



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

**DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE PURGA EN EL BASÍN DE  
LA TORRE DE ENFRIAMIENTO EN UNA EMPRESA DE GENERACIÓN  
DE ENERGÍA A TRAVÉS DE LOS CICLOS DE CONCENTRACIÓN**

**José Rodrigo Arenas Juárez**

Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, junio de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE PURGA EN EL BASÍN DE  
LA TORRE DE ENFRIAMIENTO EN UNA EMPRESA DE GENERACIÓN  
DE ENERGÍA A TRAVÉS DE LOS CICLOS DE CONCENTRACIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JOSÉ RODRIGO ARENAS JUÁREZ**

ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, JUNIO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL I	
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

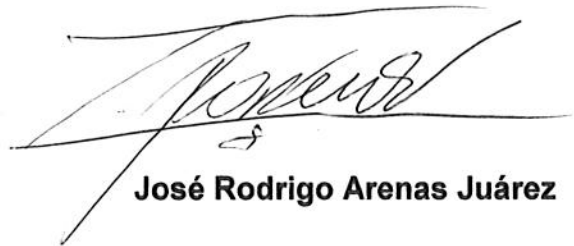
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Edwin Manuel Ortiz Castillo
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Víctor Herbert de León Morales
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## 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:

### **DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE PURGA EN EL BASÍN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO EN UNA EMPRESA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA A TRAVÉS DE LOS CICLOS DE CONCENTRACIÓN**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha enero de 2013.



**José Rodrigo Arenas Juárez**

Guatemala, 19 de Febrero 2015

Ingeniero

Victor Monzón

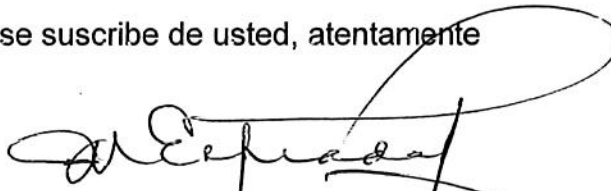
Director de Escuela

Presente

Estimado Ingeniero:

Por este medio hago constar mi conformidad con el Informe del Trabajo titulado **Determinación del caudal óptimo de purga en el basin de la torre de enfriamiento en una empresa de generación de energía a través de los ciclos de concentración**, presentado por el estudiante José Rodrigo Arenas Juárez, carné No. 2008-15302.

Sin ningún otro particular, se suscribe de usted, atentamente



Jorge Mario Estrada Asturias  
Ingeniero Químico Col. 685  
Profesor Titular  
Escuela de Ing. Química USAC  
Ing. Jorge Mario Estrada

Asesor



Guatemala, 15 de abril de 2015.  
Ref. EIQ.TG-IF.020.2015.

Ingeniero  
**Víctor Manuel Monzón Valdez**  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo 022-2013 le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

### INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **José Rodrigo Arenas Juárez**.  
Identificado con número de carné: **2008-15302**.  
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

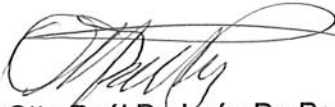
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

### DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE PURGA EN EL BASÍN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO EN UNA EMPRESA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA A TRAVÉS DE LOS CICLOS DE CONCENTRACIÓN

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Mario Estrada Asturias**.

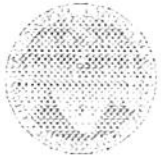
Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Ing. Otto Raúl De León De Paz  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.082.2015

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 del estudiante, **JOSÉ RODRIGO ARENAS JUÁREZ** titulado: "**DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE PURGA EN EL BASÍN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO EN UNA EMPRESA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA A TRAVÉS DE LOS CICLOS DE CONCENTRACIÓN**".  
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. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, junio 2015

Cc: Archivo  
VMMV/ale





DTG. 298.2015

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ÓPTIMO DE PURGA EN EL BASÍN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO EN UNA EMPRESA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA A TRAVÉS DE LOS CICLOS DE CONCENTRACIÓN**, presentado por el estudiante universitario: **José Rodrigo Arenas Juárez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Angel Roberto Sic García  
Decano

Guatemala, 30 de junio de 2015

/gdech





## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Santísima Trinidad**

Por haberme permitido lograr esta etapa de la vida, por su inmenso amor, por brindarme el regalo de la vida y sus bendiciones para mi familia, el trabajo, la salud y al brindarme el cariño de los amigos y compañeros.

### **Mi madre**

Estéfana Juárez, por ser mi guía, fortaleza, asesora espiritual y mi mejor amiga, por darme todo lo necesario y ser una bendición en mi vida. Por dar todo lo que estuviera a su alcance para que saliera a adelante.

### **La memoria de mi padre**

José Antonio Arenas, agradeciendo las bases brindadas en la familia, por su buen ejemplo de padre y el amor brindado durante su vida hacia su esposa e hijos.

### **Mis hermanos**

Elena María, Estefany Mariel y Antonio Josué Arenas Juárez, por ser mis compañeros de vida, mis grandes amigos y consejeros, por estar presente en todos los momentos importantes de mi vida.

### **Doctor Israel Rodríguez**

Por asesorarme en esta investigación y brindar su apoyo y cariño.

**Familia Juárez**

Por su cariño y apoyo a la vida y ser ejemplo de tenacidad y entrega en el trabajo.

**Mi trabajo**

En donde pongo en práctica los conocimientos adquiridos.

**Mis amigos**

Por su apoyo en todo momento, durante esta etapa de la vida.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Santísima Trinidad</b>	Por darme la oportunidad de hacer cumplir mis sueños, logrando permitir finalizar este proyecto.
<b>Mi madre</b>	Estéfana Juárez, por todo su apoyo económico, moral y espiritual durante la etapa universitaria.
<b>Pueblo de Guatemala</b>	Que con sus aportes tributarios, lograron cumplir mis metas académicas.
<b>Mis hermanos</b>	Elena María, Estefany Mariel y Antonio Josué Arenas Juárez, por su apoyo incondicional y cariño, asesorándome en las decisiones importantes durante la carrera.
<b>Doctor Israel Rodríguez</b>	Por asesorarme en esta investigación y brindar su apoyo y cariño.
<b>Mi trabajo</b>	Por ser la entidad que me permitió desarrollarme en las ramas de mi carrera.
<b>Mis amigos</b>	Por el apoyo durante este trayecto, brindándome alegría y fortaleza en todo momento.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN .....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
Hipótesis .....	XVIII
INTRODUCCIÓN .....	XIX
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Carbonera .....	3
2.1.1. Ciclo de Rankine.....	5
2.2. Torres de enfriamiento .....	7
2.2.1. Historia de las torres de enfriamiento .....	8
2.2.2. Clasificación de torres de enfriamiento .....	10
2.2.2.1. Circulación natural .....	10
2.2.2.2. Circulación mecánica.....	11
2.3. Ciclos de concentración .....	15
2.3.1. Factores limitantes ciclos de concentración.....	19
2.3.1.1. Limitaciones físicas.....	20
2.3.1.2. Limitaciones químicas .....	20
2.4. Índice de Langelier .....	21
2.4.1. Parámetros de medición .....	22
2.4.2. Interpretación.....	23

2.5.	Purga de agua .....	25
2.5.1.	Purga de fondo.....	26
2.5.2.	Purga continua .....	26
2.6.	Características fisicoquímicas del agua en torres de enfriamiento .....	27
2.6.1.	Dureza.....	27
2.6.1.1.	Dureza temporal.....	28
2.6.1.2.	Dureza permanente.....	28
2.6.2.	Las incrustaciones.....	29
2.6.3.	Acidez en el agua.....	30
2.6.4.	Cantidad de biocidas.....	30
2.7.	Problemas ocasionados por la calidad del agua .....	31
2.7.1.	Corrosión.....	31
2.7.2.	Precipitación de sólidos.....	33
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	35
3.1.	Variables .....	35
3.1.1.	Variables independientes .....	35
3.1.2.	Variables dependientes .....	35
3.2.	Delimitación del campo de estudio .....	36
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	36
3.4.	Recursos materiales disponibles .....	37
3.5.	Técnica cuantitativa .....	38
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	38
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información .....	41
3.7.1.	Determinación del índice de Langelier .....	41
3.7.2.	Determinación de los ciclos de concentración.....	42
3.7.3.	Determinación de la purga óptima .....	44

3.7.4.	Ahorro económico.....	46
3.8.	Análisis estadístico .....	46
3.8.1.	Determinación del número de corridas .....	47
3.8.2.	Análisis de las corridas .....	48
4.	RESULTADOS .....	49
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	59
	CONCLUSIONES .....	63
	RECOMENDACIONES .....	65
	BIBLIOGRAFÍA.....	67
	APÉNDICES .....	69
	ANEXOS .....	71



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Diagrama de la termoeléctrica de carbón.....	4
2.	Ciclo de Rankine de la planta termoeléctrica .....	6
3.	Diagrama del proceso de enfriamiento en una torre .....	8
4.	Torre de circulación natural.....	11
5.	Torre de circulación mecánica (tiro inducido).....	12
6.	Funcionamiento torre de enfriamiento, tiro inducido .....	12
7.	Funcionamiento torre de enfriamiento, tiro forzado.....	13
8.	Funcionamiento torre de enfriamiento, tiro cruzado con hélice lateral .....	14
9.	Funcionamiento torre de enfriamiento, tiro cruzado con hélice superior .....	15
10.	Corrosión en tuberías.....	33
11.	Precipitaciones en tuberías .....	34
12.	Colorímetro para la determinación de sílice .....	39
13.	Viraje del análisis de alcalinidad .....	40
14.	Viraje del análisis de dureza .....	40
15.	Índice de Langelier.....	49
16.	Ciclos de concentración .....	50
17.	Comportamiento del sílice en las pruebas .....	51
18.	Comportamiento de la conductividad en las pruebas.....	52
19.	Comportamiento de la dureza total en las pruebas.....	53
20.	Comportamiento de la dureza de calcio en las pruebas .....	54
21.	Comportamiento de la alcalinidad en las pruebas.....	55



22.	Caudal de purga .....	56
23.	Ahorro de agua .....	57
24.	Ahorro económico.....	58

## TABLAS

I.	Análisis de dureza .....	29
II.	Índice de Langelier .....	49
III.	Ciclos de concentración.....	50
IV.	Comportamiento del sílice en las pruebas.....	51
V.	Comportamiento de la conductividad en las pruebas .....	52
VI.	Comportamiento de la dureza total en las pruebas .....	53
VII.	Comportamiento de la dureza de calcio en las pruebas .....	54
VIII.	Comportamiento de la alcalinidad en las pruebas .....	55
IX.	Caudal de purga .....	56
X.	Ahorro de agua.....	57
XI.	Ahorro económico.....	58

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
pH	Acidez y/o alcalinidad de una sustancia
ac	Acuoso
MU	Caudal de agua de alimentación, en galones por minuto
BD	Caudal de purga, en galones por minuto
BDmáx	Caudal de purga en los ciclos de concentración máximos
CC	Ciclos de concentración
CCmáx	Ciclos de concentración máximos
Z $\alpha/2$	Confiabilidad estadística
$X_i$	Corrida a evaluar
$\Sigma$	Desviación estándar
$\Delta T$	Diferencias de temperaturas del agua, entrada y salida al sistema
E	Error estimado en la determinación de corridas
E	Evaporación de agua en torre de enfriamiento
F	Factor de evaporación
gal	Galones
Gpm	Galones por minuto
°F	Grados Fahrenheit
IL	Índice de Langelier
L	Líquido
L	Litro

<b><math>\mu\text{Mhos}</math></b>	Micro Mhos, medida de conductancia eléctrica
<b>Mg</b>	Miligramos
<b>N</b>	Normal, medición de concentración
<b>Nx</b>	Número de corridas
<b>N</b>	Número de corridas realizadas
<b>ppm</b>	Partes por millón
<b>pHs</b>	pH de saturación
<b>%</b>	Porcentaje
<b>P</b>	Probabilidad de éxito en cálculos estadísticos
<b>Qx</b>	Probabilidad de fracaso en cálculos estadísticos
<b><math>\bar{X}</math></b>	Promedio de datos
<b>Q</b>	Quetzal, moneda guatemalteca
<b>RR</b>	Recirculación de agua en torre de enfriamiento
<b><math>\sum x</math></b>	Sumatoria de todas las corridas realizadas
<b>T</b>	Temperatura, medida en grados Fahrenheit

## GLOSARIO

<b>Agua de refrigeración</b>	Agua que es utilizada para la condensación de vapor y disminución de temperatura del agua utilizada en calderas.
<b>Basín</b>	Parte del sistema de enfriamiento, que recibe el agua ya enfriada, para ser utilizada para enfriar en un sistema Rankine.
<b>BTU</b>	British Thermal Unit, representa la cantidad de energía que se requiere elevar un grado Fahrenheit la temperatura de una libra de agua en condiciones atmosféricas normales.
<b>Carbonera</b>	Es una instalación empleada en la generación de energía eléctrica, a partir de la energía liberada en forma de calor, mediante la combustión de carbón.
<b>Caudal</b>	Velocidad de volumen de sustancia, cantidad de sustancia por unidad de tiempo.
<b>Ciclos de concentración</b>	Concentración que se obtiene de sales en el agua de enfriamiento al realizar un ciclo dentro del sistema de enfriamiento.

<b>Ciclo de Rankine</b>	Es un ciclo de potencia representativo, del proceso termodinámico, que tiene lugar en la generación de energía por medio de vapor.
<b>Condensación</b>	Es el cambio de fase de la materia que se encuentra en forma gaseosa (generalmente vapores) y pasa a forma líquida.
<b>Conductividad</b>	Medición de la concentración total de iones de sales que se encuentran disueltos en el agua a analizar.
<b>Corrosión</b>	Deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno.
<b>Costo</b>	Es el gasto económico que representa la obtención de un producto o la prestación de un servicio.
<b>Disolución</b>	Mezcla homogénea, a nivel molecular o iónico, de dos sustancias, que no reaccionan entre sí.
<b>Dureza</b>	Cantidad de sales de calcio y magnesio que se encuentran en el agua evaluada.
<b>Eficiencia</b>	Capacidad para lograr un fin, empleando los mejores medios posibles.

<b>Humedad relativa</b>	Es la relación entre la masa real de vapor de agua en el aire comparada con la masa máxima posible de vapor de agua en el aire.
<b>Incrustación</b>	Es la acción y el efecto de cubrir un material con una costra de sustancia mineral abandonada por el agua que la contiene en disolución.
<b>Índice de Langelier</b>	Índice de determinación de la calidad del agua, de acuerdo a las incrustaciones y corrosividad que puede provocar en sistemas de enfriamiento.
<b>Método volumétrico</b>	Es un método analítico en los que una sustancia "analito" se determina a partir de la cantidad de reactivo estándar que se necesita para reaccionar completamente este.
<b>Oxidación</b>	Acción cuando un átomo inestable pierde un electrón, lo que permite que el átomo forme un compuesto nuevo con otro elemento.
<b>Purga</b>	Denominación que se le da al agua que es expulsada del sistema de enfriamiento, la cual no es apta para ser utilizada en el mismo.
<b>Sales</b>	Compuestos iónicos que contiene cationes diferentes al del hidrógeno ( $H^+$ ) y aniones diferentes al hidroxilo ( $OH^-$ ).

<b>Sistema de enfriamiento</b>	Sistema utilizado para enfriamiento de agua que es utilizada como refrigerante en un sistema Rankine.
<b>Solubilidad</b>	Medida de la capacidad de una sustancia para disolverse en otra.
<b>Temperatura</b>	Magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, se refiere a las nociones comunes de calor o ausencia de calor.
<b>Temperatura de bulbo húmedo</b>	Es la temperatura que da un termómetro bajo sombra, con el bulbo envuelto en una mecha de algodón húmedo bajo una corriente de aire.
<b>Temperatura de bulbo seco</b>	Es la medida con un termómetro convencional de mercurio o similar cuyo bulbo se encuentra seco.
<b>Torre de enfriamiento</b>	Son estructuras que son utilizadas para refrigerar agua por medio del principio de evaporación de acuerdo a la transferencia de calor agua-aire en industrias que manipulan grandes cantidades de agua para enfriar.
<b>Turbina</b>	Turbomáquina motora que transforma la energía del flujo de vapor en energía mecánica a través de un intercambio de cantidad de movimiento entre el flujo de trabajo y el rodete.

**Vapor**

Es la fase gaseosa del agua cuando ésta se encuentra por debajo de su temperatura crítica.





## RESUMEN

Se realiza un estudio de campo del sistema de enfriamiento abierto, en una empresa generadora de energía que utiliza carbón mineral. Se calcula, por medio del índice de Langelier, el tipo de contaminación que sufre el sistema de enfriamiento, obteniéndose un valor promedio de + 1,5, el cual demuestra problemas de incrustación.

Se determina por métodos volumétricos, los contaminantes principales que como promedio fueron: sales de dureza de calcio de 353 ppm, magnesio de 44 ppm y sílice de 63 ppm, dando como resultado, la cantidad de 1,26 ciclos de concentración. A través de la medición de conductividad en el agua de la torre, la cantidad de sales presentes en el agua alcanza valores de 717  $\mu$ Mhos. La cantidad de sílice se encuentra por debajo del valor crítico que es de 150 partes por millón, equivalentes a 3 ciclos de concentración. Se le propone a la empresa utilizar como el caudal óptimo de purga, en promedio, de 136 galones por minuto, que mejora la eficiencia en el consumo de agua, obteniendo ahorros en promedio de Q 7 771,43 al día.



