908	8,135	3,365
36	0,251	1,577	2,898	8,230	3,170
37	0,245	1,756	2,898	8,403	2,697
38	0,246	1,665	2,892	8,320	2,780
39	0,245	1,403	2,886	8,061	3,039
40	0,241	1,577	2,875	8,243	2,857
41	0,246	1,665	2,881	8,331	2,769
42	0,243	1,234	2,875	7,903	3,197
43	0,241	1,318	2,881	7,979	3,221
44	0,251	1,403	2,898	8,056	3,244
45	0,251	1,234	2,884	7,901	3,299
46	0,246	0,991	2,889	7,648	3,352
47	0,251	0,912	2,892	7,570	3,630
48	0,245	1,152	2,881	7,816	3,184
49	0,220	1,234	2,881	7,874	2,626
50	0,251	1,318	2,892	7,977	3,323
51	0,248	1,234	2,898	7,885	3,215
52	0,243	1,234	2,881	7,897	3,203
53	0,247	1,577	2,895	8,228	2,772
54	0,246	1,701	2,898	8,350	2,750
55	0,241	1,577	2,892	8,226	2,774
56	0,249	1,369	2,892	8,026	2,974
57	0,251	1,403	2,889	8,064	3,136
58	0,248	1,234	2,892	7,890	3,210
59	0,248	1,489	2,895	8,142	2,858
60	0,234	1,234	2,881	7,888	3,212
61	0,241	0,991	2,886	7,646	3,454
62	0,204	1,318	2,857	7,965	2,835
63	0,211	1,577	2,860	8,228	2,572
64	0,211	1,403	2,857	8,057	2,743
65	0,226	0,912	2,875	7,562	3,438

Continuación del apéndice 2.

No.	a	b	d	pH de Saturación	Índice de Langelier
66	0,190	1,577	2,602	8,465	0,535
67	0,251	0,991	2,898	7,644	3,756
68	0,245	1,234	2,889	7,890	3,110
69	0,234	1,152	2,875	7,811	3,189
70	0,245	1,403	2,881	8,067	2,933
71	0,241	1,234	2,881	7,895	2,905
72	0,251	1,577	2,898	8,230	3,170
73	0,248	1,234	2,898	7,885	3,215
74	0,250	1,318	2,891	7,977	3,223
75	0,243	1,234	2,875	7,903	3,397
76	0,240	1,318	2,881	7,977	3,223
77	0,251	1,403	2,892	8,061	3,239
78	0,251	1,665	2,895	8,321	3,179
79	0,249	1,847	2,886	8,510	2,590
80	0,251	1,489	2,884	8,156	2,844
81	0,243	1,318	2,875	7,986	3,114
82	0,240	1,403	2,778	8,165	2,535
83	0,247	1,577	2,813	8,310	2,690
84	0,245	1,152	2,881	7,816	3,184
85	0,220	1,234	2,881	7,874	2,426
86	0,251	1,403	2,892	8,061	3,239
87	0,246	1,489	2,895	8,141	2,959
88	0,243	1,234	2,886	7,891	3,409
89	0,247	1,756	2,884	8,419	2,581
90	0,248	1,234	2,892	7,890	3,210
91	0,249	1,234	2,895	7,889	3,011
92	0,234	1,234	2,881	7,888	3,212
93	0,238	1,577	2,889	8,225	2,775
94	0,251	1,403	2,872	8,081	3,219
95	0,251	1,847	2,881	8,517	2,683
96	0,242	1,665	2,892	8,316	2,984
97	0,251	1,403	2,895	8,059	3,341
98	0,245	1,403	2,886	8,061	3,139
99	0,250	1,403	2,884	8,069	3,131

Continuación del apéndice 2.

