



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO -  
TORRE Y-ME3003B DE LA REFINERÍA ESTATAL  
ESMERALDAS”**

**Previa la obtención del Título de:  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR:  
MÓNICA ALEXANDRA MEDINA VIZUETE**

**RIOBAMBA – ECUADOR  
-2010-**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios y a mi familia por apoyarme siempre incondicionalmente y ser quienes han guiado mi vida.

Mi sincero agradecimiento a la Refinería Estatal de Esmeraldas por haberme brindado la oportunidad de realizar el presente trabajo de investigación, especialmente a los operadores de turno y al Jefe de área Ing. Peter Pullas.

A mi Director de Tesis Ing. Mario Villacrés y al Ing. Marco Chuiza por haberme dado su colaboración en la elaboración de esta tesis.

## **DEDICATORIA**

Con mucho amor y respeto a Dios por ser el ser supremo que siempre me ha cuidado y me ha dado las fortalezas para seguir día a día, demostrándome siempre su infinito amor.

A mis padres Raúl y Mónica, por apoyarme y aconsejarme siempre.

A mi Tía Laura Medina, a mis primos Santiago Fiallos y Luis Fiallos, por haberme brindado el calor humano y el cariño necesario para sentir que tengo una hermosa familia sobre todo durante mi estadía en la ciudad de Riobamba en el transcurso de mi carrera Universitaria.

Yo, Mónica Alexandra Medina Vizuite, soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este trabajo y el patrimonio intelectual de este informe que pertenece a la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo.

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

|                              |                                                  |
|------------------------------|--------------------------------------------------|
| <b>REE</b>                   | Refinería Estatal Esmeraldas                     |
| <b>CONCAL</b>                | Control de Calidad                               |
| <b>Kw</b>                    | kilowatts                                        |
| <b>kg</b>                    | kilogramo                                        |
| <b>h</b>                     | hora                                             |
| <b>HP</b>                    | Horse Power, caballo de fuerza, 550 libras-pie/s |
| <b>m</b>                     | metros                                           |
| <b>s</b>                     | segundos                                         |
| <b>lbs</b>                   | libras                                           |
| <b>°C</b>                    | Grados Celsius                                   |
| <b>%</b>                     | porcentaje                                       |
| <b>rpm</b>                   | Revoluciones por minuto                          |
| <b><math>\Delta T</math></b> | Diferencia de temperatura                        |
| <b>Te</b>                    | Temperatura de entrada                           |

|                         |                                       |
|-------------------------|---------------------------------------|
| <b>T<sub>S</sub></b>    | Temperatura de salida                 |
| <b>T<sub>BH</sub></b>   | Temperatura de bulbo Húmedo           |
| <b>T<sub>BS</sub></b>   | Temperatura de bulbo seco             |
| <b>H</b>                | Entalpía                              |
| <b>H<sub>L</sub></b>    | Entalpía del agua                     |
| <b>H<sub>G</sub></b>    | Entalpía del aire                     |
| <b>G<sub>L</sub></b>    | Flujo Líquido                         |
| <b>G<sub>G</sub></b>    | Flujo de aire                         |
| <b>G'<sub>G</sub></b>   | Flujo de aire para cada ventilador    |
| <b>C<sub>L</sub></b>    | Capacidad calórica del agua           |
| <b>d<sub>H2O</sub></b>  | Densidad del agua (1Kg/L)             |
| <b>d<sub>Aire</sub></b> | Densidad del aire (1.293 g/L)         |
| <b>P</b>                | Potencia del ventilador               |
| <b>Y<sub>S</sub></b>    | Humedad a las diferentes temperaturas |
| <b>P<sub>w</sub></b>    | Presión de saturación                 |
| <b>P<sub>v</sub></b>    | Presión parcial del vapor en el gas   |

## TABLA DE CONTENIDO

|                    | Pp: |
|--------------------|-----|
| RESUMEN.....       | i   |
| SUMMARY.....       | ii  |
| INTRODUCCIÓN.....  | iii |
| ANTECEDENTE.....   | iv  |
| JUSTIFICACIÓN..... | v   |
| OBJETIVOS.....     | vi  |

### CAPÍTULO I

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. MARCO TEÓRICO .....                                                    | 1  |
| 1.1. TORRES DE ENFRIAMIENTO .....                                         | 1  |
| 1.1.1. GENERALIDADES.....                                                 | 1  |
| 1.1.2. LA EVAPORACIÓN - CAUSA DE ENFRIAMIENTO.....                        | 2  |
| 1.1.3. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO ..... | 2  |
| 1.1.5. TEORÍA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO .....                           | 4  |
| 1.1.6. CONCEPTOS BÁSICOS.....                                             | 6  |
| 1.1.7. FUNCIONAMIENTO TORRES DE ENFRIAMIENTO .....                        | 12 |
| 1.1.8. CLASIFICACIÓN DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO .....                  | 13 |
| 1.1.9. TORRES DE ENFRIAMIENTO DE TIRO NATURAL.....                        | 14 |
| 1.2. TORRES DE ENFRIAMIENTO DE TIRO MECÁNICO .....                        | 14 |
| 1.2.1. TORRES DE TIRO FORZADO: .....                                      | 14 |
| 1.2.2. TORRES DE TIRO INDUCIDO: .....                                     | 15 |
| 1.2.3. TORRES DE FLUJO A CONTRACORRIENTE.....                             | 15 |

Pp:

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.2.4. TORRES DE FLUJO CRUZADO .....                                           | 16 |
| 1.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO – TORRE Y-ME 3003B DE LA REE..... | 17 |
| 1.4. TRATAMIENTO DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO .....                                | 20 |
| 1.5. EFICIENCIA DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO .....                              | 21 |

## **CAPÍTULO I**

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| 2. PARTE EXPERIMENTAL .....                                            | 23 |
| 2.1. MUESTREO .....                                                    | 23 |
| 2.2.1. MÉTODO EXPERIMENTAL .....                                       | 23 |
| 2.2.2. TÉCNICAS.....                                                   | 24 |
| 2.2.2.1. CLORO RESIDUAL.....                                           | 25 |
| 2.2.2.2. CONDUCTIVIDAD.....                                            | 25 |
| 2.2.2.3. DUREZA .....                                                  | 26 |
| 2.2.2.4. FOSFATOS .....                                                | 28 |
| 2.2.2.5. MATERIA ORGÁNICA.....                                         | 29 |
| 2.2.2.6. pH .....                                                      | 29 |
| 2.2.2.7. SÍLICE – SiO <sub>2</sub> .....                               | 30 |
| 2.2.2.8. TURBIDÉZ .....                                                | 31 |
| 2.3. DATOS EXPERIMENTALES .....                                        | 32 |
| 2.3.1. DIAGNÓSTICO DE LATORRE DE ENFRIAMIENTO Y-ME3003B DE LA REE..... | 32 |

## **CAPÍTULO III**

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 3. CÁLCULOS Y RESULTADOS ..... | 43 |
| 3.1. CÁLCULOS.....             | 44 |
| 3.1.1. DATOS ADICIONALES ..... | 44 |



Pp:

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.2.4. CÁLCULO DE LA CORRIENTE GASEOSA.....              | 57 |
| 3.2. RESULTADOS.....                                       | 71 |
| 3.2.1. ENTALPÍAS DEL AIRE Y DE INTERFASE .....             | 71 |
| 3.2.2. RESULTADOS ANTES Y DESPUÉS DE LA OPTIMIZACIÓN ..... | 73 |
| 3.2.3. RECURSO PRESUPUESTARIO .....                        | 73 |
| 3.3. PROPUESTA.....                                        | 75 |

#### **CAPÍTULO IV**

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 76 |
|--------------------------------------------|----|

#### **CAPÍTULO V**

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ..... | 77 |
| 5.1. CONCLUSIONES .....                 | 77 |
| 5.2. RECOMENDACIONES .....              | 79 |

## **RESUMEN**

En este trabajo de investigación se llevó a cabo el estudio experimental, para lo que se realizó una serie de mediciones durante un periodo de veinte días, con los instrumentos apropiados para obtención de datos reales de operación de la torre de enfriamiento Y-ME3003B de la REE, para poder realizar un diagnóstico técnico del estado actual del referente antes mencionado. Posteriormente se hicieron análisis del agua de enfriamiento en el CONCAL de la REE, los cuales permitieron caracterizar las propiedades del agua de recirculación, agua de reposición de este sistema de enfriamiento.