# OBJETIVOS

## General

Determinar el caudal óptimo de purga y analizar los posibles contaminantes y su influencia en el basín de la torre de enfriamiento de una planta de generación de energía, con la evaluación del tipo de contaminante por medio del índice de Langelier y de los ciclos de concentración del agua para mejorar la eficiencia, en el consumo de agua del proceso de enfriamiento.

## Específicos

1. Determinar por medio de exámenes de laboratorio las características del agua utilizada en el basín de la torre y del agua de pozo.
2. Determinar el tipo de contaminación del agua de la torre por medio de índice de Langelier.
3. Calcular los ciclos de concentración y su valoración en dependencia de los ciclos de concentración máximos.
4. Evaluar la eficiencia del proceso de enfriamiento.

## **Hipótesis**

Si se determina el caudal óptimo de purga de la torre de enfriamiento, sus contaminantes y el tipo de contaminación, entonces es posible mejorar la eficiencia del proceso de enfriamiento.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se realiza en una torre de enfriamiento de una empresa generadora de energía, con base en carbón mineral (ver figura 3).

Las torres de enfriamiento son equipos que se usan para enfriar agua en grandes volúmenes, por ser el medio más económico para hacerlo. La mejora que se establecerá es aumentar la eficiencia en el consumo de agua. Con ello se busca convertir el equipo en una herramienta industrial amigable con el ambiente, mejorando la calidad del agua, para evitar que la descarga de la purga sea inadecuada.

En la actualidad es un tema de vital importancia, cuidar el agua y el aprecio del medio ambiente en las industrias, además, es un punto importante en el cuidado del planeta.

En las torres de enfriamiento, el uso correcto del agua no solamente disminuye el impacto ambiental, sino también aumenta el control de la eficiencia del equipo, disminuyendo problemas de incrustaciones y/o corrosiones.

El proyecto ayudará tanto al ambiente como en la reducción de costos a la generadora de energía, que al proponer un sistema de mayor control de descarga de purga, disminuirá costos de supervisión y evaluación constante del agua, aumentando la eficiencia del proceso.

El principal efecto, al reutilizar el agua en la torre de enfriamiento, es reflejado en los ciclos de concentración, siendo este el aumento de concentración de sólidos. Esto se refiere a la recirculación del agua, que al dar una vuelta completa en el sistema de refrigeración aumenta la dureza y materia contaminante al haber cierta cantidad de agua de refrigeración evaporada.

La purga en la torre de enfriamiento es la clasificación que se le da al agua, cuando sus características fisicoquímicas demuestran que esta no es apta para ser utilizada en la torre de enfriamiento. Por lo cual debe ser descartada y remplazada por agua de mejor calidad. Para conocer el momento adecuado, se realizaron evaluaciones en un laboratorio químico, en donde se determinaron las sales que influyen en la calidad del agua.

La importancia de la determinación de los parámetros de dureza y contaminantes en el agua, es para controlar y evitar incrustaciones y sedimentaciones de sales en el equipo, disminuyendo el daño al equipo de enfriamiento, impidiendo que baje su eficiencia en el proceso para el cual está diseñado.

## 1. ANTECEDENTES

En 1985, Juan G. Monsalve O. realizó en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de los Andes, un trabajo de investigación sobre el diseño y construcción de una torre de enfriamiento, mediante la aplicación de principios de transferencia de masa y energía. La torre de refrigeración abarcó los servicios de una instalación, que extrae calor del agua, mediante evaporación o conducción dentro de un laboratorio de operaciones unitarias. Asimismo, puso en práctica los conceptos de la utilización de la torre de enfriamiento para la reutilización del agua.

En Guatemala, se realizó un trabajo de graduación sobre *La operación y mantenimiento de la torre de enfriamiento del Ingenio Santa Ana*, elaborado por Melvin Ezequiel Axpuc en el 2008. En la investigación fue necesario conocer las características de operación de la planta generadora de energía eléctrica con vapor, el ciclo térmico con la que funciona, la descripción de sus componentes y la función que realiza cada uno de ellos. Así también se definieron procedimientos básicos de mantenimiento y definición de la eficiencia, por medio de un estudio térmico completo del ciclo, comparando eficiencias antes y después de la implementación de la torre.

En el 2010, se realizó en el Ingenio Tzulá, el informe del Ejercicio Profesional Supervisado (EPS) correspondiente al *Análisis termodinámico y propuesta de mejora de eficiencia de torre de enfriamiento en área de cogeneración*, por el ingeniero mecánico Alex Fernando Carías Mejía. La investigación consistió en la evaluación de los principales parámetros para el mejoramiento de la transferencia de calor y masa de la torre de enfriamiento.



Los criterios de las investigaciones antes mencionadas son de vital importancia, en el buen manejo de una torre de enfriamiento, pero, desde el punto de vista de la utilización del agua de manera químicamente correcta, no se han tomado en cuenta.

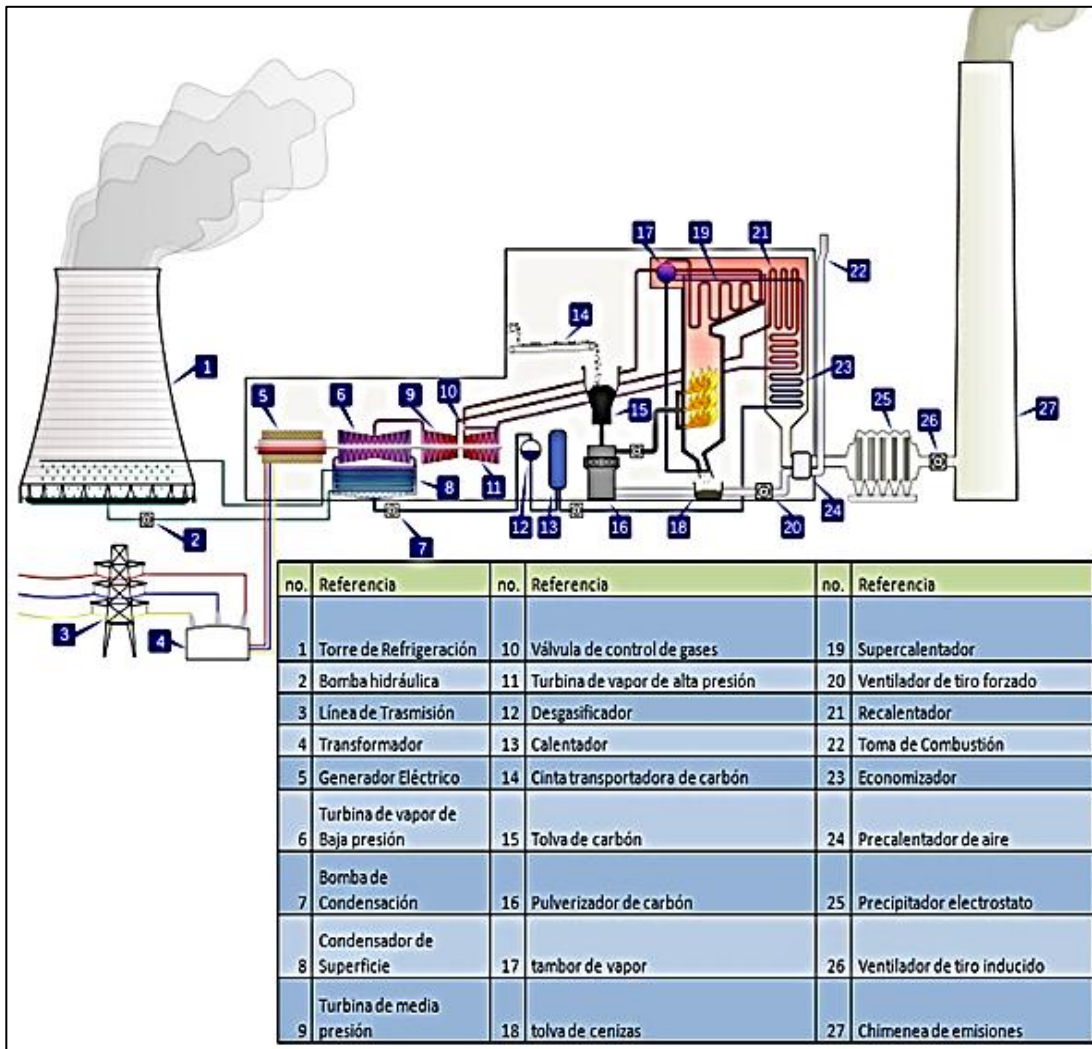
## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Carbonera**

Una carbonera es una instalación empleada en la generación de energía eléctrica, a partir de la energía liberada en forma de calor, mediante la combustión de carbón. Este calor es empleado por un ciclo termodinámico convencional, para mover un alternador y producir energía eléctrica.

El funcionamiento de esta central térmica o termoeléctrica, como se demuestra en la figura 1, consiste en la producción de electricidad a partir de la combustión de carbón, en un generador de vapor que transforma el agua en vapor de alta presión y alta temperatura. El vapor circula por una serie de turbinas de vapor que impulsan un generador eléctrico para producir electricidad. El vapor de escape de las turbinas se refrigera por condensación se convierte en agua y finalmente se devuelve al generador de vapor para recomenzar el proceso.

Figura 1. Diagrama de la termoeléctrica de carbón



Fuente: HADZICH, M. *Problemas y aplicaciones de ingeniería*. p. 5.

Este generador de vapor, que es una caldera acuotubular, utiliza unos quemadores para la combustión del carbón, generando energía calorífica que es transmitida a los tubos que se encuentran en las paredes de la caldera (núm. 19 de la figura 1). Esta convierte a su vez, en vapor a alta temperatura, el agua que se encuentra dentro de los tubos (núm. 21 de la figura 1).

Este vapor entra a gran presión en la turbina de la central, la cual consta de dos cuerpos, de alta y baja presión (núms. 6 y 11 de la figura 1) respectivamente, unidos por un mismo eje.

En el primer cuerpo (alta presión) existen centenares de álabes o paletas pequeñas. El de baja presión tiene álabes más grandes que los precedentes. El objetivo de esta doble disposición es aprovechar al máximo la fuerza del vapor, ya que este va perdiendo presión progresivamente, por lo cual los álabes de la turbina se hacen de mayor tamaño cuando se pasa de un cuerpo a otro de la misma.

El vapor de agua a presión hace girar los álabes de la turbina generando energía mecánica. A su vez, el eje que une a los dos cuerpos de la turbina, haciendo girar al mismo tiempo a un alternador unido a ella, produciendo así energía eléctrica. Esta es vertida a la red de transporte a alta tensión mediante la acción de un transformador.

El vapor, luego del proceso de generación de energía es enviado a unos condensadores. Allí es enfriado y convertido de nuevo en agua. Esta es conducida otra vez a los tubos que rodean interiormente las paredes de la caldera, con lo cual el ciclo productivo puede volver a iniciarse. El proceso de producción de energía, en la planta termoeléctrica, se basa en el principio del ciclo de Rankine.

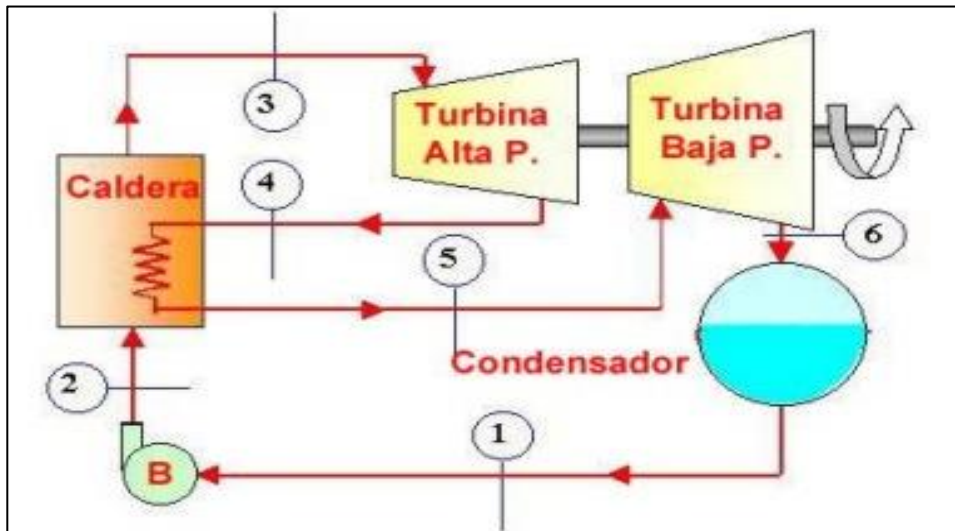
### **2.1.1. Ciclo de Rankine**

El ciclo Rankine es un ciclo de potencia representativo, del proceso termodinámico, que tiene lugar en una central térmica de vapor. Utiliza un fluido de trabajo, que alternativamente evapora y condensa (típicamente agua)

mediante la quema de un combustible. El vapor de agua es producido en una caldera a alta presión (numeral 2 de la figura 2), para luego ser llevado a una turbina (numeral 3 de la figura 2), donde se expande para generar trabajo mecánico en su eje (este eje, solidariamente unido al de un generador eléctrico, es el que generará la electricidad en la central térmica).

El vapor de baja presión que sale de la turbina se introduce en un condensador (numeral 6 de la figura 2), equipo donde el vapor condensa y cambia al estado líquido (habitualmente el calor es evacuado mediante una corriente de refrigeración, procedente de una torre de enfriamiento). Posteriormente, una bomba se encarga de aumentar la presión del fluido, en fase líquida (numeral 1 de la figura 2), para volver a introducirlo nuevamente en la caldera, cerrando de esta manera el ciclo.

Figura 2. **Ciclo de Rankine de la planta termoeléctrica**



Fuente: HADZICH, M. *Problemas y aplicaciones de ingeniería*. p. 23.

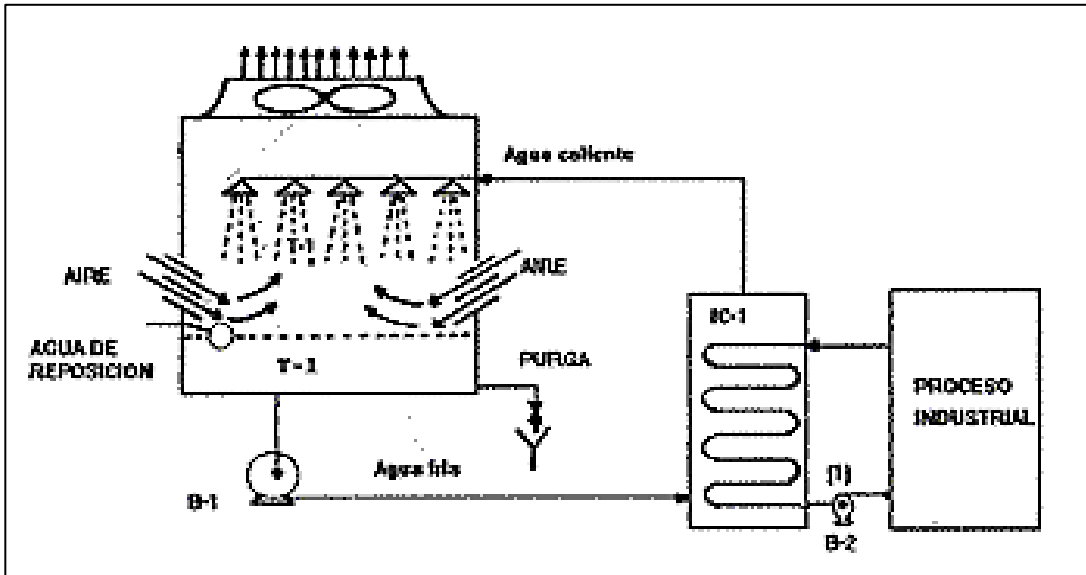
## **2.2. Torres de enfriamiento**

La torre de enfriamiento es un dispositivo que emplea el contacto directo, entre el elemento disipador, el agua, y el elemento receptor, siendo este el aire. El objetivo principal de este equipo es el procesamiento térmico en el enfriamiento del agua.

Las torres de enfriamiento son por lo tanto equipos que se usan para enfriar agua en grandes volúmenes, extrayendo el calor del agua mediante evaporación o conducción. Para la realización de este efecto, el agua se introduce por el domo de la torre, por medio de boquillas que distribuyen el agua en la mayor superficie posible. El enfriamiento ocurre cuando el agua, al caer a través de la torre, se pone en contacto directo con una corriente de aire, siendo este siempre, fresco y con baja humedad. La forma de cómo trabaja el sistema se demuestra en la figura 3.

El efecto que hace que exista transferencia de calor, es debido a la transferencia de masa. La transferencia de masa dentro de la torre provoca que la temperatura del aire y su humedad aumenten, haciendo descender la temperatura del agua. La temperatura límite de enfriamiento del agua es la temperatura de bulbo húmedo del aire en la entrada de la torre.

Figura 3. Diagrama del proceso de enfriamiento en una torre



Fuente: HADZICH, M. *Problemas y aplicaciones de ingeniería*. p. 5.

La fuerza impulsora para la evaporación se debe, en su gran mayoría, a la diferencia entre la presión de vapor del agua y su presión de vapor, si el agua estuviese a temperatura húmeda del aire. Es evidente que el agua no puede enfriarse, por debajo de la temperatura húmeda del aire. Esto quiere decir, que la temperatura del agua a la salida, ha de ser superior a la temperatura húmeda por lo menos en 4 o 5 °F.