No.	a	b	d	pH de Saturación	Índice de Langelier
100	0,248	1,507	2,886	8,168	2,932
101	0,243	1,665	2,875	8,334	2,866
102	0,244	1,577	2,892	8,228	2,472
103	0,253	1,136	2,929	7,759	3,341
104	0,222	1,403	2,869	8,055	2,945
105	0,249	1,318	2,886	7,980	2,920
106	0,251	1,403	2,892	8,061	2,939
107	0,254	1,318	2,903	7,969	3,531
108	0,246	1,577	2,881	8,242	2,958
109	0,253	1,577	2,892	8,238	2,762
110	0,252	1,507	2,929	8,129	2,971
111	0,249	1,234	2,869	7,914	3,286
112	0,246	1,489	2,886	8,148	2,952
113	0,248	1,234	2,886	7,896	3,204
114	0,249	1,472	2,892	8,129	3,071
115	0,245	1,234	2,929	7,850	3,350
116	0,249	1,577	2,869	8,257	2,643
117	0,245	1,403	2,898	8,050	3,150
118	0,251	1,489	2,898	8,142	3,358
119	0,248	1,403	2,886	8,064	3,136
120	0,248	1,665	2,892	8,321	2,479
121	0,235	1,234	2,929	7,840	3,260
122	0,236	1,318	2,845	8,009	2,991
123	0,251	1,318	2,886	7,982	3,318
124	0,249	1,489	2,898	8,141	3,059
125	0,243	1,234	2,845	7,933	3,167
126	0,240	1,301	2,778	8,063	1,937
127	0,248	1,152	2,813	7,887	3,113
128	0,244	1,318	2,881	7,982	3,118
129	0,220	1,318	2,892	7,946	2,554
130	0,251	1,318	2,929	7,939	3,361
131	0,249	1,234	2,851	7,932	3,168
132	0,249	1,318	2,886	7,980	3,220
133	0,251	1,403	2,892	8,061	3,039

Continuación del apéndice 2.

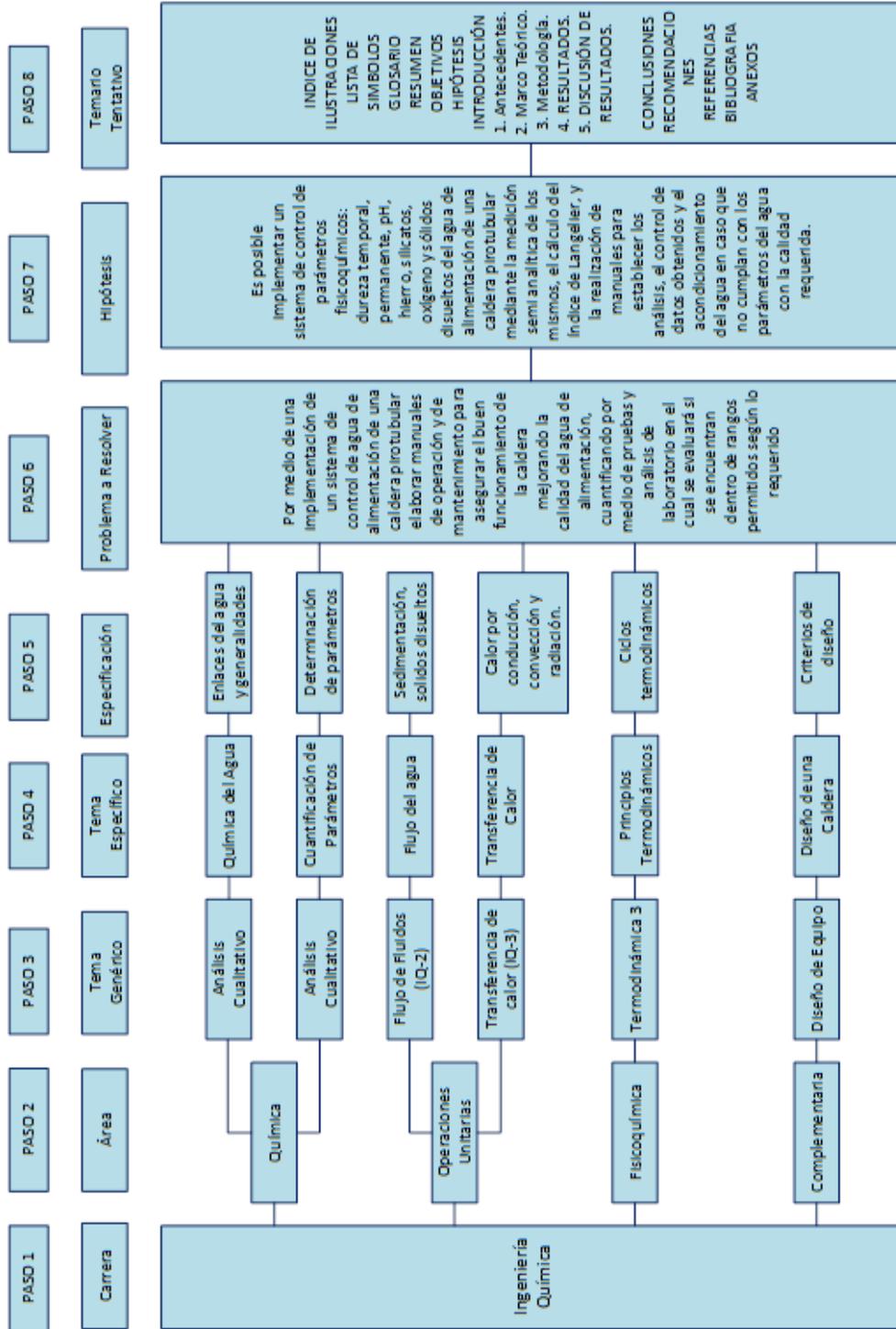
No.	a	b	d	pH de Saturación	Índice de Langelier
134	0,254	1,403	2,898	8,059	3,441
135	0,247	1,665	2,881	8,332	2,668
136	0,253	1,507	2,903	8,157	2,843
137	0,252	1,577	2,895	8,234	2,866
138	0,249	1,234	2,892	7,891	3,309
139	0,243	1,489	2,929	8,103	2,997
140	0,247	1,594	2,857	8,283	2,917
141	0,243	1,234	2,886	7,891	3,209
142	0,243	1,318	2,881	7,980	3,220
143	0,251	1,301	2,903	7,949	3,351
144	0,251	1,234	2,884	7,901	3,299
145	0,246	1,071	2,889	7,728	3,272
146	0,251	0,912	2,892	7,570	3,630
147	0,246	1,152	2,881	7,817	3,083
148	0,220	1,234	2,881	7,874	2,626
149	0,252	1,318	2,898	7,972	3,328
150	0,248	1,119	2,892	7,775	3,325
151	0,240	1,234	2,881	7,893	3,207
152	0,247	1,577	2,898	8,226	2,574
153	0,246	1,665	2,898	8,314	2,786
154	0,241	1,577	2,892	8,226	2,774
155	0,249	1,369	2,881	8,037	3,063
156	0,251	1,403	2,881	8,073	3,127
157	0,250	1,489	2,898	8,141	2,959
158	0,248	1,489	2,892	8,145	2,855
159	0,252	1,403	2,892	8,063	3,237
160	0,254	1,234	2,898	7,891	3,609
161	0,246	1,665	2,881	8,331	2,669
162	0,253	1,318	2,898	7,974	3,026
163	0,252	1,577	2,892	8,237	2,963
164	0,249	1,318	2,898	7,970	3,230
165	0,254	1,489	2,892	8,151	3,249
166	0,251	1,577	2,892	8,235	3,165
167	0,245	1,665	2,898	8,313	2,487