La base de datos experimentales obtenida ha permitido realizar los cálculos necesarios para la determinación de la potencia requerida de los ventiladores y de esta forma poder incrementar la cantidad de flujo de aire que ingresa a la torre, logrando la optimización del sistema de Enfriamiento Torre Y-ME3003B.

## **SUMMARY**

In this investigation work an experimental study consisting of a series of measurements during a period of twenty days with appropriate instruments for the obtainment of real data of a cooling tower Y-ME3003B of the REE was carried out, to be able to diagnose technically its actual status. Later the circulation cooling water analyses were made which permitted to characterize the recirculation water properties and reposition water of this cooling system.

The experimental database has permitted to carry out the necessary calculi for the determination of the required power of the fans so as to increase the air flow quantity entering into the tower, reaching the optimization of the cooling system tower Y - ME3003B.

## INTRODUCCIÓN

Los procesos de enfriamiento del agua se encuentran entre los más antiguos que haya desarrollado el hombre. Por lo común el agua se enfría exponiendo su superficie al aire. Estos procesos implican la exposición del agua al aire en diferentes grados.

En la Refinería Estatal de Esmeraldas existen dos torres de enfriamiento de agua en contracorriente, la Y-ME3003A y la Y-ME3003B, con una capacidad de enfriamiento de agua de 15412 GPM (3500 m<sup>3</sup>/h) y 27690 GPM (6270 m<sup>3</sup>/h) de agua de enfriamiento en circulación respectivamente.

El sistema de enfriamiento de la Torre Y-ME3003B de la Refinería Estatal de Esmeraldas, actualmente presenta bajas en la eficiencia de su funcionamiento en la “Unidad de tratamiento de Aguas”, ocasionadas por fallas operacionales de motores debido al tiempo de vida útil de los mismos.

Para la consecución del presente trabajo de investigación se recurrirá a utilizar el método experimental en campo y en laboratorio, como son mediciones de temperaturas (temperaturas de bulbo seco, bulbo húmedo), flujos de aire y agua, datos que serán utilizados para los cálculos respectivos.

## **ANTECEDENTES**

La torre Y-ME3003B fue construida en el año 1987 por CHIYODA durante la primera ampliación de la Refinería de Esmeraldas, fue creada con la finalidad de aumentar la cantidad de suministro de agua de enfriamiento para satisfacer la demanda de transferencia de calor de las diferentes plantas de proceso.

Inicialmente estaba constituida por cinco celdas cada una con su respectivo ventilador lo cual ocasionaba problemas de desbalances en estas estructuras para evitar esta clase de desperfectos en el año de 1999 durante la segunda ampliación de la Refinería se realizó la modernización de los conjuntos Reductores – Plato – -Aspas reemplazando al conjunto marca FAVRA instalando cajas reductoras de marca “Amarillo”, modelo 1110S/N221877/78/79/80 y 236893 para regular la potencia de los ventiladores.

Los dos colectores correspondientes a las dos torres de enfriamiento de agua están hidráulicamente unidos por una línea de compensación. El agua almacenada en los colectores de las torres de enfriamiento es enviada a cada usuario de la refinería por las bombas de circulación de agua Y-P3008 A/B y Y-P3010A/B retornando a las torres de enfriamiento luego de ser utilizada.

## **JUSTIFICACIÓN**

En la actualidad la cantidad de flujo de agua que ingresa a la Torre de Enfriamiento Y-ME3003B para ser enfriada es de gran importancia, para el mantenimiento y enfriamiento de equipos y materiales que intervienen en la línea de proceso de la Refinería Estatal de Esmeraldas, por lo tanto es necesario que el flujo se mantenga en un nivel estable sin que se produzcan variaciones considerables entre la cantidad de agua que ingresa a la torre y la cantidad de agua que sale de la misma.

Se mejorará el funcionamiento de la torre de enfriamiento Y-ME3003B, con la utilización de motores cuya potencia sea la adecuada para incrementar el flujo de aire del sistema de enfriamiento, con el fin de bajar y controlar la temperatura del flujo líquido, lo cual evitará posteriores gastos en futuras reparaciones, reemplazo de equipos y reduciendo el mantenimiento en general de la Torre de enfriamiento Y-ME3003B, proporcionando una optimización del proceso de enfriamiento.

## **OBJETIVOS**

### **GENERAL**

Optimizar el Sistema de Enfriamiento - Torre Y-ME3003B de la Refinería Estatal de Esmeraldas.

### **ESPECÍFICOS**

- Diagnosticar el estado actual del Sistema de Enfriamiento en la Torre Y-ME3003B.
- Identificar las variables de proceso en base al diagnóstico realizado.
- Plantear una alternativa de solución sustentado en el estudio técnico y económico

# **1. MARCO TEÓRICO**

## **1.1. TORRES DE ENFRIAMIENTO**

### **1. 1.1. GENERALIDADES**

Las torres de enfriamiento son equipos que se usan para enfriar agua en grandes volúmenes porque son el medio más económico para hacerlo, si se compara con otros equipos de enfriamiento como los intercambiadores de calor donde el enfriamiento ocurre a través de una pared.

En el interior de las torres se monta un empaque con el propósito de aumentar la superficie de contacto entre el agua caliente y el aire que la enfría.

En las torres se colocan deflectores o eliminadores de niebla que atrapan las gotas de agua que fluyen con la corriente de aire hacia la salida de la torre, con el objeto de disminuir la posible pérdida de agua.

El agua se introduce por el domo de la torre por medio de vertederos o por boquillas para distribuir 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 que fluye a contracorriente o a flujo cruzado, con una temperatura de bulbo húmedo inferior a la temperatura del agua caliente, en estas condiciones, el agua se enfría por transferencia de masa (evaporación ) y por transferencia de calor sensible y latente del agua al aire, lo anterior origina que la temperatura del aire y su humedad aumente y que la temperatura del agua descienda; la temperatura límite de enfriamiento del agua es la temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada de la torre.



Se recomienda el tratamiento del agua a enfriar, agregando álcalis, algicidas, bactericidas y floculantes; y, realizar un análisis periódico tanto de dureza como de iones cloro ya que éstos iones son causantes de las incrustaciones y de la corrosión en los elementos de la torre.

### **1.1.2. LA EVAPORACIÓN - CAUSA DE ENFRIAMIENTO.**

El enfriamiento de agua en una torre tiene su fundamento en el fenómeno de evaporación. La evaporación es el paso de un líquido al estado de vapor y solo se realiza en la superficie libre de un líquido.