### 2.2.1. Historia de las torres de enfriamiento

Las torres de enfriamiento surgieron de la necesidad de enfriar, en grandes cantidades, materiales de construcción en procesos industriales. Inicialmente se empleó la utilización del método de “enfriamiento de un solo paso”. Con este método, las fábricas tomaban agua de río o lago cercano, lo utilizaba para enfriar algo y lo regresaban al río o lago. Este método, además

del gran impacto que causaba en el aumento de temperatura en los sistemas de agua, causaba desequilibrio ecológico en el agua, era “totalmente impráctico”.

La evolución del enfriamiento consiguió en la “invención de lagos artificiales con mecanismos de aspersión del agua de enfriamiento”<sup>1</sup>. Que consiste en la dispersión de agua de forma vertical hacia arriba, la cual lograba enfriar la misma por medio de la evaporación, “tratando de aproximar la temperatura del agua a la temperatura del bulbo húmedo del medio ambiente”<sup>2</sup>. Este sistema es utilizado comúnmente en industrias de fabricación de azúcar, la cual aumenta “considerablemente la eficiencia del proceso de enfriamiento”, pero para que tuviera una eficacia dentro del proceso, se requería de grandes extensiones de tierra.

Es de esta transición que nace la primera torre de enfriamiento, la cual “solucionó el costo de tener un lago artificial”. Este sistema de enfriamiento consiste en “elevar el sistema de aspersión de agua”<sup>3</sup>, permitiendo que el agua tenga contacto con el aire por más tiempo previo al tanque de almacenamiento de agua fría. Para aumentar la eficiencia de este sistema se emplearon elementos, los cuales fueron:

- Utilización de ventiladores para el aumento de flujo de aire.
- “Rellenos interiores para aumentar la superficie expuesta al agua y por ende, la cantidad de evaporación”<sup>4</sup>.

Con ello, el proceso de enfriamiento se maximizó con respecto a la interacción del agua caliente proveniente del proceso industrial con el aire del

---

<sup>1</sup> CARÍAS M., Alex F. *Análisis termodinámico y propuesta de mejora de eficiencia de torre de enfriamiento, en el Área de Cogeneración.* p. 25.

<sup>2</sup> *Ibíd.*

<sup>3</sup> *Ibíd.*

<sup>4</sup> *Ibíd.*



ambiente. “Durante este contacto extendido del agua con el aire se efectúa el enfriamiento por evaporación”<sup>5</sup> logrando exponer en el mayor tiempo el contacto con el aire y así lograr un enfriamiento eficiente del agua.

## **2.2.2. Clasificación de torres de enfriamiento**

Las torres de enfriamiento se pueden clasificar de acuerdo con la forma en que ocurre el intercambio de calor entre el agua y el aire, siendo comúnmente de tipo natural y mecánica.

### **2.2.2.1. Circulación natural**

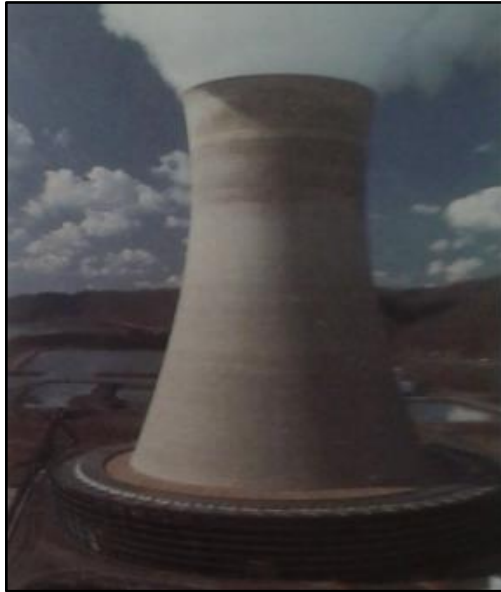
Las torres de tipo natural, generalmente tienen la forma de chimenea hiperbólica (ver figura 4). En ellas, el agua caliente proviene del proceso, se pone en contacto con el aire, provocando su calentamiento y su ascenso como consecuencia de la disminución de su densidad. El aire ascendente provoca una depresión en la parte interior de la torre generándose la posibilidad de la admisión de aire fresco.

Estos equipos presentan bajos costos de mantenimiento y de operación, debido a que no tienen consumo eléctrico. Se emplean para manejar grandes capacidades de enfriamiento y requiere bajas temperaturas de entrada, son comúnmente utilizadas en centrales eléctricas o industrias de gran tamaño.

---

<sup>5</sup> CARÍAS M., Alex F. *Análisis termodinámico y propuesta de mejora de eficiencia de torre de enfriamiento, en el Área de Cogeneración.* p. 25.

Figura 4. **Torre de circulación natural**



Fuente: BETZ LABORATORIES. *Handbook of industrial water conditioning*. p. 230.

#### **2.2.2.2. Circulación mecánica**

El agua caliente que llega a la torre puede distribuirse por boquillas aspersoras o compartimientos, que dejan pasar hacia abajo el flujo de agua a través de unos orificios. El aire usado para enfriar el agua caliente es extraído de la torre, en cualquiera de las dos formas siguientes:

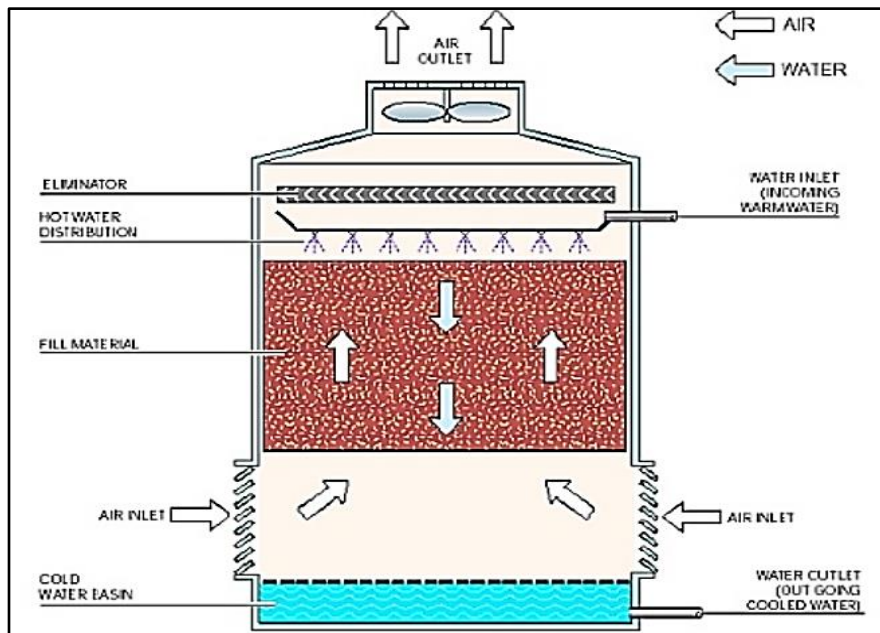
- Tiro inducido  
El aire se succiona a través de la torre mediante un ventilador situado en la parte superior de la torre, este tipo de torre es la utilizada en la generadora de energía de la cual se realizó el trabajo de campo.

Figura 5. **Torre de circulación mecánica (tiro inducido)**



Fuente: torre de enfriamiento evaluada de la empresa de generación de energía.

Figura 6. **Funcionamiento torre de enfriamiento, tiro inducido**



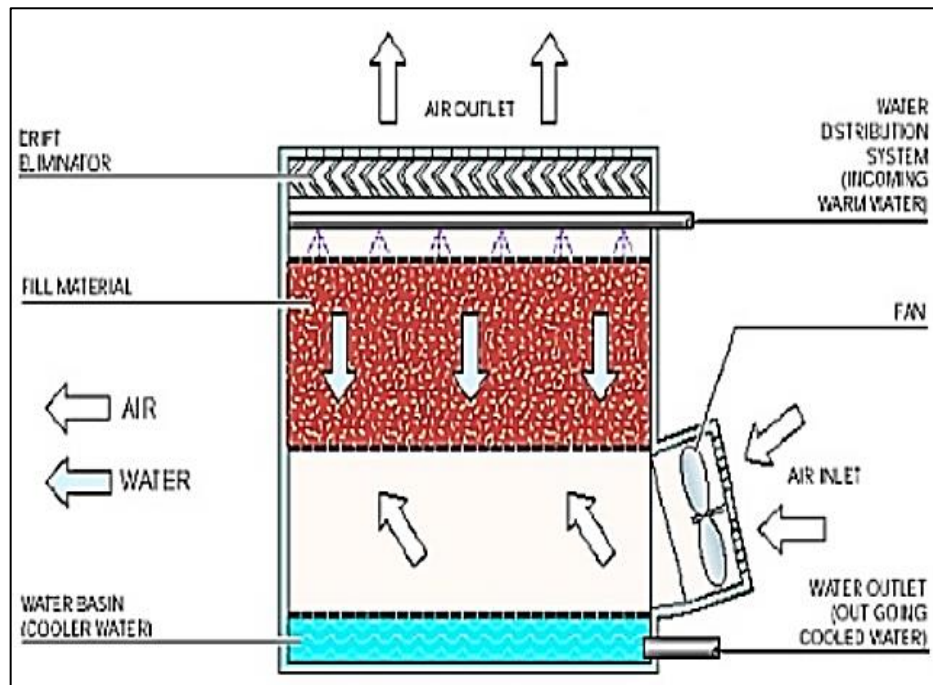
Fuente: BETZ LABORATORIES. *Handbook of industrial water conditioning*. p. 232.

- Tiro forzado

El aire se esfuerza por un ventilador situado en el fondo de la torre y se descarga por la parte superior.

Estas torres están sujetas particularmente a la recirculación del aire caliente y húmedo que es descargado, dentro de la toma del ventilador, debido a la baja velocidad de descarga y que materialmente reduce la efectividad de la torre. El tiro inducido con el ventilador en la parte superior de la torre evita esto; además, permite una distribución interna más uniforme del aire.

Figura 7. **Funcionamiento torre de enfriamiento, tiro forzado**

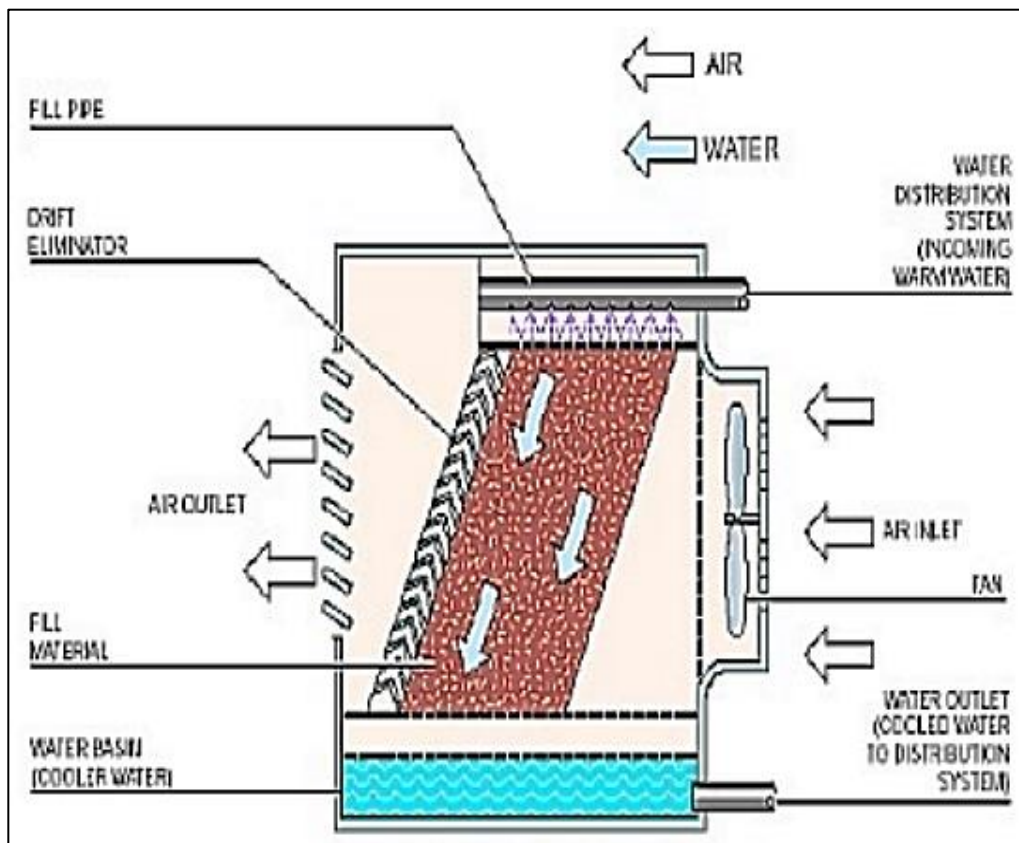


Fuente: BETZ LABORATORIES. *Handbook of industrial water conditioning*. p. 233.

- Torres de flujo cruzado

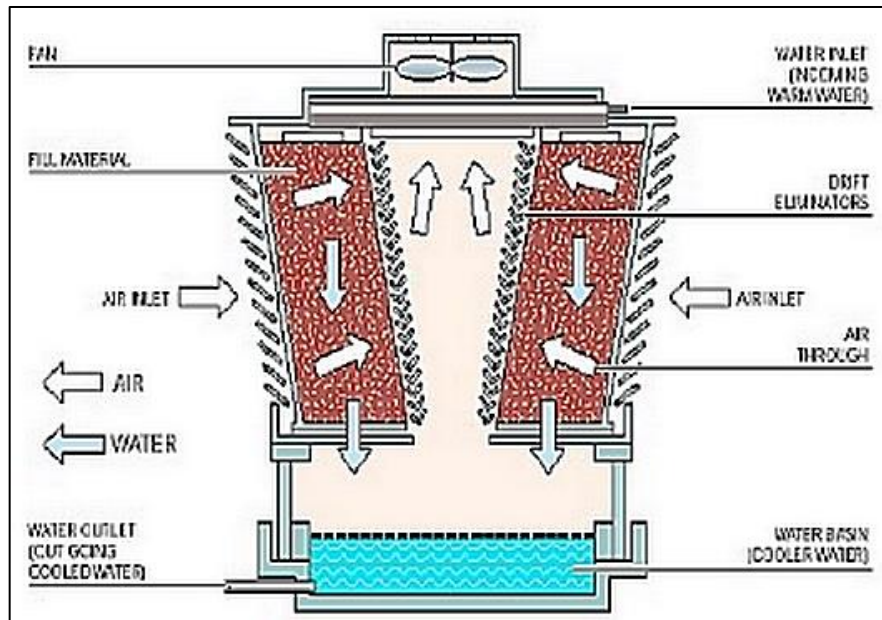
En este tipo de torre, el aire entra a los lados de la torre fluyendo horizontalmente a través del agua que cae. Las corrientes de aire laterales se unen en un pasaje interno y dejan la torre por el tope. Las torres de flujo cruzado requieren más aire y tienen un costo de operación más bajo que las torres a contra corriente.

Figura 8. **Funcionamiento torre de enfriamiento, tiro cruzado con hélice lateral**



Fuente: BETZ LABORATORIES. *Handbook of industrial water conditioning*. p. 233.

Figura 9. **Funcionamiento torre de enfriamiento, tiro cruzado con hélice superior**



Fuente: BETZ LABORATORIES. *Handbook of industrial water conditioning*. p. 233.

### 2.3. Ciclos de concentración

Como se representa en la figura 3, la torre, en una carbonera, se utiliza para el enfriamiento de agua que es utilizada en un sistema de intercambio de calor, para la condensación del vapor, que es utilizado para la generación de energía. Al recircular el agua de la torre, para su enfriamiento, parte de ella sufre una “evaporación flash” al pasar por la torre, cuando esta tiene contacto con el aire de enfriamiento, reduciendo la cantidad de agua misma, así también, concentrando los sólidos encontrados en solución. Este efecto, al realizar una vuelta en el sistema de la torre es llamado ciclo de concentración.

El agua circula a través de los intercambiadores del proceso de condensación y sobre la torre de refrigeración, a un caudal conocido como el caudal de recirculación. El agua se pierde del sistema a través de la evaporación y de la purga. A efectos de cálculo, la purga se define como todas las pérdidas de agua que no haya sido por medio de la evaporación (efecto del viento, la deriva y fugas). Para que no se pierda el volumen de agua, es añadida agua nueva al sistema para reemplazar la evaporación y purga.

Aproximadamente 1 000 BTU de calor se pierde desde el agua por cada libra de agua evaporada. Esto es igual a la evaporación de alrededor de 1 % del agua de refrigeración para cada 10 °F caída de temperatura a través de la torre de refrigeración. La siguiente ecuación describe esta relación entre la evaporación, velocidad de recirculación, y el cambio de temperatura:

Ecuación 1: determinación de agua de evaporación

$$E = \frac{RR(\Delta T)F}{1\,000}$$

En donde:

E = agua evaporada del sistema (gpm)

RR = recirculación del agua (gpm)

$\Delta T$  = diferencia de temperatura entre entrada y salida (°F)

F = factor de evaporación

El factor de la evaporación, F, es igual a 1 cuando toda el agua evaporada proviene del efecto de refrigeración, del cual, es valedera utilizar este equivalente en este caso, ya que no existe efectos variantes adicionales externos de aumento del volumen de agua a la torre. En realidad, F varía con la

humedad relativa y la temperatura de bulbo seco en climas de lluvia. El valor real de F para un sistema es generalmente entre 0,75 y 1,0, pero puede ser tan bajo como 0,6 en un clima muy frío.

A medida que se evapora el agua, los minerales se quedan en el agua de circulación, por lo que es más concentrada que el agua de reposición. Tener en cuenta que la purga tiene la misma composición química como agua circulante.