Continuación del apéndice 2.

No.	a	b	d	pH de Saturación	Índice de Langelier
168	0,246	1,665	2,892	8,320	2,780
169	0,245	1,403	2,886	8,062	3,038
170	0,241	1,577	2,881	8,237	2,863
171	0,246	1,665	2,881	8,331	2,869
172	0,243	1,234	2,886	7,891	3,209
173	0,241	1,234	2,881	7,895	3,305
174	0,251	1,403	2,903	8,050	3,050
175	0,251	1,234	2,884	7,902	3,298
176	0,246	0,991	2,889	7,648	3,352
177	0,251	0,912	2,895	7,567	3,633
178	0,246	1,071	2,881	7,736	3,164
179	0,245	1,489	2,884	8,150	2,950
180	0,248	1,201	2,884	7,865	3,235
181	0,250	1,489	2,889	8,150	2,950
182	0,245	1,234	2,886	7,893	3,307
183	0,249	1,507	2,898	8,158	3,042
184	0,252	1,152	2,898	7,806	3,394
185	0,246	1,489	2,892	8,143	3,057
186	0,236	1,318	2,889	7,965	3,035
187	0,252	1,318	2,872	7,998	3,302
188	0,251	1,847	2,895	8,503	2,797
189	0,245	1,665	2,892	8,318	3,082
190	0,252	1,756	2,895	8,413	3,087
191	0,248	1,847	2,895	8,500	2,600
192	0,251	1,665	2,886	8,329	3,171
193	0,261	1,665	2,895	8,332	2,668
194	0,254	1,234	2,881	7,908	3,392
195	0,238	1,234	2,884	7,889	3,411
196	0,248	1,234	2,895	7,888	3,212
197	0,248	1,403	2,881	8,070	3,130
198	0,251	1,234	2,884	7,901	3,499
199	0,220	1,577	2,884	8,213	2,787
200	0,248	1,318	2,889	7,977	3,223