Cuando el agua se evapora sin recibir calor del exterior es necesario que tome de sí misma el calor que necesita, esto origina que el agua se enfríe y por lo tanto que su temperatura disminuya.

### **1.1.3. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO**

Una torre de refrigeración es una instalación que extrae calor del agua mediante evaporación o conducción.

Cuando el agua es reutilizada, se bombea a través de la instalación en la torre de enfriamiento. Después de que el agua se enfría, se reintroduce como agua de proceso. El agua que tiene que enfriarse generalmente tiene temperaturas entre 40 y 60 °C. El agua se bombea a la parte superior de la torre de enfriamiento y de ahí fluye hacia abajo a

través de tubos de plástico o madera. Esto genera la formación de gotas. Cuando el agua fluye hacia abajo, emite calor que se mezcla con el aire de arriba, provocando un enfriamiento de 10 a 20°C.

Parte del agua se evapora, causando la emisión de más calor. Por eso se puede observar vapor de agua encima de las torres de refrigeración.

Para crear flujo hacia arriba, algunas torres de enfriamiento contienen aspas en la parte superior, las cuales son similares a las de un ventilador. Estas aspas generan un flujo de aire ascendente hacia la parte interior de la torre de enfriamiento. El agua cae en un recipiente y se retraerá desde ahí para al proceso de producción.

Existen sistemas de enfriamiento abiertos y cerrados. Cuando un sistema es cerrado, el agua no entra en contacto con el aire de fuera.

Como consecuencia la contaminación del agua de las torres de enfriamiento por los contaminantes del aire y microorganismos es insignificante.

#### **1.1.4. DIAGRAMA PSICOMÉTRICO**

Es una representación gráfica que indica la mezcla de aire- vapor de agua a la presión atmosférica normal.

Se representa la humedad absoluta en ordenadas frente a su temperatura en abscisas. Las curvas situadas entre el eje de abscisas y la curva de saturación son isolíneas correspondientes a las distintas humedades relativas, y el cálculo de sus distintos puntos

para cada una se efectúa determinando las humedades absolutas para diferentes temperaturas.

### **1.1.5. TEORÍA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO**

La teoría del proceso de transferencia de calor en una torre de enfriamiento, es la que desarrolló Merkel. Este análisis se basa en la diferencia del potencial de entalpía como fuerza impulsora. Se supone que cada partícula de agua está rodeada por una película de aire y que la diferencia de entalpía entre la misma y el aire circundante proporciona la fuerza impulsora para el proceso de enfriamiento.

La teoría considera el flujo de masa y energía del agua a la interfase y de la interfase a la masa gaseosa. Cuando el flujo cruza estas dos fronteras, cada una ofrece una resistencia a la transferencia de materia y energía, que resulta en gradientes de temperaturas, entalpía y de humedades.

En la figura siguiente se ilustran las relaciones del agua y el aire y el potencial impulsor que existe en una torre de contraflujo, en donde el aire fluye en sentido paralelo, pero siguiendo una dirección opuesta al flujo del agua.

La línea de operación del agua está representada por la línea AB y se especifica por medio de las temperaturas del agua de la torre en la entrada y salida.

La línea de operación del aire principia en C, verticalmente por debajo de B, y en un punto que tiene una entalpía correspondiente a la temperatura de entrada de bulbo húmedo.

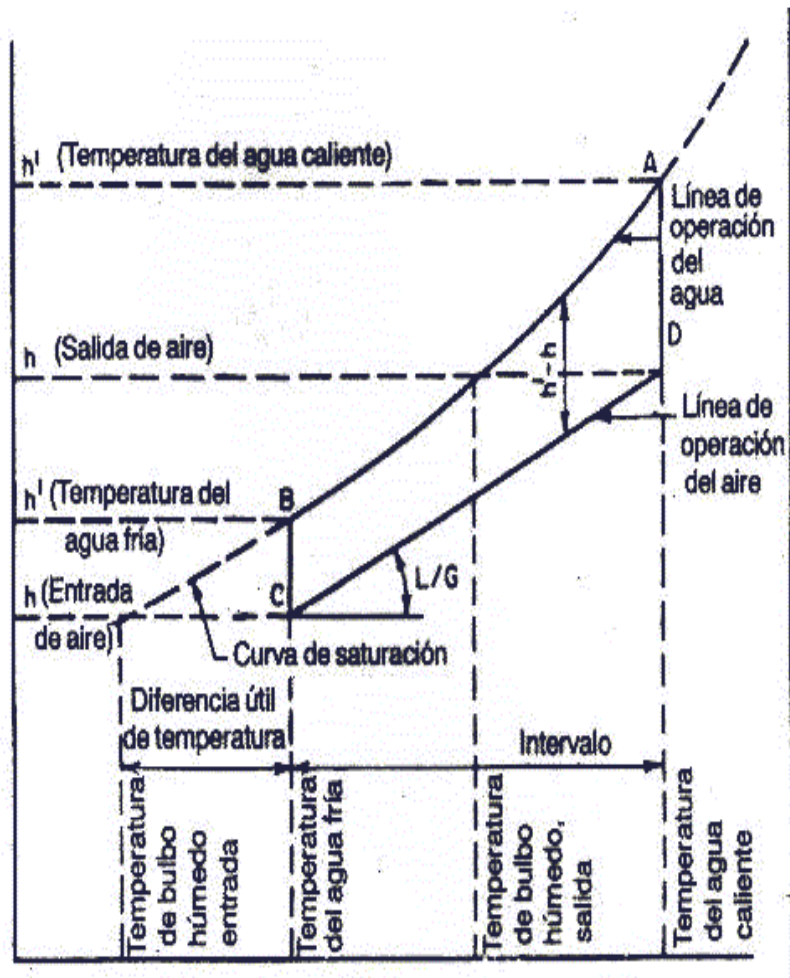


Fig. 1.1.5-1. Teoría de Merkel – Teoría de Enfriamiento

La línea BC, representa la fuerza impulsora inicial ( $h' - h$ ). El aire que sale de la torre se representa por medio del punto D y la gama de enfriamiento es la longitud proyectada de la línea CD sobre la escala de temperaturas.

## **1.1.6. CONCEPTOS BÁSICOS**

### **1.1.6.1. ENTALPÍA**

Es una expresión de la energía del aire húmedo. El valor de esta propiedad depende de los estados de referencia que se tomen, los cuales son arbitrarios.

### **1.1.6.2. AGUA DE PURGA**

Es el agua removida del sistema con el fin de mantener una concentración límite de especies químicas (en esta caso más sólidos disueltos y suspendidos) evitando así su sobre-concentración.

### **1.1.6.3. AGUA DE REPOSICIÓN**

Es el agua que se utiliza para reemplazar las pérdidas por evaporación y purgas.

### **1.1.6.4. CONTROL DE PURGA**

Son los ciclos de concentración que se regulan o controlan con 1 purga continua (caliente).

Si la purga aumenta se disminuye los ciclos de concentración y disminuyendo la purga la torre concentrará más.

#### **1.1.6.5. CLORO RESIDUAL**

Es necesario que el agua contenga un residuo de cloro(0,8 ppm) para garantizar la eliminación de bacterias y virus. Para determinar el cloro residual se utiliza el método colorimétrico con la N, N – dietil-p-fenildiamina (DPD).

#### **1.1.6.6. CONDUCTIVIDAD**

Es una medida de la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica y está directamente relacionada con la concentración de sustancias ionizadas en el agua.