“Ciclos de concentración” (o ciclos) son una comparación del nivel de sólidos disueltos de la purga con el agua de reposición. A los 3 ciclos de concentración de purga tiene tres veces la concentración de sólidos de la composición.

Los ciclos pueden calcularse por la comparación de las concentraciones de un componente soluble en los flujos del agua nueva y de la purga. Debido a que el sílice se mantiene en concentraciones constantes, es buena opción para la medición. Sin embargo, los resultados de los cálculos pueden tener una leve variación, si existe la alimentación de cloro o ácido sulfúrico al sistema como parte de un programa de tratamiento de agua.

Los ciclos basados en la conductividad se utilizan a menudo como una manera fácil de automatizar la purga a los 3 ciclos de concentración, ya que esto demuestra que se tiene tres veces la concentración de sólidos. Para medirlos se utiliza la siguiente ecuación.

Ecuación 2: determinación de los ciclos de concentración por cantidad de sólidos



$$CC = \frac{\text{Concentración de purga}}{\text{Concentración de agua nueva}}$$

En donde:

CC = ciclos de concentración

Los ciclos de concentración también se pueden expresar de la siguiente manera:

Ecuación 3: determinación de los ciclos de concentración por cantidades de flujo

$$CC = \frac{MU}{BD}$$

En donde:

CC = ciclos de concentración

MU = agua de alimentación (evaporación + purga) (gpm)

BD = purga (gpm)

Resolviendo para purga, esta ecuación se convierte en:

Ecuación 4: determinación de los ciclos de concentración por cantidades de flujo

$$CC = \frac{E + BD}{BD}$$

$$BD = \frac{E}{(CC - 1)}$$

En donde:

CC = ciclos de concentración

E = evaporación (gpm)

BD = purga (gpm)

Esta es una ecuación muy útil en el tratamiento del agua de refrigeración. Gracias a estas ecuaciones, se puede determinar, con base en las concentraciones del agua nueva y de purga, la purga real que se pierde desde el sistema, o la purga requerida para mantener el sistema en el número deseado de ciclos.

Los productos químicos que son utilizados para desincrustar, inhibir corrosión y biocidas, como tratamiento de la torre, no se pierden por evaporación, estos solo pueden ser removidos a través de los purga. Por lo tanto, el cálculo de la purga es fundamental en la determinación de las tasas de alimentación de tratamiento químico, así también, controlar los costos.

### **2.3.1. Factores limitantes ciclos de concentración**

Los ciclos de concentración es una variable importante para el buen manejo de sistemas de enfriamiento, determinando la concentración de sales en el agua de enfriamiento que establecen ciertas limitaciones.

### **2.3.1.1. Limitaciones físicas**

Hay un límite para el número de ciclos alcanzables en una torre de refrigeración. Pérdidas de hasta el 0,2 % de la tasa de recirculación en torres de categoría antigua, puede limitar los ciclos de 5-10. Las pérdidas adicionales debido a las fugas y resistencia al viento pueden limitar aún más algunos sistemas viejos. Las nuevas torres, a menudo llevan garantías de un 0,02 % de pérdidas. Sistemas de nueva construcción, que utilizan torres con separadores de gotas de alta eficiencia, pueden ser mecánicamente capaces de alcanzar 50 a 100 ciclos o más.

### **2.3.1.2. Limitaciones químicas**

A medida que los sólidos disueltos del agua aumentan, la tendencia a la corrosión y deposición aumentan directamente. La corrosión se da debido a una reacción electroquímica, a mayor conductividad debido a los sólidos disueltos aumenta la velocidad de corrosión. Cuando existe, en el agua de la torre, una conductividad muy alta, se hace progresivamente más difícil y costoso inhibir la corrosión, cuando los enfoques de conductancia específicas exceden a los 10 000  $\mu$ Mhos.

La mayoría de las sales tienden a cambiar su solubilidad al cambiar la temperatura; es decir, que son menos solubles a temperaturas más altas y por lo tanto, tienden a formar depósitos en los tubos del intercambiador de calor. Muchas sales también son menos solubles a pH más alto. Como el agua de torre de refrigeración se concentra y a su vez aumenta su pH, la tendencia a precipitar sales aumenta de escala.

Debido a que el carbonato de calcio es una de las sales menos solubles, es una escala común de medición de los ciclos de concentración en sistemas de refrigeración de recirculación abierta. El calcio, silicato de magnesio, sulfato de calcio y otros tipos de sales de formación, son una escala también de medir. Comúnmente es utilizada la medición de sales de sílice, debido a su constante concentración en pozos y por la peligrosidad de esta sal al provocar incrustaciones, en concentraciones mayores de 150 ppm.

Las incrustaciones de las sales antes mencionadas se pueden predecir cualitativamente por el índice de saturación de Langelier.

#### **2.4. Índice de Langelier**

El índice de saturación de Langelier (IL) es una medida de la capacidad de una solución para disolver o precipitar carbonato de calcio. Este es utilizado a menudo como un indicador de la corrosividad del agua. El índice no está relacionado directamente a la corrosión, pero está relacionado con la deposición de una película de carbonato de calcio. El carbonato de calcio insoluble realiza una cubierta que puede aislar las tuberías, calderas y otros componentes de un sistema de contacto con el agua.

Cuando no se realiza de forma adecuada una protección, el agua se considera como agresiva, en donde la corrosión y las incrustaciones pueden ocurrir. Un agua muy corrosiva puede causar fallos en el sistema o causar problemas de salud a causa de plomo disuelto y otros metales pesados. Un exceso de alcalinidad también puede dañar los sistemas de agua, lo que a un futuro pueda generar una exigencia en la reparación o sustitución del equipo.

Langelier deriva una ecuación para estimar el pH en el que el agua se encontrará saturada con carbonato de calcio (pH<sub>s</sub>). Esta ecuación se basa en las expresiones de equilibrio de calcio en solubilidad de carbonatos y bicarbonatos en disociación. Para aproximarse a las condiciones reales, los cálculos de pH<sub>s</sub> fueron modificados para incluir los efectos de la temperatura y la fuerza iónica.

Ecuación 5: cálculo del índice de Langelier

$$IL = pH - pH_s$$

En donde:

IL = índice de Langelier

pH = pH del agua a medir

pH<sub>s</sub> = pH de saturación de calcio del agua a medir

Entonces, el índice de Langelier se define como la diferencia entre el pH real (medida) y el pH<sub>s</sub>. La magnitud y el signo de la tendencia del valor IL demuestran la capacidad del agua para realizar incrustaciones, así también, para inhibir o favorecer la corrosión. Aunque la información obtenida a partir del IL no es cuantitativa, puede ser útil en la estimación del control en el tratamiento químico para calderas de baja presión, torres de refrigeración y plantas de tratamiento de agua, además de servir como un indicador general de la corrosividad del agua.

#### **2.4.1. Parámetros de medición**

El índice de saturación Langelier se puede calcular fácilmente mediante la determinación de la alcalinidad, conductividad, dureza y temperatura. Para

determinar el pH de saturación de carbonato de calcio (pHs) del agua a analizar, se utiliza una fórmula simple:

Ecuación 6: determinación del pH de saturación

$$\text{pHs} = 9,3 + \text{I} + \text{II} - (\text{III} + \text{IV})$$

En donde:

pHs = pH de saturación del agua a analizar

I = constante del efecto de la conductividad

II = constante del efecto de la temperatura

III = constante del efecto de la dureza

IV = constante del efecto de la alcalinidad

Estas constantes son obtenidas al medir la temperatura en grados Fahrenheit, la conductividad en  $\mu\text{Mhos}$ , la dureza y alcalinidad en partes por millón, teniendo su equivalencia en la tabla que se encuentra en el anexo.

#### **2.4.2. Interpretación**

El IL es un indicador que predice si el agua analizada tiende a precipitar o a disolver el carbonato de calcio. Si el pHs es igual al pH, el agua se considera "equilibrada". Esto significa que el carbonato de calcio no provocará incrustación. Si el pHs es menor que el pH (IL es un número positivo), el agua tenderá a depositar carbonato de calcio en la escala de formación. Si el pHs es mayor que el pH (IL es un número negativo), el agua no está saturado y tiende a disolver el carbonato de calcio, este resultado muestra también que el agua tiende a una corrosividad agresiva.

En resumen:

$pH_s = pH_{\text{actual}}$ :

el agua es equilibrada

$pH_s < pH_{\text{actual}}$ :

IL es positivo, el agua es la escala de formación (corrosividad no agresiva)

$pH_s > pH_{\text{actual}}$ :

IL es negativo, el agua no es la escala de formación (corrosividad agresiva)

Es importante recordar que el valor IL es una medida cualitativa de carbonato de calcio en cuanto a la tendencia de saturación o corrosión del agua analizada, más no cuantitativa. Debido a que la formación de incrustaciones de protección es dependiente del pH, iones bicarbonato, carbonato de calcio, sólidos disueltos y temperatura; cada uno puede afectar las tendencias corrosivas o de incrustación del agua de forma independiente.

Aguas de baja alcalinidad, suaves, con bajo o alto pH son corrosivos, a pesar de que esta no puede ser predicha por el IL. Esto se debe a una cantidad insuficiente de carbonato de calcio y alcalinidad que están disponibles para formar una escala de neutralización. La tabla de valores para el IL, que se encuentra en el anexo, muestra ciertos valores disponibles de las variables a medir, si sobrepasan estos datos, los mismos no se encuentran dentro de la medición de Langelier.

Las aguas con valores de pH altos, suficiente dureza y alcalinidad también, suelen ser corrosivos de forma cáustica, a pesar que IL predice lo contrario. Este es el resultado de complejos de calcio y de magnesio que no

puede participar activamente en el proceso de formación de la escala. Los procedimientos analíticos no distinguen entre estos complejos y los disponibles de calcio y magnesio. Por lo tanto, el valor IL no es preciso en este tipo de situaciones. Tendencias corrosivas también pueden ser exhibidas por el agua que contiene altas concentraciones de sulfato, cloruro y otros iones que interfieren con la formación de la película de carbonato uniforme.

Como resultado de estos y otros problemas, IL es útil solo para determinar la corrosividad de las aguas que contienen más de 40 mg/L de alcalinidad, suficiente concentración de iones de calcio y pH que van entre 6,5 y 9,5. Se debe tomar también en cuenta que si sobrepasa el índice a +2,5, se estará trabajando con un agua que tiende a incrustarse de forma rápida.

## **2.5. Purga de agua**

La purga de agua consiste en la expulsión de cierta cantidad de agua, con una alta concentración de sólidos disueltos, con el propósito de mantener ciertos rangos establecidos del agua de circulación en la torre de enfriamiento. De esta manera se garantiza que el riesgo de formación de incrustaciones y otros problemas se mantenga al mínimo.

La purga continua, básicamente se utiliza para expulsar sólidos en suspensión en forma de lodos, que se forman en mayor o menor cantidad, dependiendo de la dureza del agua que entra a la torre. Cuando se presenta una contaminación mayor en el agua, es necesario aumentar la purga de fondo.



### **2.5.1. Purga de fondo**

Dependiendo de la calidad del agua de alimentación de que se disponga, el parámetro limitante, que determina el régimen de purga, puede ser la alcalinidad, sílice, sólidos totales y las sales de calcio y magnesio. La mayoría de los sistemas, cuentan con un mecanismo de purga intermitente y otro de purga continua.

En la operación de descarga, es necesario que la válvula de la purga intermitente o de fondo, se abra cada cierto tiempo; dependiendo de la calidad de agua que se utiliza, la frecuencia de la purga de fondo, la cual puede variar desde una cada hora, hasta una cada ocho horas. Algunos sistemas trabajan con solo una purga cada 24 horas.

Es conveniente tener en mente que, para desalojar los lodos de la parte baja de la torre, se debe realizar un régimen de purgas cortas pero frecuentes, en vez de una sola purga de larga duración. En la planta, en donde se esté utilizando la torre de enfriamiento, se tienen sus recomendaciones con respecto a la operación de la válvula de purga de fondo y por lo general lo recomendable es que se tengan a mano estas recomendaciones, para consulta de todo el personal involucrado.

### **2.5.2. Purga continua**

Como su nombre lo indica, esta purga es permanente, mientras la caldera o servicios aledaños están en operación. Consiste en el desalojo continuo de cierta cantidad de agua de la torre, la cual contiene la mayor concentración de sólidos disueltos. Por lo general, la válvula de control de la purga continua tiene una graduación, que permite al operador darse cuenta del flujo de purga. Las

variaciones que se hacen en la válvula, basadas en los análisis del agua, deben ser adecuadas a la demanda de la calidad, con base en los parámetros críticos. De lo contrario, se presentará una condición de altos y bajos en los parámetros, con la consiguiente dificultad para mantener un balance químico adecuado.

Existen mecanismos electrónicos, que pueden automáticamente controlar la purga continua, mediante un control continuo de conductividad. El sistema de purga continua, ofrece la posibilidad de recuperar cierta cantidad de energía y consumo, al disminuir el flujo de purga y alimentación de la torre, que puede ser empleada en otros procesos.

## **2.6. Características fisicoquímicas del agua en torres de enfriamiento**

Cada una de las propiedades claves del agua, tienen un impacto directo en los cuatro principales problemas de los sistemas de agua de enfriamiento; corrosión, incrustaciones, ensuciamiento y contaminación microbiológica.

### **2.6.1. Dureza**

La dureza es una característica química del agua, que está determinada por el contenido de carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos y ocasionalmente nitratos de calcio y magnesio. En sistemas de enfriamiento por agua, se producen incrustaciones en las tuberías y una pérdida en la eficiencia de la transferencia de calor.

Grandes cantidades de dureza, son indeseables por las razones antes expuestas y debe ser reducida antes de que el agua tenga uso inapropiado para el proceso de enfriamiento. La mayoría de los suministros de agua potable,

tienen un promedio de 250 a 350 mg/L de dureza. Niveles superiores a 1 000 mg/l son indeseables para su uso.

La dureza es caracterizada comúnmente por el contenido de calcio y magnesio y expresada como carbonato de calcio equivalente. Existen dos tipos de dureza; la dureza temporal y la dureza permanente.

#### **2.6.1.1. 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 los precipitados formados, por medio de filtración. También se le conoce como “dureza de carbonatos”.

#### **2.6.1.2. Dureza permanente**

Está determinada por todas las sales de calcio y magnesio, excepto carbonatos y bicarbonatos. No puede ser eliminada por ebullición del agua y también se le conoce como “dureza de no carbonatos”.

Para la interpretación, sobre qué tipo de agua es la que se está manejando, se requiere de la siguiente tabla:

Tabla I. **Análisis de dureza**

<b>Dureza como CaCO<sub>3</sub></b>	<b>Interpretación</b>
0-73 g/ml	Agua suave
75 - 200 g/ml	Agua poco dura
200 - 500 g/ml	Agua dura
> 500 g/ml	Agua muy dura

Fuente: BETZ LABORATORIES. *Handbook of industrial water conditioning*. p. 221.

### **2.6.2. Las incrustaciones**

Son depósitos de minerales en una tubería, el proceso inicia cuando la concentración de minerales rompe el límite de solubilidad y el agua no los puede mantener disueltos precipitando como lodos. Cuando pasa mucho tiempo, los lodos se cristalizan formando una estructura química muy dura y por consecuencia, el aislamiento de las tuberías que disminuye la capacidad de transferencia de calor y aumentando el consumo eléctrico, debido a que los equipos trabajan forzosamente.

El contenido de calcio, magnesio y sílice dependen del tipo de suelo de donde provenga el agua. Hay que tener claro que la solubilidad de los minerales disminuye al aumentar la temperatura y el pH, estos factores provocan su precipitación.

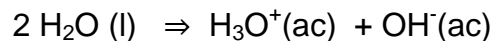
Para compensar este evento, se realiza un tratamiento anti-incrustante, identificando el mineral limitante o el que genera más riesgo, según las condiciones a las que va a someterse el agua, siendo el más perjudicial el

sílice, de este modo, se mantienen disueltas las partículas y se evita que precipiten.

Se permite tener cierta cantidad de minerales dentro del agua que el químico pueda manejar, sin embargo, la reconcentración de minerales es inevitable, por lo que es necesario evacuar constantemente pequeñas cantidades de agua del sistema, para mantener estable la concentración de sales por medio de una purga. La reposición adecuada y el tratamiento químico específico para la calidad de agua de suministro permitirán mantener el equipo protegido de incrustaciones.

### **2.6.3. Acidez en el agua**

El agua es una de las sustancias químicas más familiar, químicamente pura, la cual se constituye de un electrolito débil, cuya disociación se representa por:



Cuando el agua contiene sales de calcio y magnesio, puede lograr una disociación de la molécula del agua y asociarse el ión  $\text{OH}^-$ , con el metal de la tubería, provocando una oxidación. Para ello, es necesario que se mantenga a un nivel de pH entre 7 a 9,5.

### **2.6.4. Cantidad de biocidas**

Los biocidas pueden ser sustancias químicas sintéticas o de origen natural, pueden ser también microorganismos que están destinados a destruir,

contrarrestar, neutralizar, impedir la acción o ejercer un control de otro tipo, sobre cualquier otro organismo considerado nocivo.

Al utilizar biocidas en el agua, provoca alteraciones de pH y aumento de la dureza del agua, aparte, disminuye la actividad de biomasa. Es necesario el control químicamente analítico, para evitar posibles corrosiones e incrustaciones en el sistema de enfriamiento.