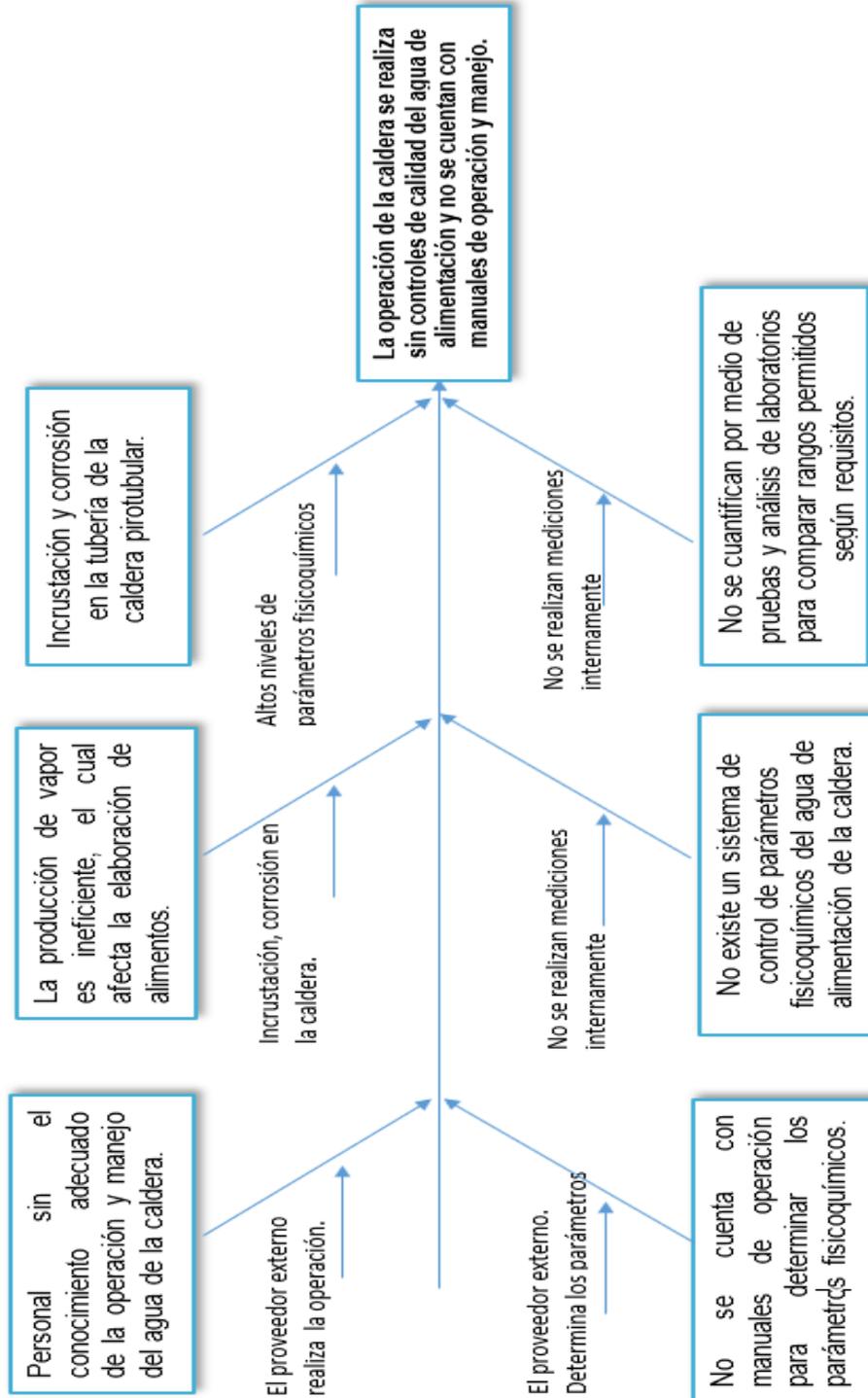
Fuente: Elaboración propia, emplenado excel.

Apéndice 3. Tabla de requisitos académicos



Fuente: elaboración propia, empleando visio.

Apéndice 4. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia, empleando word.