#### **1.1.6.7. DUREZA**

Es la característica del agua que representa la concentración total de calcio y magnesio expresada como su equivalente en carbonato de calcio.

La dureza se refiere al contenido de calcio y magnesio, expresados como  $\text{CaCO}_3$ . Se lo determina moderadamente por complexometría, es decir, realizando una titulación con un producto como EDTA.

Mediante la utilización de indicadores y valores de pH apropiados se cuantifica la dureza debida al calcio y la dureza total. La diferencia representa la dureza del magnesio.

#### **1.1.6.8. FOSFATOS**

Los fosfatos son muy comunes en los sistemas de tratamiento de aguas de enfriamiento y se agrupan comúnmente en tres tipos: Ortofosfatos, fosfatos condensados y fosfatos orgánicos.

#### **1.1.6.9. pH**

El carácter ácido o básico del agua está dado por la concentración de los iones hidrógeno  $H^+$  presentes. Se lo determina mediante los métodos: potenciométricos (pH-metro) y colorimétrico (con indicadores). Los valores recomendados dependerán del uso que se dé al agua. Para consumo humano se mantendrá en 6,5-8,5.

#### **1.1.6.10. ALCALINIDAD**

Es la capacidad del agua para neutralizar ácidos. Los niveles de alcalinidad indican la presencia de un residuo industrial fuertemente alcalino.

Se cuantifica en el agua por titulación de 50 ml de agua con ácido sulfúrico 0,02 N, anotándose el consumo del mismo en el momento de viraje de los indicadores de

fenolftaleína y rojo de metilo. El primer consumo multiplicado por 20 representa la alcalinidad P expresada como  $\text{CaCO}_3$ .

El consumo total de ácido hasta viraje del rojo de metilo multiplicado por 20 nos da la alcalinidad M o total expresada como  $\text{CaCO}_3$ .

#### **1.1.6.10.1. TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO**

Es la temperatura límite de enfriamiento alcanzada por una pequeña masa de líquido en contacto con una masa mucho mayor de gas húmedo.

La determinación de esta temperatura se efectúa pasando con rapidez el gas por un termómetro cuyo bulbo se mantiene húmedo con el líquido que forma el vapor en la corriente gaseosa.

Por lo general el bulbo del termómetro se envuelve en una mecha saturada. Durante este proceso si el gas no está saturado, se evapora algo de líquido de la mecha saturada hacia la corriente gaseosa en movimiento, llevándose el calor latente asociado.

La eliminación de calor latente da lugar a una disminución en la temperatura del bulbo del termómetro y la mecha, produciéndose una transferencia de calor sensible hacia la superficie de la mecha por convección desde la corriente gaseosa y por radiación desde los alrededores.

La temperatura de bulbo húmedo es la que se obtiene a estado estable con un termómetro expuesto a un gas que se mueve con rapidez.



### 1.1.6.10.2. ENTALPÍA ESPECÍFICA

Es la suma de calor sensible de 1 Kg de gas, y el calor latente de vaporización del vapor que contiene a la misma temperatura a la que se refieren las entalpías.

### 1.1.6.10.3. CALOR ESPECÍFICO DEL GAS HÚMEDO

Es el calor que hay que suministrar a 1 Kg de gas y al vapor que contiene para elevar 1°C su temperatura, manteniendo constante la presión:

$$C_h = C_{p_g} + C_{p_v}Y \quad \text{Ec: 1.1.6.10.3-1.}$$

Para el caso de aire-vapor de agua:

$$C_h = 0.24 + 0.46Y \frac{\text{BTU}}{\text{lb}^\circ\text{F}}$$

$$C_h = 6.95 + 8.10Y \frac{\text{BTU}}{\text{lbmol}^\circ\text{F}}$$

#### **1.1.6.10.4. VOLUMEN ESPECÍFICO DEL GAS HÚMEDO**

Es el volumen ocupado por la mezcla que contiene 1 Kg de gas, y viene dado por:

$$V = \left( \frac{1}{M_g} + \frac{Y}{M_v} \right) \frac{RT}{P} \quad \text{Ec: 1.1.6.10.4-1.}$$

#### **1.1.6.10.5. PUNTO DE ROCÍO**

Es la temperatura que alcanza la masa de gas húmedo en la saturación por enfriamiento a presión constante. Una vez alcanzada esta temperatura, si se continúa enfriando la mezcla se irá condensando el vapor, persistiendo las condiciones de saturación.

#### **1.1.6.10.6. HUMEDAD PORCENTUAL**

Es la relación entre la humedad existente en la masa gaseosa y la que existiría si estuviera saturada.

#### **1.1.6.10.7. HUMEDAD RELATIVA**

Es el cociente entre la presión parcial del vapor y la tensión de vapor a la misma temperatura.

#### **1.1.6.10.8. HUMEDAD ABSOLUTA**

Es la relación entre el peso de vapor y el peso de gas contenido en una masa gaseosa.

#### **1.1.6.10.9. HUMEDAD MOLAR**

Es la relación entre los números de moles de vapor de y de gas contenidos en una masa gaseosa.

#### **1.1.7. FUNCIONAMIENTO TORRES DE ENFRIAMIENTO**

En el proceso de refrigeración, el agua de enfriamiento utilizada por los condensadores se desperdicia, a menos que se introduzca una torre de enfriamiento con lo cual dicha agua se puede recircular y ser utilizada.

Las operaciones de humidificación se utilizan para controlar la humedad de un proceso, pero más frecuentemente, para enfriar y recuperar el agua utilizada como medio de

enfriamiento en un proceso. Esto se logra mediante el contacto directo con aire, el cual se encuentra a temperatura menor que el agua.

En las torres de enfriamiento se consigue disminuir la temperatura del agua caliente que proviene generalmente de un circuito de refrigeración, mediante la transferencia de calor y materia al aire que circula por el interior de la torre.

La función principal de las torres de enfriamiento consiste en disminuir la temperatura del agua caliente que proviene de un circuito de refrigeración mediante la transferencia de calor y materia al aire que circula por el interior de la torre.

A fin de mejorar el contacto aire-agua, se utiliza un entramado denominado “relleno”.

El agua entra en la torre por la parte superior y se distribuye uniformemente sobre el relleno utilizando pulverizadores. De esta forma, se consigue un contacto óptimo entre el agua y el aire atmosférico.

#### **1.1.8. CLASIFICACIÓN DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO**

La forma más simple y usual de clasificar las torres de enfriamiento es según la forma en que se mueve el aire a través de éstas. Según este criterio, existen torres de circulación natural y torres de tiro mecánico.

En las torres de circulación natural, el movimiento del aire sólo depende de las condiciones climáticas y ambientales.

Las torres de tiro mecánico utilizan ventiladores para mover el aire a través del relleno.

### **1.1.9. TORRES DE ENFRIAMIENTO DE TIRO NATURAL**

Son aquellas que utilizan las corrientes de aire de la atmósfera. El aire se mueve de forma horizontal y el agua cae verticalmente (flujo cruzado).

Una torre de tiro natural es aquella en la que el aire es inducido por una gran chimenea situada sobre el relleno.

### **1.2. TORRES DE ENFRIAMIENTO DE TIRO MECÁNICO**

Las torres de tiro mecánico son aquellas que ingresan flujo de aire al interior de la misma por medio de la instalación de un ventilador.

Las torres de tiro Mecánico son principalmente se clasifican en: Torres de Tiro Forzado y Torres de Tiro Inducido.