## **2.7. Problemas ocasionados por la calidad del agua**

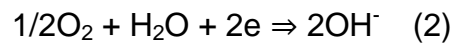
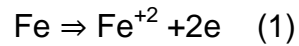
La evaporación de agua en las torres de enfriamiento, hace que se concentren las sales disueltas en la misma, alcanzando su punto de saturación durante el proceso, separándose del agua formando cristales, algunos de ellos muy difíciles de remover y que dañan los equipos al formar incrustaciones en tuberías y accesorios de calderas y equipos de calentamiento y evaporación.

No solo ocurre la saturación salina, cuando parte del agua se evapora, sino que también ocurre la pérdida de gases, como el bióxido de carbono que se encuentra disuelto en el agua y que forma parte de la alcalinidad del agua esto también favorece la precipitación de componentes poco solubles, como el calcio y el magnesio que forman carbonato de calcio, principalmente el hidróxido de magnesio.

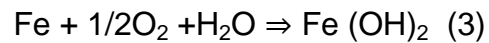
### **2.7.1. Corrosión**

Uno de los problemas mayores en una torre de enfriamiento, son los daños y el desgaste que se presenta por corrosión. El oxígeno disuelto presente en el agua, causa desgaste del hierro de la estructura metálica 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 hierro son las siguientes:



Sumando (1) y (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, sus efectos corrosivos son neutralizados, por la adición de reactivos, que reaccionan con el oxígeno, como lo es el sulfito de sodio.

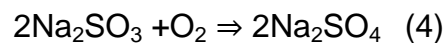


Figura 10. **Corrosión en tuberías**



Fuente: OOCITIES.ORG. *Parámetros y características de aguas naturales*. Consulta: 19 de agosto de 2013.

### **2.7.2. Precipitación de sólidos**

Los sólidos disueltos y suspendidos que pueda contener el agua, sedimentan y precipitan parcialmente, cuando el agua se evapora. La mayoría de los sólidos suspendidos se concentran y son removidos en las purgas, que regularmente se realizan en la recirculación de la torre de enfriamiento. Parte de los sólidos disueltos, también altamente concentrados, fluyen en la purga. Esta purga debe efectuarse precisamente para mantener en equilibrio los sólidos en la caldera, ya que, cuando parte del agua se evapora, deja los sólidos disueltos que le acompañan y se acumulan en el basín de la torre.

Los sólidos disueltos, pueden salir por las purgas o mantenerse en solución en el agua de la caldera, pero también ocurre la precipitación al formarse sales insolubles, como: carbonato de calcio y óxidos de magnesio; principalmente. La sílice presente en el agua, también es parte de los



precipitados y contribuye a hacer estos más firmes y difíciles de desprender; lo mismo ocurre con las partículas sólidas que el agua pueda contener, por lo que calcio y magnesio (dureza del agua), sílice y sólidos suspendidos son factores de control en el tratamiento del agua.

Figura 11. **Precipitaciones en tuberías**



Fuente: OOCITIES.ORG. *Parámetros y características de aguas naturales*. Consulta: 19 de agosto de 2013.

### **3. DISEÑO METODOLÓGICO**

#### **3.1. Variables**

Para la determinación del caudal óptimo de purga en el sistema de enfriamiento, se tomaron en cuenta diversas variables, las cuales formaron parte de la adaptación que se requiere, a los estándares ambientales de aguas de desecho, con respecto a los datos que se obtengan en el transcurso de la evaluación.

##### **3.1.1. Variables independientes**

- Temperatura del agua a la entrada y de salida
- Presión a la cual trabaja el sistema
- Caudales de operación en el sistema de enfriamiento

##### **3.1.2. Variables dependientes**

- pH del agua de enfriamiento
- Dureza del agua de enfriamiento
- Alcalinidad del agua de enfriamiento
- Cantidad de sílice en agua de pozo y de enfriamiento
- Conductividad del agua de pozo y de enfriamiento
- Temperatura de agua de entrada y salida del sistema
- Caudal de purga

### **3.2. Delimitación del campo de estudio**

El trabajo de investigación se realizó bajo las siguientes características:

- Campo de estudio: torre de enfriamiento de generadora de energía.
- Proceso: análisis fisicoquímicos de agua de enfriamiento.
- Unidad de estudio: generadora de energía a base de carbón mineral.
- Ubicación: por motivos de seguridad de la empresa, no es permitido brindar la información de la localidad.

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

Los recursos humanos con que el que se contó fueron:

- Tesista: José Rodrigo Arenas Juárez  
Estudiante Ingeniería Química
- Asesor: Ing. Jorge Mario Estrada Asturias  
Ingeniero Químico  
USAC  
Profesor titular 1
- Otros: Ingenieros de la gerencia de planta  
Operadores de la torre de enfriamiento  
Personal administrativo

### 3.4. Recursos materiales disponibles

El presente trabajo, requirió de diversos materiales y equipos para la determinación de resultados, que beneficiaron la utilización adecuada del agua en una torre de enfriamiento. Para cumplir con esto, se usaron los siguientes instrumentos:

- Equipo electrónico
  - Computadora
  - pHmetro
  - Conductímetro
  - Colorímetro
  
- Cristalería volumétrica
  - Erlenmeyer
  - Bureta digital marca Hach
  - Probeta
  
- Reactivos para análisis químicos
  - Alcalinidad:
    - Ácido sulfúrico (1,6 N)
    - Fenolftaleína
    - Bromo de cresol
  
  - Dureza:
    - Solución buffer de dureza
    - Indicador de dureza Man Ver 2, marca Hach
    - Solución EDTA (0,8 N)

- Dureza de calcio:
  - Solución de hidróxido de potasio (8,0 N)
  - Indicador de calcio CalVer 2, marca Hach
  - Solución EDTA (0,8 N)
  
- Sílice:
  - Reactivo de molibdato para sílice, marca Hach
  - Reactivo ácido para sílice, marca Hach
  - Reactivo de ácido cítrico para sílice, marca Hach
  
- Equipo de seguridad (lentes, guantes, casco, bata, botas industriales)
- Papelería para apuntes e información comparativa

### **3.5. Técnica cuantitativa**

La técnica utilizada fue por medio de datos numéricos, que mostrarán los resultados en magnitud comparativa a los ciclos máximos de concentración, por medio de corridas que satisfacen la confiabilidad estadística en los análisis de dureza de agua, alcalinidad, cantidad de sílice y conductividad, así también el control del pH.

Los parámetros medidos son cuantitativos, permitiendo tomar decisiones a través de datos comparativos, con los valores que brindan la generadora como críticos.

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

Los datos se obtuvieron mediante la toma de muestras de agua del basín de la torre de enfriamiento y de los pozos que suministran agua al mismo. Las

muestras se recolectaron durante julio, agosto y septiembre, tomando estas 2 veces por semana.

Las muestras fueron analizadas por un conductivímetro, la cantidad de sólidos, tanto del agua del basín, como el agua de los distintos pozos. Los análisis de pH se realizaron con un pH metro y la cantidad de sílice en las muestras por medio del colorímetro.

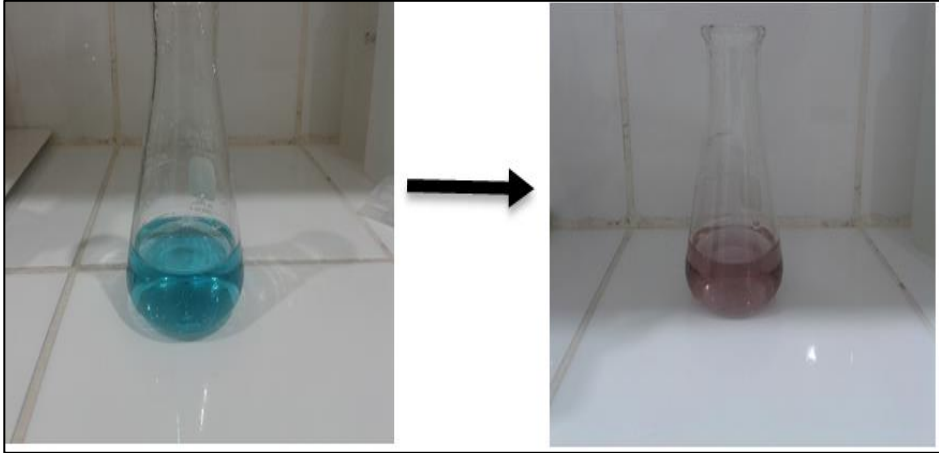
Figura 12. **Colorímetro para la determinación de sílice**



Fuente: laboratorio de una empresa dedicada al análisis de aguas industriales.

Para la obtención de datos de la cantidad de la dureza y alcalinidad de las muestras evaluadas, se utilizó el método de volumetría. Para ello, se realizaron análisis de 50 ml de muestras respectivamente, las cuales, por indicadores de viraje de color, mostraron la cantidad de sales de calcio y magnesio, estas dando el resultado de la alcalinidad de las muestras y de las durezas, totales y de calcio. Los métodos para la obtención de estos datos, así también las tablas en donde se muestran los datos tabulados, se pueden apreciar en el anexo.

Figura 13. **Viraje del análisis de alcalinidad**



Fuente: laboratorio de una empresa dedicada al análisis de aguas industriales.

Figura 14. **Viraje del análisis de dureza**



Fuente: laboratorio de una empresa dedicada al análisis de aguas industriales.

### 3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Teniendo los datos de los parámetros fisicoquímicos necesarios para la determinación de los ciclos de concentración y del índice de Langelier, se llevó a cabo el siguiente procedimiento para la obtención de los mismos.

#### 3.7.1. Determinación del índice de Langelier

Para determinar el índice de Langelier, se utilizó la ecuación 6, con la ayuda de la tabla ubicada en el anexo:

$$pH_s = 9,3 + I + II - (III + IV)$$

Si se evalúa una de las muestras, siendo esta, de la fecha 2 de julio del 2013, y ubicando sus valores en la tabla del anexo, quedará de la manera siguiente:

- Constante del efecto de conductividad a 720  $\mu$ Mhos (I) = 0,2
- Constante del efecto de la temperatura a 78,2 °F (II) = 1,8
- Constante del efecto de la dureza a 328 ppm (III) = 2,2
- Constante del efecto de la alcalinidad a 388 ppm (IV) = 2,6

Sustituyendo en la ecuación 6, da como resultado el pH de saturación:

$$\begin{aligned} pH_s &= 9,3 + I + II - (III + IV) \\ pH_s &= 9,3 + 0,2 + 1,8 - (2,2 + 2,6) \\ pH_s &= 6,5 \end{aligned}$$



Este resultado es utilizado para la determinación del índice de Langelier, que por medio de la ecuación 5 se logra determinar, teniendo en cuenta que el pH del agua analizada en esa fecha fue de 7,60:

$$IL = pH - pH_s$$

Sustituyendo:

$$IL = 7,60 - 6,5$$

$$IL = + 1,10$$

Este dato indica que el agua analizada muestra tendencia de formación de incrustaciones, y por ende, se le dará prioridad al análisis de los ciclos de concentración con base en sales incrustantes, especialmente a las sales de sílice, por ser las que más perjudican el sistema, al ser una sal que difícilmente se puede desprender de las paredes del mismo.

Los demás resultados obtenidos de las diferentes fechas de los análisis pueden apreciarse en el anexo.

### **3.7.2. Determinación de los ciclos de concentración**

Para el cálculo de los ciclos de concentración, se midió primeramente los datos de sílice provenientes de los distintos pozos y los datos del basín de la torre y utilizando la ecuación 2, para conocer los ciclos de concentración del cual se está purgando el agua:

$$CC = \frac{\text{Concentración de sílice purga}}{\text{Concentración de sílice en agua nueva}}$$

Sustituyendo por valores obtenidos en muestras, siendo este ejemplo, de la fecha del 2 de julio de 2013, quedará de la manera siguiente:

$$CC = \frac{58,3}{48,95}$$

$$CC = 1,19$$

Este dato indica los ciclos de concentración al cual se está purgando el agua. Para conocer los ciclos de concentración máximos a los que debería trabajar la purga, se sustituye el dato del basín analizado, por el dato de sílice máximo que se puede tener en el sistema, siempre teniendo sus tratamientos químicos adecuados, siendo este dato de 150 ppm:

$$CC_{\text{máx}} = \frac{150}{48,95}$$

$$CC_{\text{máx}} = 3,06$$

Esto indica que el agua está saliendo con una baja concentración de sólidos, por lo cual, el agua se está desperdiciando, ya que puede seguir recirculando. Los demás resultados obtenidos de los ciclos de concentración y ciclos de concentración máximos, de las diferentes fechas de los análisis, pueden apreciarse en el anexo.

Este dato es una constante sobre la concentración teórica, no solamente del sílice, sino de las demás sales que se encuentran presentes en el agua que alimenta. Con ello, se puede estimar la concentración del agua en el basín; la

dureza, la conductividad y la alcalinidad, así también, se logrará estimar la reducción de agua en la purga y de alimentación.

### 3.7.3. Determinación de la purga óptima

Determinando los ciclos de concentración óptimos, al ser evaluados por los datos críticos de operación, se lograrán determinar los caudales óptimos de la purga y del agua por medio de la determinación de la cantidad de agua evaporada, siendo esta la ecuación 1:

$$E = \frac{RR(\Delta T)F}{1\ 000}$$

Conociendo los datos de la recirculación del agua de enfriamiento, así como de la temperatura a la cual trabaja la planta en el sistema de torre de enfriamiento, se logra obtener el caudal de agua que se evapora en gpm. Sustituyendo los valores del 2 de julio de 2013:

$$E = \frac{18\ 540\ \text{gpm}\ (89,4\ ^\circ\text{F} - 78,2\ ^\circ\text{F})}{1\ 000}$$

$$E = 207,65\ \text{gpm}$$

Sustituyendo este dato en la ecuación 4, para determinar el flujo de purga al cual se estaba trabajando en esa fecha:

$$BD = \frac{E}{(CC - 1)}$$

$$BD = \frac{207,65 \text{ gpm}}{(1,19 - 1)}$$

$$BD = 1\,092,89 \text{ gpm}$$

Si se desea conocer el caudal mínimo de purga, de acuerdo a los parámetros fisicoquímicos establecidos por medio de los análisis de las muestras, ya que por parte de ello, se conoció los ciclos máximos de concentración, se pueden determinar con la misma ecuación:

$$BD_{\text{máx}} = \frac{E}{(CC_{\text{max}} - 1)}$$

$$BD_{\text{máx}} = \frac{207,65}{(3,06 - 1)}$$

$$BD_{\text{máx}} = 100,80 \text{ gpm}$$

El ahorro que se puede obtener aproximadamente, se logra visualizar mediante la diferencia que existe entre la purga evaluada (BD) y la purga máxima de acuerdo a los parámetros evaluados (BD<sub>máx</sub>):

$$\text{Ahorro} = BD - BD_{\text{máx}}$$

$$\text{Ahorro} = 1\,092,89 \text{ gpm} - 100,80 \text{ gpm}$$

$$\text{Ahorro} = 992,09 \text{ gpm}$$

Si ese dato se transforma en galones que se ahorrarían al día, los 992,09 galones por minuto equivaldrían a 1 428 609,60 galones al día respectivamente.

### 3.7.4. Ahorro económico

Al colocarle un costo al agua, de acuerdo a los precios municipales de Q 1,20 el metro cúbico de agua (264,2 galones), se logrará conocer el ahorro estimado al día del agua si se utiliza la purga al mínimo:

Ahorro económico = (costo del metro cúbico) (ahorro de agua en galones)

$$\text{Ahorro económico} = \frac{\text{costo por metro cúbico} * \text{ahorro de agua(gal)}}{\text{metro cúbico (gal)}}$$

$$\text{Ahorro económico} = \frac{Q 1,20 * 1 428 609,60 \text{ gal}}{264,2}$$

$$\text{Ahorro económico} = Q 6 488,76$$

Este ahorro refiere a los datos fisicoquímicos y de flujo del día 2 de julio del 2013, formulado a partir de las ecuaciones para el conocimiento de la purga que se maneja en esta fecha. Los demás datos tabulados del ahorro diario se podrán observar en el anexo.

### 3.8. Análisis estadístico

Inicialmente se determinó el número mínimo de corridas para que los resultados puedan ser precisos y satisfactorios, con ello, disminuir los posibles errores utilizando un número de corridas adecuadas a evaluar posteriormente.

### 3.8.1. Determinación del número de corridas

Para llevar a cabo lo anterior, se utiliza una confiabilidad en tabla de t de student de 1,96, una probabilidad de éxito del 95 % por lo que la probabilidad de fracaso es 5 %, y se estima un error estimado de 20 %.

Ecuación 7

$$N_x = \frac{Z^2_{\alpha/2} P Q_x}{e^2}$$

En donde:

$N_x$  = número de corridas

$Z_{\alpha/2}$  = confiabilidad

$P$  = probabilidad de éxito

$Q_x$  = probabilidad de fracaso

$e$  = error estimado

Sustituyendo los datos en la ecuación, con los datos anteriores, se obtiene lo siguiente:

$$N_x = \frac{(1,96)^2 (0,05)(0,95)}{0,20^2}$$

$$N_x = 4,59, \text{ aproximadamente } 5$$

Por lo tanto, la cantidad mínima de corridas a realizar es de 5.