#### **1.2.1. TORRES DE TIRO FORZADO:**

En las torres de tiro forzado el aire se descarga a baja velocidad por la parte superior de la torre. Estas torres son, casi siempre, de flujo a contracorriente.

### 1.2.2. TORRES DE TIRO INDUCIDO:

Las torres de tiro inducido son aquellas que ingresan flujo de aire desde el exterior de la misma por acción de ventiladores, pueden ser de flujo a contracorriente o de flujo cruzado.

### 1.2.3. TORRES DE FLUJO A CONTRACORRIENTE

En este tipo de torres la admisión de flujo del aire se efectúa desde la parte inferior de la torre, subiendo en contracorriente con el agua que es distribuida desde la parte superior de la torre. En este tipo de Torres, el sistema de distribución del agua no es admisible para la manutención durante su operación. El sistema de enfriamiento de agua utilizado en la Refinería Estatal de Esmeraldas está basado en la utilización de torres de enfriamiento de Tiro Inducido-Flujo Contracorriente.

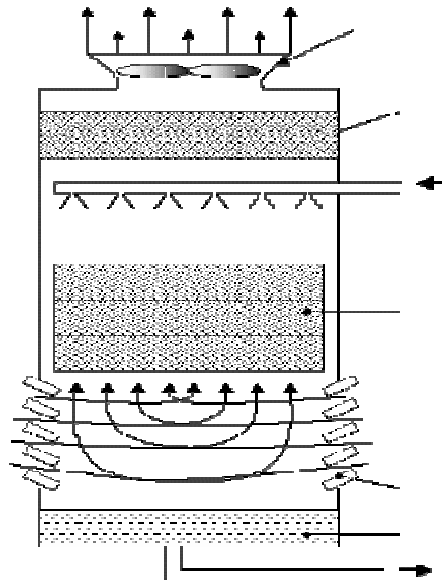


Fig. 1.2.3-1. Torre de flujo a contracorriente (tiro inducido).

En la Fig. 1.2.3-1. anterior se describe mediante flechas como el agua ingresa a la torre por la parte superior y es distribuida por las toberas difusoras hacia el material de relleno.

Por la parte inferior ingresa el aire para ponerse en contacto con el agua en la superficie de mezcla agua-aire, en donde el agua es distribuida en forma de una película muy fina para ser envuelta por el flujo de aire y que de esta forma se produzca el enfriamiento.

Después de ser enfriada, el agua es recolectada en una piscina de agua de enfriamiento ubicada en la parte inferior de la torre, posteriormente es distribuida por la línea del sistema de enfriamiento.

#### **1.2.4. TORRES DE FLUJO CRUZADO**

En este tipo de torres el aire es ingresado horizontalmente en toda la altura de la misma y el agua cae horizontalmente a través del material de relleno luego de ponerse en contacto con el aire.

Este tipo de torres la altura del relleno de contacto es prácticamente igual al de la torre, es de fácil acceso al sistema de distribución cuando la torre está en operación.

El aire después de intercambiar calor con el agua caliente sale por la parte central de la torre de enfriamiento de agua como vapor de agua caliente.

Mientras que el agua de salida de la torre va hacia la parte inferior de la torre hacia una piscina colectora de agua de enfriamiento y posteriormente ser utilizada para los fines destinados .

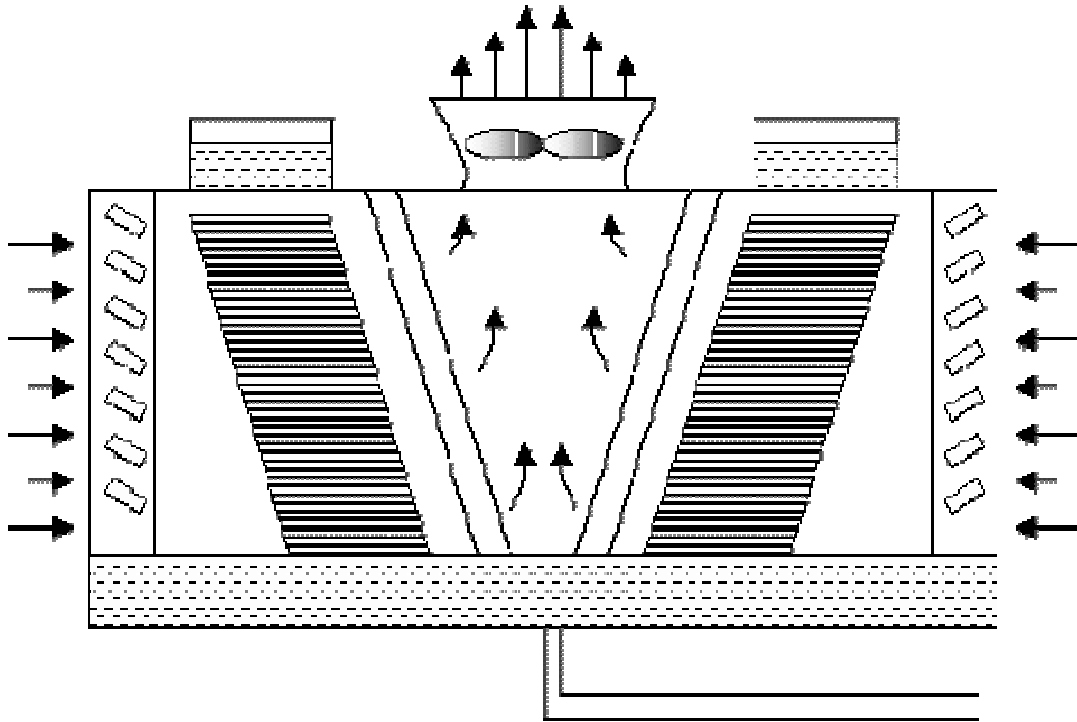


Fig. 1.2.4-1. Torre de Flujo cruzado (tiro inducido)

En la figura anterior las flechas indican el ingreso y salida del aire en la torre.

### 1.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO - TORRE Y-ME 3003B DE LA REE

La torre está constituida principalmente por: 5 celdas rectangulares y cada celda puede ser operada independientemente de las otras, 5 ventiladores cada uno con su respectivo motor para ser accionado, material de relleno de tipo PVC, una bandeja principal,



bandejas laterales, toberas difusoras, platillos dispersores, eliminadores de gotas o de niebla, piscina recolectora de agua de enfriamiento.

La torre de Enfriamiento Y-ME 3003B, tiene la capacidad para administrar una cantidad de flujo de Agua de circulación de 6270 m<sup>3</sup>/h, dos bombas centrífugas de circulación de agua de enfriamiento Y-P 3008(A/ B) de 2950 m<sup>3</sup>/h, cada una y un sistema de alimentación de químicos para el tratamiento del agua de enfriamiento.

Inicialmente el agua es recolectada del río Esmeraldas previo a un tratamiento químico y a un proceso de clarificación, los químicos a inyectarse para el agua de clarificación son: alúmina de grado comercial, Sulfato de Aluminio= Al<sub>2</sub> (SO<sub>4</sub>) NH<sub>2</sub> como coagulante. Poli electrolito como ayudante de la coagulación y sosa caústica para el ajuste de pH para tener una buena coagulación y floculación en el clarificador.