### 3.8.2. Análisis de las corridas

Para utilizar un valor estándar de los resultados obtenidos, se realizó la determinación del valor promedio, así también el valor de la desviación estándar del mismo:

Ecuación 8

$$\dot{X} = (\sum x) / n$$

En donde:

$\dot{X}$  = promedio de datos

$\sum x$  = sumatoria de todas las corridas

n = número de corridas realizadas

Para conocer la desviación estándar de los promedios, se utilizó la siguiente ecuación:

Ecuación 9

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \dot{X}) / n}$$

En donde:

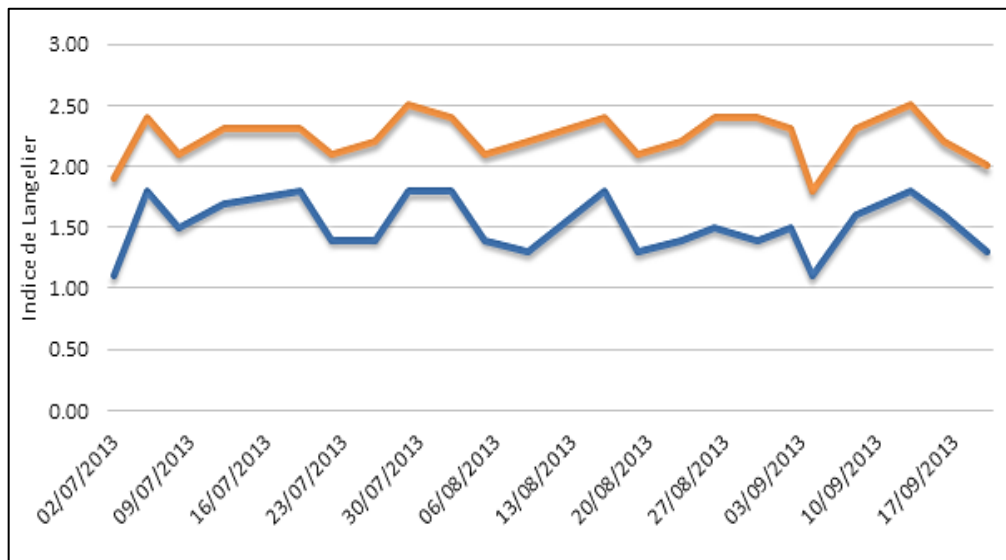
$x_i$  = número a evaluar

$\dot{X}$  = promedio de datos

n = número de corridas realizadas

## 4. RESULTADOS

Figura 15. Índice de Langelier



Fuente: elaboración propia.

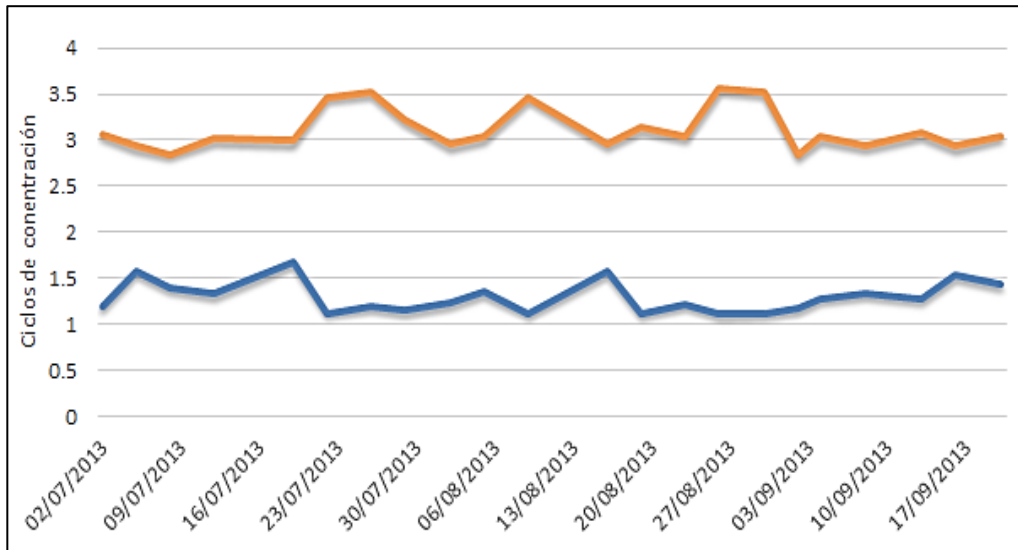
Tabla II. Índice de Langelier

Color	Gráfico	Promedio	Desviación estándar
	Índice de Langelier en el basín de la torre	1,51	0,23
	Índice de Langelier bajo los parámetros máximos	2,23	0,18

Fuente: elaboración propia.



Figura 16. Ciclos de concentración



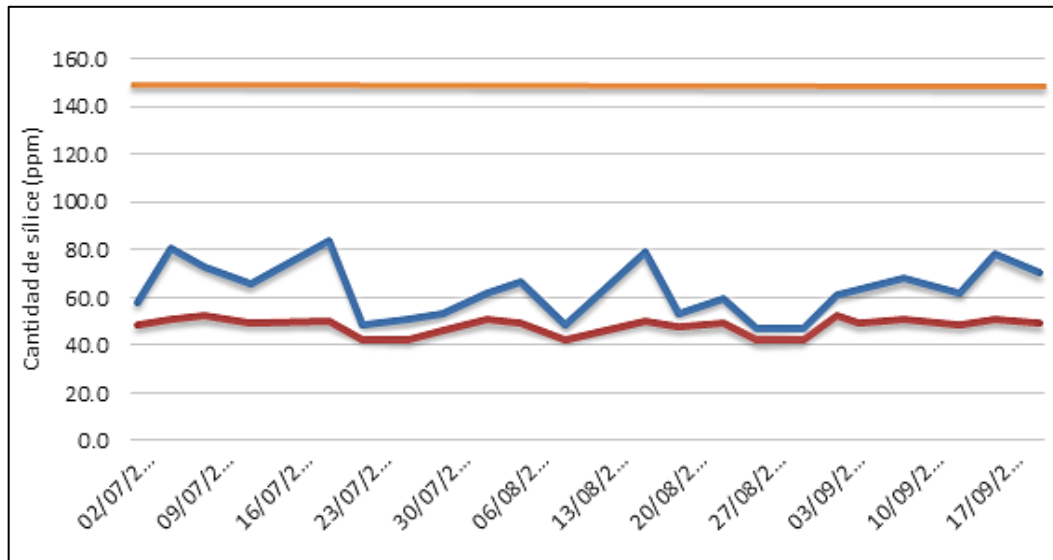
Fuente: elaboración propia.

Tabla III. Ciclos de concentración

Color	Gráfico	Promedio	Desviación estándar
	Ciclos de concentración en el basín de la torre	1,29	0,17
	Ciclos de concentración máximos	3,12	0,23

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Comportamiento del sílice en las pruebas**



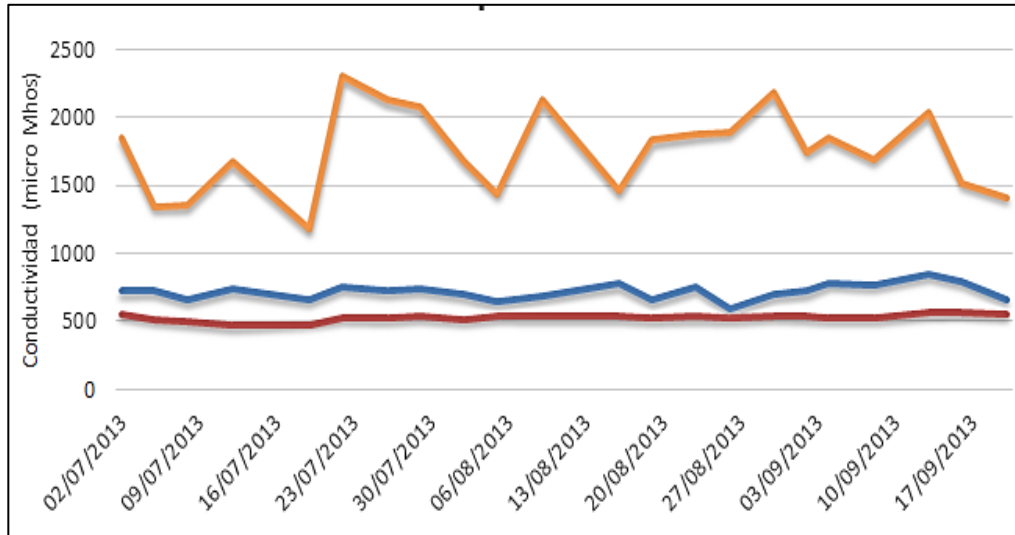
Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Comportamiento del sílice en las pruebas**

Color	Gráfico	Promedio (ppm)	Desviación estándar (ppm)
	Silice en el basín de la torre	62,93	11,37
	Promedio sílice en pozos	48,37	3,37
	Limite cantidad de sílice	150	0,0

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Comportamiento de la conductividad en las pruebas**



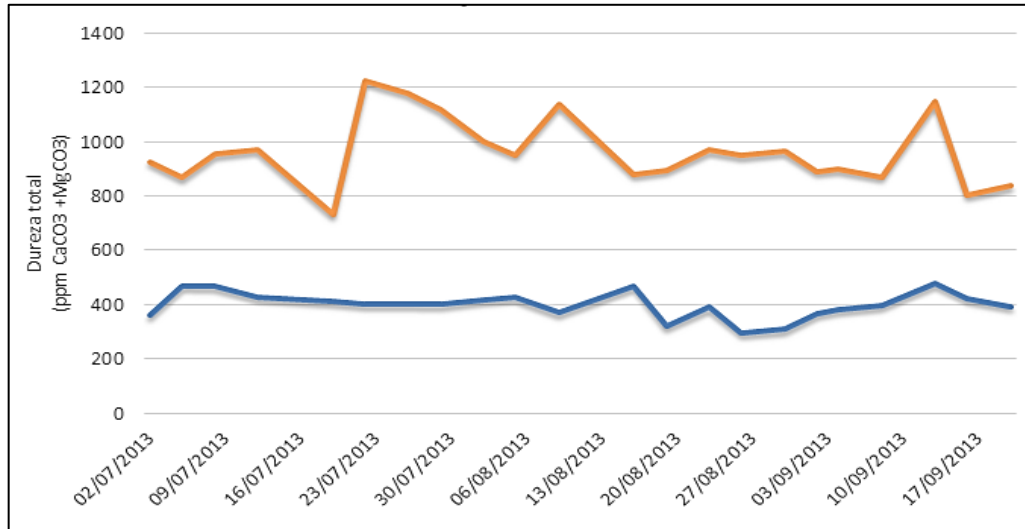
Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Comportamiento de la conductividad en las pruebas**

Color	Gráfico	Promedio (µMhos)	Desviación estándar (µMhos)
	Conductividad en el basín de la torre	717,27	58,55
	Conductividad promedio en los pozos	532,34	23,20
	Cantidad máxima en el basín de la torre	1 758,30	311,92

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Comportamiento de la dureza total en las pruebas



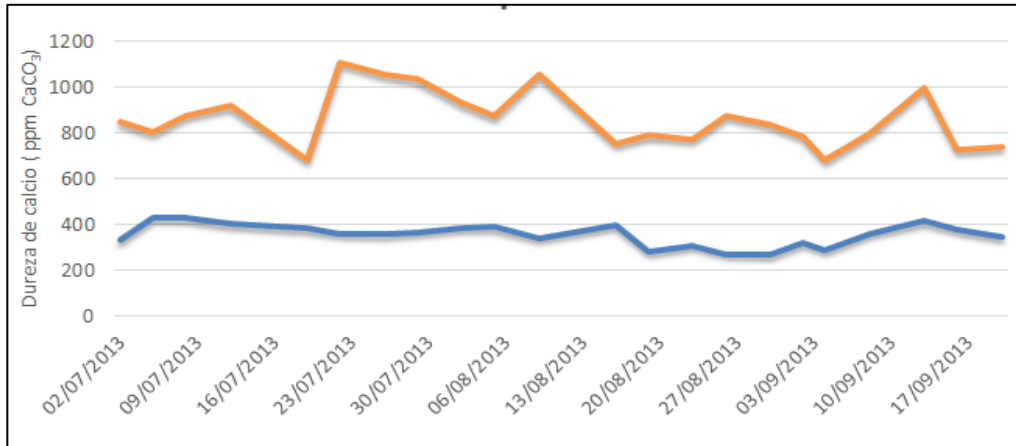
Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. Comportamiento de la dureza total en las pruebas

Color	Gráfico	Promedio (ppm)	Desviación estándar (ppm)
	Dureza en el basín de la torre	397,27	49,11
	Límite cantidad de dureza	962,31	127,20

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Comportamiento de la dureza de calcio en las pruebas**



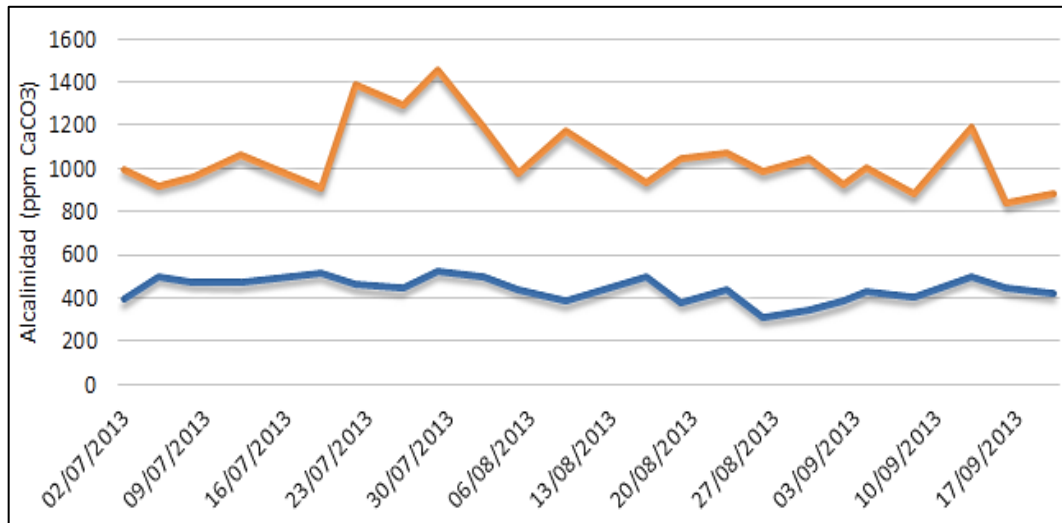
Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Comportamiento de la dureza de calcio en las pruebas**

Color	Gráfico	Promedio (ppm)	Desviación estándar (ppm)
	Dureza de calcio en el basín de la torre	353,32	48,73
	Límite cantidad de dureza de calcio	855,77	107,11

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Comportamiento de la alcalinidad en las pruebas



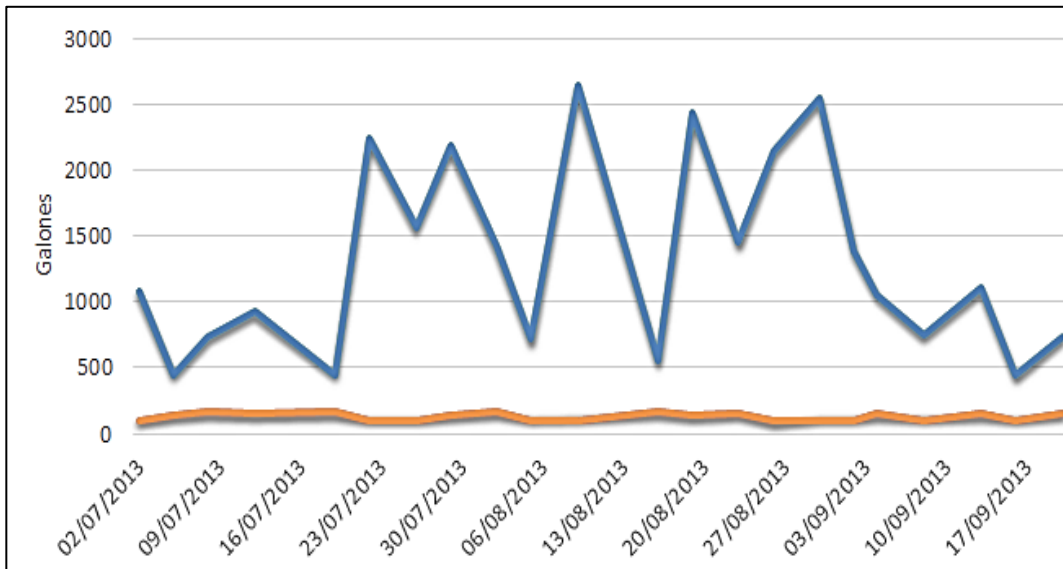
Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. Comportamiento de la alcalinidad en las pruebas

Color	Gráfico	Promedio (ppm)	Desviación estándar (ppm)
	Alcalinidad en el basín de la torre	434,64	57,65
	Límite de alcalinidad en el basín	1 054,71	167,62

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Caudal de purga**



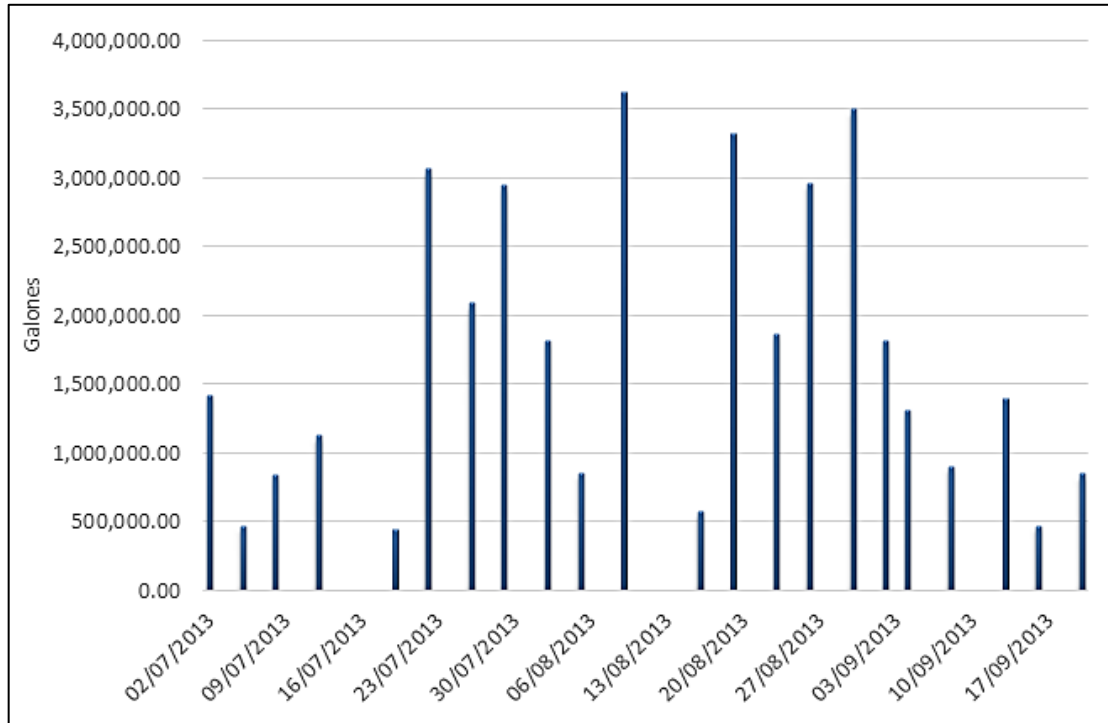
Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Caudal de purga**

Color	Gráfico	Promedio (gal)	Desviación estándar (gal)
	Caudal de purga del basín	1 324,66	736,33
	Caudal mínimo de purga del basín	136,46	19,45

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Ahorro de agua



Fuente: elaboración propia.