Luego de ser tratada químicamente el agua se dirige a los filtros de las torres para eliminar sólidos suspendidos y otro tipo de residuos. Posteriormente ingresa a la piscina colectora de agua de la torre, que se encuentra ubicada en la parte inferior la torre y es distribuida para cada usuario en la refinería por la bomba de circulación de agua de enfriamiento Y-P3010 A/ B y retorna a la torre de enfriamiento Y-ME3003B después de su uso.

El agua es utilizada para enfriar diferentes equipos, que emiten calor o que son sobrecalentados como intercambiadores de calor, motores, bombas, etc., luego el agua regresa a la torre como agua de recirculación.

El agua de enfriamiento al recorrer las diferentes áreas presenta pérdidas de fluido al ser utilizada para enfriar ciertos equipos, para compensar las pérdidas se utiliza el agua de reposición, esta agua es obtenida por clarificación y es alimentada hacia el colector de la torre de enfriamiento como agua de compensación, por las bombas Y-P3003A/B a través de las válvulas de control de nivel existentes Y-LC3026.

Una parte del agua de enfriamiento en circulación es enviada hacia los filtros de arena Y-ME3007 a través de la línea de corriente retrógrada, separada por el cabezal de descarga de la bomba del agua de enfriamiento en donde los sólidos suspendidos son removidos del agua de enfriamiento en circulación.

El filtro de arena está constituido de tres filtros de presión los mismos que son operados en paralelo. El flujo de agua dirigido hacia los filtros de arena de la torre de enfriamiento es controlado por el controlador de flujo montado en el tablero central Y-FIC3114.

La inyección de químicos es requerida para prevenir la formación de escamas (incrustación), corrosión y el desarrollo o crecimiento de microorganismos. El ácido sulfúrico, el inhibidor de corrosión, y el control químico de microorganismos son utilizados para este propósito.



FOTO 1.3-1. Sistema de Enfriamiento-Torre Y-ME3003B DE LA REE

#### **1.4. TRATAMIENTO DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO**

Existe la presencia de agentes y factores en el agua de recirculación y en el sistema de enfriamiento, los cuales inciden altamente en la generación de problemas de corrosión, incrustación y ensuciamiento se hace imprescindible entonces la necesidad de acondicionar el agua de enfriamiento de tal forma que se cumpla su función de remoción de calor, sin alterar manteniéndolos en perfecto estado de limpieza y manteniendo así una eficiencia constante de operación.

Parámetros establecidos para el agua de enfriamiento:

- a) El pH debe estar entre 6.0 y 7.0. Los carbonatos y bicarbonatos lo más bajo posible.
- b) Se debe usar un algicida - fungicida no oxidante, ya que el excesivo cloro, perjudica a los procesos químicos.
- c) El uso de cloro, solo debe hacerse en la pileta y en forma intermitente para mantener un residual de 1 ppm, medido en agua caliente.
- d) Se debe evitar alto cloro residual y alto pH al mismo tiempo, ya que esta combinación produce ataque acelerado y producen más daños que por separados.
- e) La adición de cromato sirve para prevenir ataque biológico a las superficies. Un sistema de bajo pH es también beneficioso para la prevención de ataque químico superficial.

El tratamiento químico entonces se hace para:

- Controlar la formación de depósitos de tipo incrustante y/o ensuciantes.
- Controlar la corrosión.
- Controlar el crecimiento microbiológico.
- Contrarrestar la acción de agentes internos y/o externos contaminantes de agua los cuales alteran totalmente la operación del sistema global de enfriamiento.

El tratamiento químico del agua de recirculación no requiere que se mantenga una cantidad de purga adecuada. En la mayoría de los casos sin embargo, la inyección de químicos es requerida para prevenir la formación de incrustación, escamas, corrosión y el desarrollo o crecimiento de microorganismos.

El ácido sulfúrico es utilizado como inhibidor de corrosión y el control químico de microorganismos es utilizado para estos propósitos mediante los programas de control químico del agua de enfriamiento.

## **1.5. EFICIENCIA DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO**

La temperatura más baja por la cual el agua puede ser enfriada por su propia evaporación, es la temperatura de bulbo húmedo del aire con la cual está en contacto.

La eficiencia del agua de una torre de enfriamiento será el cociente del actual enfriamiento.

TABLA 1.5-1.

Calificativo para las eficiencias de Torres de Enfriamiento

| Valores % | Calificativo de eficiencias |
|-----------|-----------------------------|
| 50        | Mínimo                      |
| 55-75     | Típico o normal             |
| 80-93     | Optima                      |

## **2. PARTE EXPERIMENTAL**

### **2.1. MUESTREO**

El tipo de muestreo utilizado en el presente trabajo de investigación es muestreo aleatorio sistemático. Tomando un número determinado de muestras diariamente en un intervalo de tres horas durante el turno 1, en un total de 3 mediciones diarias en el horario de 07:00 am - 15:00 pm.

Las muestras fueron tomadas en Planta en el área de utilidades en la torre de enfriamiento Y-ME3003B en el distribuidor de muestras en la línea del agua de recirculación y en de la línea de proceso del agua de enfriamiento.

### **2.2. MÉTODOS Y TÉCNICAS**

#### **2.2.1. MÉTODO EXPERIMENTAL**

Este método se aplico al conocer las condiciones actuales de funcionamiento del sistema de enfriamiento- Torre Y-ME3003B de la REE. Para lo cual se tomaron las siguientes mediciones con los respectivos instrumentos:

TABLA 2.2.1-1.  
Instrumentos Utilizados para la obtención de datos experimentales

|                                                          |                        |
|----------------------------------------------------------|------------------------|
| Temperaturas(entrada, salida, bulbo seco y bulbo húmedo) | Termómetros calibrados |
| Temperaturas                                             | FLUKE 68 THERMOMETER   |
| Potencia                                                 | Multímetro avanzado    |
| Temperatura, flujo de aire a la salida de la torre       | Thermo anomometer      |

FUENTE: Mónica Alexandra Medina Vizuete

Los análisis que se realizarán nivel de laboratorio determinan las variaciones de los parámetros del agua que se utiliza para el enfriamiento, con la realización de pruebas de caracterización del agua de recirculación, reposición.

### 2.2.2. TÉCNICAS

Las técnicas que se utilizaron en el CONCAL para la determinación de los parámetros del agua del sistema de enfriamiento fueron obtenidas del Manual de Análisis de aguas industriales del Laboratorio de la REE y son las siguientes:

### **2.2.2.1. CLORO RESIDUAL**

El cloro es añadido al suministro de agua de enfriamiento de las torres Y-ME3003B, el ión está disponible como ión hipocloroso o como hipoclorito.

Las muestras que van a analizarse no deben ser expuestas a la luz del sol antes del análisis.

#### **2.2.2.1.1. PROCEDIMIENTO**

- En un tubo de ensayo depositar 2.5 ml de Ortotolidina.
- Adicionar sobre Ortotolidina 50 ml de muestra de agua de enfriamiento.
- Dejar reposar durante 3 minutos y observar el color comparando con estándares establecidos.

### **2.2.2.2. CONDUCTIVIDAD**

La conductividad es una medida de la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica y está directamente relacionada con la concentración de sustancias ionizadas en el agua.



#### **2.2.2.2.1. PROCEDIMIENTO**

- Presionar el botón de encendido del medidor HACH MODELO 16300.
- Constatar el electrodo de medición
- Seleccionar el rango del parámetro a medir.
- Sumergir el electrodo en el vaso que contiene la muestra.
- Permitir reposar el electrodo unos 20 segundos antes de tomar la lectura.