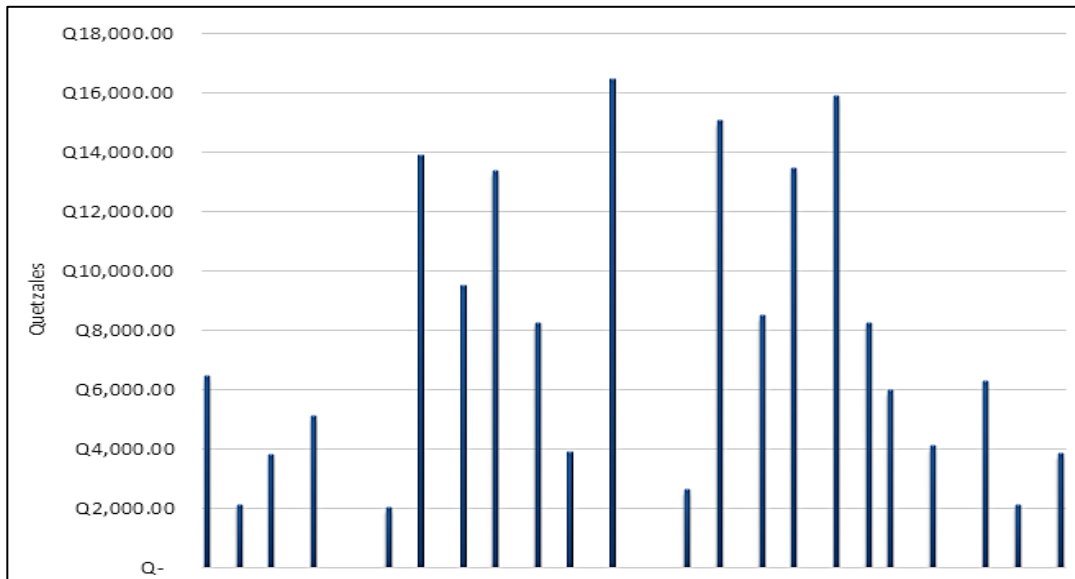
Tabla X. Ahorro de agua

Color	Gráfico	Promedio (gal)	Desviación estándar (gal)
	Galones ahorrados por día	1 711 009,53	1 070 846,95

Fuente: elaboración propia.



Figura 24. **Ahorro económico**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Ahorro económico**

Color	Gráfico	Promedio (Q)	Desviación estándar (Q)
	Ahorro económico de agua por día	7 771,43	4 863,80

Fuente: elaboración propia.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Al iniciar la evaluación de los análisis fisicoquímicos del agua de la torre, se realizó el análisis del índice de Langelier, el cual informa la prevención que debe tomarse en la torre de enfriamiento, para conocer el problema a tratar sea corrosivo o incrustante. Los resultados, de acuerdo a los análisis de conductividad, pH, dureza y alcalinidad, mostraron que el agua a analizar tiene tendencia incrustante (resultados mayores a 0). Por lo cual, los análisis se enfocaron para la obtención del caudal óptimo de purga del basín de la torre, en las sales causantes de las incrustaciones.

Los resultados máximos a obtener fueron estimados de manera que también al utilizar el caudal óptimo, se pueda evitar problemas de incrustación de forma rápida, siempre teniendo en cuenta que la empresa le de mantenimiento químico al sistema. De acuerdo a los ciclos de concentración máximos del sistema, el índice de Langelier no sobrepasa el límite máximo expuesto (+2,5), por lo que el agua puede manejarse hasta los parámetros máximos expuestos.

La razón de la realización de los análisis fisicoquímicos (conductividad y sílice en el agua), en los pozos que brindan agua al sistema de enfriamiento, es de conocer los parámetros principales del control de los ciclos de concentración, colocando al sílice como base de la medición de los ciclos de concentración, ya que es una sal que perjudica severamente los sistemas de enfriamiento por la dificultad de desprendimiento de las paredes de los equipos y tuberías del sistema.

De la prevención de los problemas que puede causar el sílice en la formación de incrustaciones en el sistema, se trabaja los análisis con base en el límite de los ciclos de concentración de sílice, siendo este de 150 partes por millón. Con ello, los análisis muestran, en la figura 16, el resultado promedio de 1,28 ciclos concentración en el basín de la torre, mostrando que únicamente se da una concentración cíclica de 0,28. El agua no está siendo concentrada y puede ser concentrada 1,84 ciclos más, con ello, se lograría alcanzar los parámetros de límite para un ahorro máximo por disminución de caudal de purga.

Los análisis de sílice muestran, en varios puntos de la figura 17, la similitud en los resultados, entre el agua de la torre y el agua proveniente de los pozos. Esto expresa que el agua se mantiene como “nueva” en la circulación en el sistema de enfriamiento al no existir una concentración de sales. Los resultados dan como promedio 20 partes por millón mayor a la cantidad promedio que proviene de los pozos, esta cantidad no supera la mitad de la cantidad límite de sales de sílice en el agua del basín de la torre. La figura muestra la gran posibilidad de reutilizar el agua, manteniendo el control de la contaminación del agua, así también un ahorro en el desperdicio de los agentes desincrustantes en el agua, que son desechados en la purga de forma rápida.

Una de las maneras versátiles de analizar el agua, es por medio de la conductividad. Ya que esta herramienta informa la cantidad de sólidos que se encuentran dentro del agua. La figura 18 muestra la cantidad de sólidos en el agua de la torre durante el período de prueba, mostrando la similitud que existe entre el agua de la torre y el agua proveniente de los pozos, ambas se encuentran separadas, en gran cantidad, del límite establecido. La conductividad también muestra un resumen de los análisis evaluados, donde confirma que el agua del basín tiene características similares al agua que

proviene de los pozos de alimentación, indicando que el agua no está teniendo una recirculación y que está realizando el proceso de enfriamiento al menos una vez y luego es desechada.

En las figuras 19, 20 y 21 muestran el comportamiento de la dureza y alcalinidad del basín de la torre, así también de las cantidades máximas a las que puede trabajar el sistema de enfriamiento. Estos datos máximos son obtenidos al multiplicar los análisis del basín con los ciclos de concentración, ya que estas sales se concentran al mismo ritmo que la concentración de las sales de sílice, debido a que las sales en solución no se evaporan en conjunto con el agua.

Como se puede observar en estas tres figuras, la cantidad máxima varía en el transcurso de las pruebas, debido a que los parámetros del agua de pozo para la determinación de los ciclos de concentración, no son constantes, por lo cual, existen días en los que los ciclos de concentración puedan aumentar y pueda reutilizarse y optimizar el uso del agua de enfriamiento.

Como resultado de los análisis realizados se puede estimar el caudal mínimo de purga, el cual se muestra en la figura 22. Dependiendo de la concentración de sales en el pozo, se puede tener un manejo óptimo de la purga para tener un ahorro en el consumo de agua. La figura muestra grandes variaciones por el cuidado que se tiene con respecto a los límites de concentración de sales, para que el ahorro de agua, no tenga un efecto perjudicial en el equipo y tubería del sistema de enfriamiento.

Transformando los datos de ahorro de agua en variables económicas, se puede estimar el ahorro, en quetzales, al disminuir el caudal de la purga. Como muestra la figura 23, los ahorros varían en grandes intervalos, debido a la

calidad del agua de pozo, en donde el agua con menos sales puede tener una mayor recirculación y por ende, mayor ahorro económico.

El ahorro mínimo es de Q 2 021,02 y el máximo de Q 15 889,62 al día, respectivamente, en donde se podía lograr un mayor ahorro el día 30 de agosto de 2013. Ese día, las características del agua de pozo no solamente fueron bajas, sino el agua de la torre que se manejaba era de 1,12 ciclos de concentración. En los datos, muestran también, que el agua de alimentación, tenía mayor caudal que el de la purga.

## CONCLUSIONES

1. El caudal óptimo de purga para lograr la mayor afluencia del proceso de enfriamiento en la torre, sin perjudicar al sistema es de 136,46 galones por minuto, con desviación de 19,44 galones por minuto.
2. Los principales contaminantes son las sales de calcio 353,32 ppm, magnesio de 44,14 ppm y sílice 63 ppm. Las características del agua no ejercen ninguna influencia negativa en el proceso, teniendo el resultado promedio de 1,26 ciclos de concentración.
3. El tipo de contaminación que se produce en el sistema es de tendencia para la formación de incrustación, dando el índice de Langelier +1,5 en promedio.
4. La eficiencia del proceso tendrá una reducción en el consumo de agua del 89,70 %, siendo el ahorro en costo de Q 7 771,43 diarios en promedio, con base en precios de agua municipales.



## RECOMENDACIONES

1. Aplicar el caudal óptimo de purga al sistema de la torre de enfriamiento, que fue obtenido en el presente trabajo.
2. Controlar la purga del basín de la torre de enfriamiento en función de la concentración de sílice, manteniéndose debajo de las 150 partes por millón y el índice de Langelier no sobrepase a +2,5.
3. Controlar el agua de alimentación, disminuyendo el consumo máximo, así también el control de los químicos desincrustantes y biocidas, ya que al purgar el agua del basín, también se estará purgando los químicos que benefician al sistema y esto aumentará su consumo.





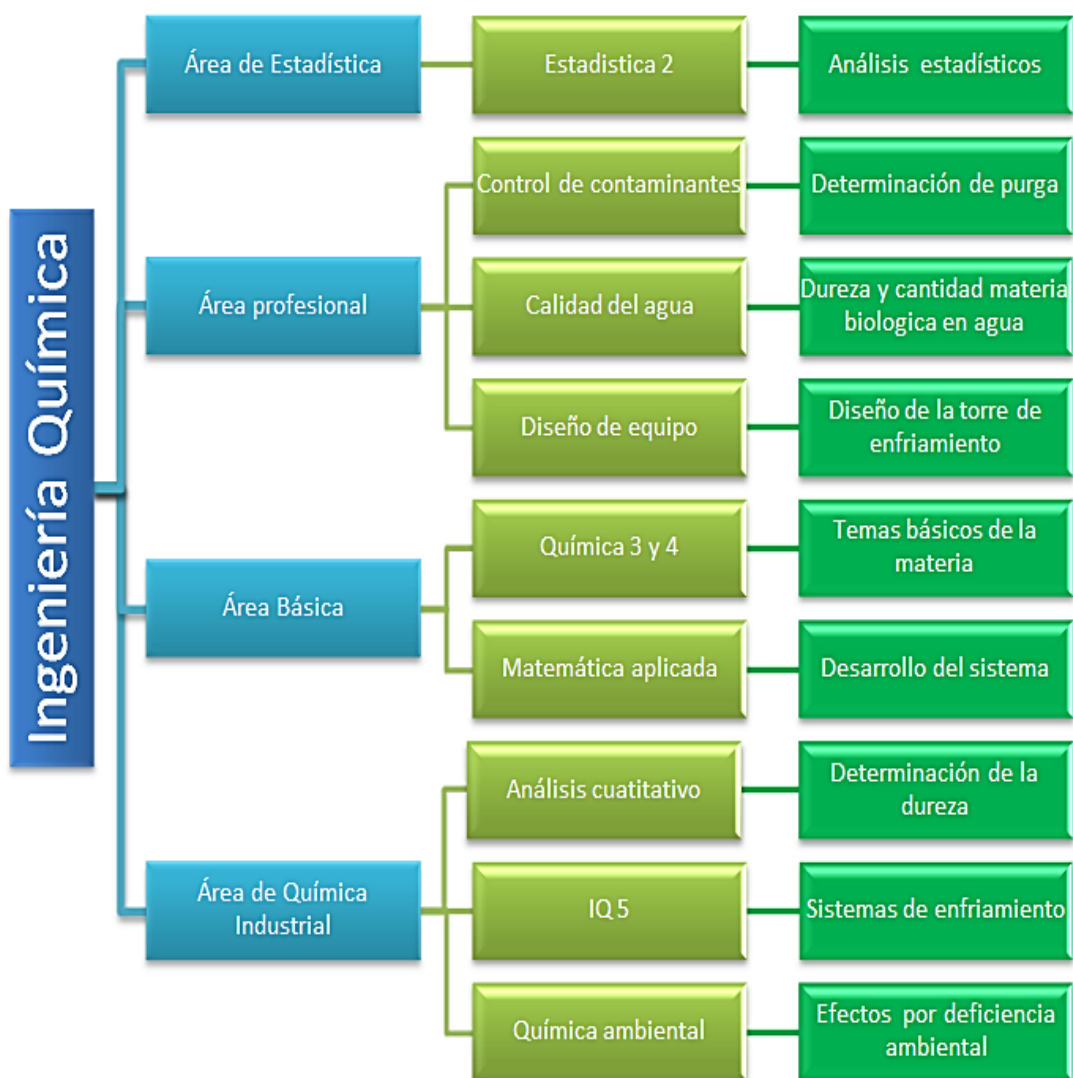
## BIBLIOGRAFÍA

1. AXPUC BÁMACA, Melvin Ezequiel. *Operación y mantenimiento de la torre de enfriamiento del Ingenio Santa Ana*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 133 p.
2. BETZ LABORATORIES. *Betz Handbook of industrial water conditioning*. 9th ed. USA: Betz Laboratories, 1991. 417 p.
3. CARÍAS M., Alex F. *Análisis termodinámico y propuesta de mejora de eficiencia de torre de enfriamiento, en el Área de Cogeneración, Ingenio Tzulá*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. 148 p.
4. HADZICH, M. *Termodinámica: problemas y aplicaciones de ingeniería*. Perú: Universidad PUCP, 2006. p. 350.
5. LENNTECH, B. V. *Torres de enfriamiento*. [en línea]. <<http://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/refrigeracion/torres-enfriamiento.htm>>. [Consulta: 20 de enero de 2013].
6. McCABE, Warren L. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 4a ed. España: McGraw-Hill, 1991. 1,211 p.

7. MONSALVE P., Juan G. *Diseño y construcción de una torre de enfriamiento para la unidad de vapor Omnisyn Westinghouse de la Escuela de Ingeniería Mecánica*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, 1985. 31 p.
  
8. OOCITIES. *Parámetros y características de aguas naturales*. [en línea]. <<http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/parametros1.pdf>>. [Consulta: 19 de agosto de 2013].
  
9. WALPOLE, Ronald E.; MYERS, Raymond H.; MYERS, Sharon L. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 6a ed. México: Pearson Educación, 1999. 816 p.