#### **2.2.2.3. DUREZA**

Dureza es la característica del agua que representa la concentración total de calcio y magnesio expresada como su equivalente en carbonato de calcio.

Este método se basa en la determinación del contenido total de calcio y magnesio de una muestra por titulación.

##### **2.2.2.3.1. DUREZA TOTAL**

Esta técnica nos permite conocer la cantidad de calcio y magnesio expresada como su equivalente en carbonato de calcio.

#### **2.2.2.3.1.1 PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR DUREZA TOTAL**

- Tomar 50 ml de muestra.
- Adicionar 2-3 ml de solución Buffer.
- Adicionar 0.2- 0.3 ml de indicador sólido de Ericromo de negro T.
- Titular con solución de EDTA (1 ml = 1 mg de CaCO<sub>3</sub>).

#### **2.2.2.3.2. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR DUREZA CÁLCICA**

- Tomar 50 ml de muestra.
- Adicionar 2 ml de NaOH 1 N.
- Adicionar 0.2- 0.3 de polvo indicador de “Murexide”
- Titular con solución de EDTA (1 ml = 1 mg de CaCO<sub>3</sub>) hasta un punto final púrpura.

#### **2.2.2.3.3. DETERMINAR LA DUREZA MAGNÉSICA**

$$DMg \text{ ppm. CaCO}_3 = DT - DCa$$

#### **2.2.2.4. FOSFATOS**

Este método está basado en la coloración azul que presenta una muestra al reaccionar con el molibdato de amonio con los fosfatos.

El fosfato se hace reaccionar con molibdato de amonio para formar fosfomolibdato. La intensidad del color es proporcional a la concentración de fosfato que es medida espectrofotométricamente.

##### **2.2.2.4.1. PROCEDIMIENTO**

- Tomar 25 ml de muestra.
- Diluir en un balón de aforo hasta 100 ml.
- Tomar 25 ml de esta dilución.
- Adicionar 1.45 ml de molibdato de amonio.
- Adicionar 1 ml de solución, 1-amino-2-naptol – 4-sulfónico.
- Permitir reposar 10 minutos.
- Llevar a 50 ml con agua destilada.
- Realizar la lectura en el Spectronic a 880 ml de longitud de onda.
- Observar la absorbancia ocasionada por muestra y calcular:  $\text{Ppm.PO}_4 = \text{ppm observados} \times 4$ .

### **2.2.2.5. MATERIA ORGÁNICA**

Se refiere al oxígeno que consumen los compuestos orgánicos.

También se llama “Oxígeno Requerido” y oxígeno absorbido, por lo tanto esta determinación es frecuentemente requerida como indicación de la materia orgánica presente.

#### **2.2.2.5.1. PROCEDIMIENTO**

- 100 ml de muestra en un matraz erlenmeyer de 250 ml ( o alícuota diluida).
- Adicionar 10 ml de ácido sulfúrico libre de materia orgánica.
- Adicionar 10 ml de permanganato de potasio 0.0125 N o más si se decolora.
- Digestar 30 minutos en Baño de María (100°C).
- Adicionar 10 ml de oxalato de amonio 0.0125 N hasta un punto final rosado.
- Determinar un blanco con agua destilada para sacar la relación Permanganato-Oxalato.

### **2.2.2.6. pH**

El pH de una solución es un medidor de la efectividad de la concentración de iones hidrógeno, o más específicamente la actividad del ión hidrógeno. El valor de pH es una medida muy importante para el control de la corrosión y formación de incrustaciones.

Un pH bajo da origen a corrosión y un pH alto puede causar precipitación de  $\text{CaCO}_3$  como incrustación.

#### **2.2.2.6.1. PROCEDIMIENTO**

- Calibrar el pHmetro y observar que los electrodos se encuentren en buenas condiciones.
- Ajustar el pHmetro con soluciones reguladoras de pH 7.
- Colocar en el vaso de precipitación que contiene la muestra a medir.
- Anotar el valor indicado en la pantalla del equipo.

#### **2.2.2.7. SÍLICE - $\text{SiO}_2$**

Este análisis de laboratorio es muy importante a nivel industrial debido a que está presente en la mayoría de aguas. La sílice en el agua de alimentación de las calderas puede recubrir las aspas de las turbinas y disminuir la eficiencia del intercambio de calor. En las desmineralizadoras de agua.

#### **2.2.2.7.1. PROCEDIMIENTO**

- Tomar 10 ml de muestras o estándar.
  - Adicionar con agitación 5 ml de solución de ácido clorhídrico.
  - Adicionar 5 ml de solución de sulfito de sodio, mezclar bien.
  - Adicionar 5 ml de solución de molibdato de amonio.
- 
- Permitir que la mezcla se estabilice por un minuto.
  - Luego llevar la mezcla a una celda del Spectronic 70 y anotar los valores correspondientes utilizando una longitud de onda de 820 nm.
  - Ajustar el cero con agua destilada y con los mismos reactivos, con volúmenes iguales.

#### **2.2.2.8. TURBIDÉZ**

La turbidez del agua se debe a la presencia de sólidos suspendidos que están dispersos en ella, como plancton y otro tipo de microorganismos microscópicos que provocan la reducción de la transparencia del agua. Por lo tanto, la medición de la turbidez indica el grado de capacidad o dispersión de la luz a causa de los sólidos suspendidos.

##### **2.2.2.8.1. PROCEDIMIENTO**

- Disolver 5 gr de sulfato de hidracina grado relativo  $N_2H_4H_2SO_4$  en 400 ml de agua destilada.
- Disolver 50 g gramos de Hexametilteramina en 400 ml de agua destilada.

- Depositar las dos soluciones dentro del frasco volumétrico de 1000 ml y diluir hasta el aforo con agua destilada.
- Permitir que la solución repose por 48 horas de 20-22 °C. Durante ese tiempo se realizará la suspensión.
- Observar los resultados.

## **2.3. DATOS EXPERIMENTALES**

### **2.3.1. DIAGNÓSTICO DE LATORRE DE ENFRIAMIENTO Y-ME3003B DE LA REE**

- Las paredes de la Torre Y-ME3003B, muestra ciertos defectos como: fisuras en el concreto, acumulación de slime y algas. Las fisuras hacen que en la parte externa de acuerdo a las condiciones climáticas en las que se encuentra la Torre-YME3003B y por las fugas se forme placton en la superficie exterior.  
( como se observa en la FOTO 2.3.1-1.).



FOTO 2.3.1-1.Estado de la parte externa de la Torre Y-ME3003B DE LA REE

- El estado actual de los motores de la Torre Y-ME3003B de la REE, es ineficiente a causa de que están funcionando con aproximadamente 56.4 % de su capacidad.





FOTO 2.3.1-2.Chimenea - motor de la celda “d” de la Torre Y-ME3003B de la REE

- El rango de enfriamiento que actualmente tiene la torre Y-ME3003B de la REE, es de 10 °C.
- En la parte interna de una de las celdas de la torre se pudo encontrar la presencia de residuos de aceites en la tubería principal por donde ingresa el agua de recirculación.
- La torre está equipada con eliminadores de gota de tipo PVC, proyectadas para obtener mejor resistencia al aire. Se encuentran en buenas condiciones para su utilización debido a que el material de esta estructura es de muy buena resistencia.

- Las aspas de los ventiladores de la Torre Y-ME3003B de la REE se encuentran en buenas condiciones para su funcionamiento debido a la resistencia del material que constituyen a los mismos.