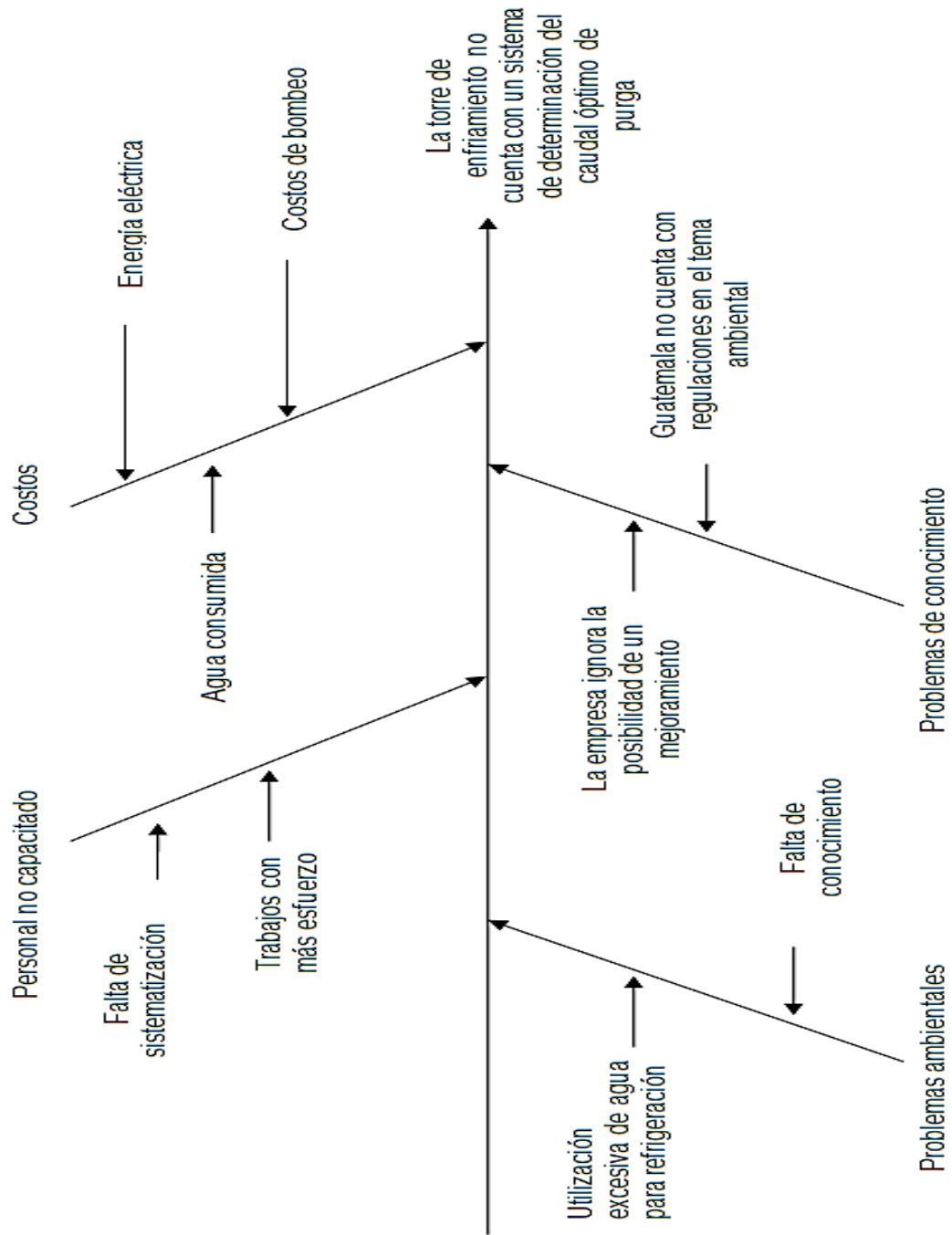
# APÉNDICES

## Apéndice 1. Requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

## ANEXOS

### Anexo 1. Datos para el índice de Langelier

I		II		III		IV	
Conductividad (µmhos)		Temperatura (°F)		Dureza calcio (ppm)		Alcalinidad total "M" (ppm)	
50-399	0,1	32-35	2,6	9,000-10,000	0,6	10,00-11,00	1
400-1 000	0,2	36-42	2,6	10,00-11,00	0,7	12,00-13	1,1
		43-48	2,4	12,00-13	0,8	14-17	1,2
		49-57	2,3	14-17	0,9	18-22	1,3
		58-62	2,2	18-22	1	23-27	1,4
		63-70	2,1	23-27	1,1	28-35	1,5
		71-80	2	28-34	1,2	36-44	1,6
		81-88	1,9	35-43	1,3	45-55	1,7
		89-99	1,8	44-55	1,4	56-69	1,8
		100-110	1,7	56-69	1,5	70-88	1,9
		111-122	1,6	70-87	1,6	89-110	2
		123-132	1,5	88-110	1,7	111-139	2,1
		133-146	1,4	111-138	1,8	140-176	2,2
		147-160	1,3	139-174	1,9	177-220	2,3
		161-178	1,2	175-229	2	221-270	2,4
				230-270	2,1	271-350	2,5
				271-340	2,2	351-440	2,6
				341-430	2,3	441-550	2,7
				431-550	2,4	551-690	2,8
				551-690	2,5	691-880	2,9
				691-980	2,6	881-1 000	3
				981-1 000	2,7		

Fuente: BETZ LABORATORIES. *Betz Handbook of industrial water conditioning*. p. 43.

Anexo 2. **Datos de análisis fisicoquímicos realizados del agua del basín de la torre**

Corrida	Fecha	pH	Conductividad µMhos	Dureza total ppm	Dureza calcio ppm	Dureza magnesio ppm	Alcalinidad total ppm	Silice SiO <sub>2</sub> ppm
1	02/07/2013	7,60	720	360	328	32	388	58,3
2	05/07/2013	8,10	723	466	428	38	496	80,6
3	08/07/2013	7,80	660	465	425	40	470	73,2
4	12/07/2013	8,00	735	426	400	26	466	65,8
5	19/07/2013	8,10	661	410	380	30	510	84,0
6	22/07/2013	7,70	754	400	360	40	456	49,0
7	26/07/2013	7,80	722	400	356	44	440	50,9
8	29/07/2013	8,10	739	398	366	32	520	53,4
9	02/08/2013	8,10	696	416	384	32	496	62,3
10	05/08/2013	7,80	642	424	386	38	436	66,8
11	09/08/2013	7,80	688	368	340	28	380	48,5
12	16/08/2013	8,10	773	466	396	70	496	79,4
13	19/08/2013	7,80	655	320	280	40	376	53,6
14	23/08/2013	7,90	751	388	308	80	432	60,1
15	26/08/2013	8,10	592	296	272	24	308	46,8
16	30/08/2013	8,10	697	308	266	46	336	47,9
17	02/09/2013	8,00	719	366	320	46	380	61,6
18	04/09/2013	7,60	783	380	286	94	424	63,4
19	08/09/2013	8,00	768	395	360	35	400	68,0
20	13/09/2013	8,10	846	476	412	64	496	62,2
21	16/09/2013	8,00	793	420	376	44	440	78,3
22	20/09/2013	7,70	663	392	344	48	416	70,3

Fuente: pruebas de laboratorio.

Anexo 3. **Datos de análisis fisicoquímicos del agua de los pozos para suministro de la torre**

Corrida	Fecha	Pozo A= 350 GPM		Pozo B= 350 GPM		Pozo C = 1 000 GPM	
		Conductividad	Silíce	Conductividad	Silíce	Conductividad	Silíce
1	02/07/2013	out	out	633	55,1	534	46,8
2	05/07/2013	572	54,8	out	out	503	49,9
3	08/07/2013	533	59,2	out	out	488	50,1
4	12/07/2013	536	55,3	out	out	446	47,9
5	19/07/2013	542	57,2	out	out	478	47,8
6	22/07/2013	out	Out	586	52,2	515	46,8
7	26/07/2013	out	Out	591	51,9	503	47,9
8	29/07/2013	out	Out	612	56,1	518	52,0
9	02/08/2013	out	out	569	55,3	500	49,3
10	05/08/2013	out	out	627	55,1	511	47,6
11	09/08/2013	out	out	601	47,0	514	42,0
12	16/08/2013	610	58,3	out	out	514	47,9
13	19/08/2013	590	57,3	out	out	504	50,2
14	23/08/2013	583	58,8	out	out	520	46,0
15	26/08/2013	613	49,6	out	out	499	42,3
16	30/08/2013	622	49,9	out	out	522	43,9
17	02/09/2013	620	55,3	out	out	512	51,8
18	04/09/2013	640	58	580	55,9	514	47,3
19	08/09/2013	out	out	540	56,3	526	49,2
20	13/09/2013	out	out	603	56,2	555	46,3
21	16/09/2013	out	out	593	55,0	561	49,9
22	20/09/2013	out	out	588	54,9	543	47,3

Fuente: pruebas de laboratorio.



Anexo 4. **Datos fisicoquímicos del agua de alimentación de entrada al sistema y ciclos de concentración**

<b>Corrida</b>	<b>Fecha</b>	<b>Mezcla alimentación conductividad</b>	<b>Mezcla alimentación sílice</b>	<b>Diferencia sílice, torrepozo</b>	<b>Ciclos de concentración</b>
1	02/07/2013	559,666667	48,9519	9,35	1,19096618
2	05/07/2013	520,888889	51,1704	29,43	1,57513028
3	08/07/2013	499,666667	52,4593	20,74	1,39536854
4	12/07/2013	469,333333	49,8185	15,98	1,32079399
5	19/07/2013	494,592593	50,2370	33,76	1,67207313
6	22/07/2013	533,407407	43,3000	5,70	1,13163972
7	26/07/2013	525,814815	42,6780	8,22	1,19265195
8	29/07/2013	542,37037	46,6589	6,74	1,14447619
9	02/08/2013	517,888889	50,8556	11,44	1,22503823
10	05/08/2013	541,074074	49,5444	17,26	1,34828437
11	09/08/2013	536,555556	43,2963	5,20	1,1201882
12	16/08/2013	538,888889	50,5963	28,80	1,56928483
13	19/08/2013	526,296296	47,8698	5,73	1,11970433
14	23/08/2013	536,333333	49,3185	10,78	1,21860919
15	26/08/2013	528,555556	42,1567	4,64	1,11014382
16	30/08/2013	547,925926	42,6587	5,24	1,12286591
17	02/09/2013	540	52,7074	8,89	1,16871618
18	04/09/2013	531,111111	49,5296	13,87	1,28004188
19	08/09/2013	529,62963	51,0407	16,96	1,33226907
20	13/09/2013	567,444444	48,8667	13,33	1,2728513
21	16/09/2013	569,296296	51,2222	27,08	1,52863341
22	20/09/2013	554,666667	49,2704	21,03	1,42682102

Fuente: pruebas de laboratorio.

**Anexo 5. Resultados de la estimación del índice de Langelier de acuerdo a las constantes establecidas**

Corrida	Fecha	I: conductividad	II: temperatura	III: dureza de calcio	IV: alcalinidad total	pH de saturación	Índice de Langelier
1	02/07/2013	0,2	1,8	2,2	2,6	6,5	1,10
2	05/07/2013	0,2	1,8	2,3	2,7	6,3	1,80
3	08/07/2013	0,2	1,8	2,3	2,7	6,3	1,50
4	12/07/2013	0,2	1,8	2,3	2,7	6,3	1,70
5	19/07/2013	0,2	1,8	2,3	2,7	6,3	1,80
6	22/07/2013	0,2	1,8	2,3	2,7	6,3	1,40
7	26/07/2013	0,2	1,8	2,3	2,6	6,4	1,40
8	29/07/2013	0,2	1,8	2,3	2,7	6,3	1,80
9	02/08/2013	0,2	1,8	2,3	2,7	6,3	1,80
10	05/08/2013	0,2	1,8	2,3	2,6	6,4	1,40
11	09/08/2013	0,2	1,8	2,2	2,6	6,5	1,30
12	16/08/2013	0,2	1,8	2,3	2,7	6,3	1,80
13	19/08/2013	0,2	1,8	2,2	2,6	6,5	1,30
14	23/08/2013	0,2	1,8	2,2	2,6	6,5	1,40
15	26/08/2013	0,2	1,8	2,2	2,5	6,6	1,50
16	30/08/2013	0,2	1,8	2,1	2,5	6,7	1,40
17	02/09/2013	0,2	1,8	2,2	2,6	6,5	1,50
18	04/09/2013	0,2	1,8	2,2	2,6	6,5	1,10
19	08/09/2013	0,2	1,8	2,3	2,6	6,4	1,60
20	13/09/2013	0,2	1,8	2,3	2,7	6,3	1,80
21	16/09/2013	0,2	1,8	2,3	2,6	6,4	1,60
22	20/09/2013	0,2	1,8	2,3	2,6	6,4	1,30

Fuente: pruebas de laboratorio y ecuación 6.

Anexo 6. **Ciclos de concentración y ciclos de concentración máximos a los que puede operar la torre de enfriamiento**

Corrida	Fecha	Mezcla sílice	Ciclos de concentración	Sílice SiO <sub>2</sub> máxima ppm	Ciclos de concentración máximos torre
1	02/07/2013	48,9519	1,19096618	150,00	3,06
2	05/07/2013	51,1704	1,57513028	150,00	2,93
3	08/07/2013	52,4593	1,39536854	150,00	2,86
4	12/07/2013	49,8185	1,32079399	150,00	3,01
5	19/07/2013	50,2370	1,67207313	150,00	2,99
6	22/07/2013	43,3000	1,13163972	150,00	3,46
7	26/07/2013	42,6780	1,19265195	150,00	3,51
8	29/07/2013	46,6589	1,14447619	150,00	3,21
9	02/08/2013	50,8556	1,22503823	150,00	2,95
10	05/08/2013	49,5444	1,34828437	150,00	3,03
11	09/08/2013	43,2963	1,1201882	150,00	3,46
12	16/08/2013	50,5963	1,56928483	150,00	2,96
13	19/08/2013	47,8698	1,11970433	150,00	3,13
14	23/08/2013	49,3185	1,21860919	150,00	3,04
15	26/08/2013	42,1567	1,11014382	150,00	3,56
16	30/08/2013	42,6587	1,12286591	150,00	3,52
17	02/09/2013	52,7074	1,16871618	150,00	2,85
18	04/09/2013	49,5296	1,28004188	150,00	3,03
19	08/09/2013	51,0407	1,33226907	150,00	2,94
20	13/09/2013	48,8667	1,2728513	150,00	3,07
21	16/09/2013	51,2222	1,52863341	150,00	2,93
22	20/09/2013	49,2704	1,42682102	150,00	3,04

Fuente: pruebas de laboratorio y ecuaciones 2 y 6.

**Anexo 7. Datos fisicoquímicos de acuerdo a los ciclos de concentración máximos**

Corrida	Fecha	Conductividad máxima $\mu$ Mhos	Dureza total máxima ppm	Dureza calcio máxima ppm	Dureza magnesio máxima ppm	Alcalinidad total máxima ppm
1	02/07/2013	1 852,49	926,24	843,91	82,33	998,28
2	05/07/2013	1 345,53	867,25	796,53	70,72	923,08
3	08/07/2013	1 352,46	952,87	870,90	81,97	963,11
4	12/07/2013	1 675,53	971,12	911,85	59,27	1 062,31
5	19/07/2013	1 180,36	732,14	678,57	53,57	910,71
6	22/07/2013	2 308,16	1 224,49	1 102,04	122,45	1 395,92
7	26/07/2013	2 127,70	1 178,78	1 049,12	129,67	1 296,66
8	29/07/2013	2 075,84	1 117,98	1 028 09	89,89	1 460,67
9	02/08/2013	1 675,76	1 001,61	924,56	77,05	1 194,22
10	05/08/2013	1 441,62	952 10	866,77	85,33	979,04
11	09/08/2013	2 127,84	1 138,14	1 051,55	86,60	1 175,26
12	16/08/2013	1 460,33	880,35	748,11	132,24	937,03
13	19/08/2013	1 833,02	895,52	783,58	111,94	1 052,24
14	23/08/2013	1 874,38	968,39	768,72	199,67	1 078,20
15	26/08/2013	1 897,44	948,72	871,79	76,92	987,18
16	30/08/2013	2 182,67	964,51	832,99	144,05	1 052,19
17	02/09/2013	1 750,81	891,23	779,22	112,01	925,32
18	04/09/2013	1 852,52	899,05	676,66	222,40	1 003,15
19	08/09/2013	1 694,12	871,32	794,12	77,21	882,35
20	13/09/2013	2 040,19	1 147,91	993,57	154,34	1 196,14
21	16/09/2013	1 519,16	804,60	720,31	84,29	842,91
22	20/09/2013	1 414 ,5	836,42	734,00	102,42	887,62

Fuente: pruebas de laboratorio y ecuación 2.

Anexo 8. **Resultados del consumo de agua y ahorro de acuerdo a los ciclos de concentración máximos**

<b>Corrida</b>	<b>Fecha</b>	<b>Purga mínima (gpm)</b>	<b>Alimentación mínima (gpm)</b>	<b>Ahorro económico del agua (Q)</b>
1	02/07/2013	100,5931758	308,2411758	6 453,91
2	05/07/2013	138,1589645	404,9969645	2 130,91
3	08/07/2013	158,0241166	451,8481166	3 827,11
4	12/07/2013	148,2534022	446,3804022	5 108,70
5	19/07/2013	158,0727692	471,9807692	2 021,02
6	22/07/2013	120,0420469	415,8500469	13 912,04
7	26/07/2013	120,4031631	423,1799631	9 491,72
8	29/07/2013	142,5659389	458,3239389	13 362,05
9	02/08/2013	164,5582049	485,3694049	8 247,75
10	05/08/2013	123,0567605	372,5647605	3 880,71
11	09/08/2013	129,0123981	446,9633981	16 458,71
12	16/08/2013	163,0756616	483,4612616	2 614,31
13	19/08/2013	136,8419373	428,7943373	15 056,91
14	23/08/2013	155,5913173	473,2238173	8 485,50
15	26/08/2013	92,49394971	329,1076497	13 445,51
16	30/08/2013	124,7142234	438,5303234	15 889,62
17	02/09/2013	126,9419935	361,2641935	8 253,54
18	04/09/2013	146,1264116	442,5424116	5 967,18
19	08/09/2013	129,4415459	380,4065459	4 093,47
20	13/09/2013	146,3933877	449,3657877	6 305,04
21	16/09/2013	122,9676274	360,1004274	2 129,65
22	20/09/2013	154,7559018	471,1429018	3 836,06

Fuente: pruebas de laboratorio y ecuación 2.