FOTO 2.3.1-3. Ventilador de la celda “d” Torre Y-ME3003B de la REE

- Los análisis realizados en el laboratorio establecen que el agua cumple los rangos especificados para sus parámetros de caracterización, en algunos casos excede los establecidos, pero inmediatamente se realizan los análisis respectivos para controlar y verificar las condiciones del agua.

Los principales problemas que se presentan en el Sistema de enfriamiento de agua de la REE – Torre Y-ME3003B son representados en la Tabla 2.3.1-1. a continuación:

TABLA 2.3.1-1.

Problemas encontrados en el sistema de la Torre Y-ME3003B

| <b>Torre Y-ME3003B</b>              | <b>Problemas</b>                                                                                                        |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Estructura                          | Fisuras, fugas de agua, formación de materia orgánica                                                                   |
| Motores                             | Sobrecalentamiento, exceso de vibraciones y ruidos                                                                      |
| Nivel de flujo de agua              | Disminuye constantemente por motivos de paradas de las celdas cuyo motor se pone fuera de marcha por problemas técnicos |
| Flujo de aire de ingreso a la torre | Reducción del flujo de aire que interviene en el proceso de enfriamiento                                                |

FUENTE: Mónica Alexandra Medina Vizueté

### **2.3.2. DATOS REALES DE LA TORRE Y-ME3003B DE LA REE**

En la siguiente tabla se representan los datos de la torre Y-ME3003B de la REE antes de la optimización, los que fueron medidos con personal del departamento de

Confiabilidad de la empresa utilizando los instrumentos adecuados para determinar las condiciones en la que opera dicho referente de enfriamiento.

TABLA 2.3.2-1.

Condiciones de trabajo de la Torre Y-ME3003B antes de la Optimización.

| <b>AGUA DE ENFRIAMIENTO</b>                                 |           |                        |
|-------------------------------------------------------------|-----------|------------------------|
| Temperatura de bulbo húmedo del aire que ingresa a la torre | $T_{BH1}$ | 14.2°C                 |
| Temperatura de bulbo húmedo que sale de la torre            | $T_{BH2}$ | 35°C                   |
| <b>CAUDAL DE RECIRCULACIÓN</b>                              |           |                        |
| Flujo de agua                                               | L         | 4900 m <sup>3</sup> /h |
| Altura total de la torre                                    | Zt        | 12.5 m                 |
| Dimensiones Nominales de las celdas I x A                   | -         | 8.55 x 11.4 m          |
| Cantidad de ventiladores por celda                          | -         | 1                      |
| Cantidad de celdas                                          | a,b,c,d,e | 5                      |
| Potencia de cada motor                                      | P         | 80HP                   |

FUENTE: Mónica Alexandra Medina Vizueté

### 2.3.3. DATOS DEL AGUA DE LA TORRE Y-ME3003B DE LA REE

TABLA 2.3.3-1.

Datos del agua que ingresa y que sale de la Torre Y-ME3003B.

| Torre Y-ME3003B                 |                |       |                   |
|---------------------------------|----------------|-------|-------------------|
| Agua                            | Abreviatura    | Valor | Unidades          |
| Temperatura de entrada          | Te             | 42    | °C                |
| Temperatura de salida propuesta | Ts             | 30    | °C                |
| Flujo de agua real              | G <sub>L</sub> | 4900  | m <sup>3</sup> /h |
| Flujo de agua propuesto         | G <sub>L</sub> | 6270  | m <sup>3</sup> /h |

FUENTE: Mónica Alexandra MedinaVizueté – Tablero de control del Bunker.

#### 2.3.4. DATOS DEL AIRE DE LA TORRE Y-ME3003B DE LA REE ANTES DE LA OPTIMIZACIÓN

TABLA 2.3.4-1.

Datos del aire que ingresa y sale de la Torre Y-ME3003B.

| Datos                                     | Sitio de medición   | Abreviatura | Valor | Unidades |
|-------------------------------------------|---------------------|-------------|-------|----------|
| Temperatura de termómetro de bulbo seco   | Entrada de la torre | $T_{BS1}$   | 26.6  | °C       |
| Temperatura de termómetro de bulbo húmedo | Entrada de la Torre | $T_{BH1}$   | 14.2  | °C       |
| Temperatura de termómetro de bulbo seco   | Salida de la torre  | $T_{BS2}$   | 37    | °C       |
| Temperatura de termómetro de bulbo húmedo | Salida de la torre  | $T_{BH2}$   | 35    | °C       |

FUENTE: Mónica Alexandra MedinaVizueté – Mediciones realizadas en el área de Utilidades - Torre Y-ME3003B.

### **2.3.5. DATOS TÉCNICOS DE LOS VENTILADORES DE LA TORRE Y-ME3003B DE LA REE**

El número de celdas, motores y de ventiladores de la Torre Y-ME3003B de la REE fueron obtenidos mediante las visitas realizadas al área en donde se encuentra ubicada dicha torre.

Los datos técnicos de los ventiladores fueron medidos en conjunto con el departamento de confiabilidad y un operador de turno correspondiente al área de utilidades, durante un periodo de 7 días una vez por día.

TABLA 2.3.5-1.

Mediciones Realizadas a los ventiladores de la Torre Y-ME3003B.

| Ventiladores                       |                         |
|------------------------------------|-------------------------|
| Cantidad total de ventiladores     | 5                       |
| Número de celdas                   | 5                       |
| Cantidad por celda                 | 1                       |
| Diámetro                           | 5.48 m                  |
| Número de aspas por Ventilador     | 6                       |
| Potencia absorbida                 | 80 HP                   |
| Aire entregado por cada ventilador | 140 m <sup>3</sup> /seg |

FUENTE: Mónica Alexandra Medina Vizueté

### **2.3.6. DATOS MONITOREADOS DE LA TEMPERATURA DEL AGUA EN LA TORRE Y-ME3003B DE LA REE**

TABLA 2.3.6-1.

Datos de temperaturas del agua de recirculación y de Enfriamiento

| <b>FECHA</b> | <b>TEMPERATURA DE ENTRADA DEL AGUA DE RECIRCULACIÓN (°C)</b> | <b>TEMPERATURA DE SALIDA DEL AGUA DE LA TORRE (°C)</b> | <b>DIFERENCIAL DE TEMPERATURA (°C)</b> |
|--------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 01-08-09     | 42                                                           | 31                                                     | 11                                     |
| 02-08-09     | 41                                                           | 32                                                     | 9                                      |
| 03-08-09     | 43                                                           | 33                                                     | 10                                     |
| 04-08-09     | 40                                                           | 31                                                     | 9                                      |
| 05-08-09     | 41                                                           | 31                                                     | 10                                     |
| 06-08-09     | 42                                                           | 32                                                     | 10                                     |
| 07-08-09     | 43                                                           | 34                                                     | 9                                      |
| 08-08-09     | 39                                                           | 29                                                     | 10                                     |
| 09-08-09     | 42                                                           | 32                                                     | 10                                     |
| 10-08-09     | 40                                                           | 31                                                     | 9                                      |
| 11-08-09     | 42                                                           | 32                                                     | 10                                     |
| 12-08-09     | 43                                                           | 32                                                     | 11                                     |
| 13-08-09     | 42                                                           | 32                                                     | 10                                     |
| 14-08-09     | 43                                                           | 32                                                     | 11                                     |
| 15-08-09     | 42                                                           | 32                                                     | 10                                     |
| 16-08-09     | 41                                                           | 32                                                     | 9                                      |
| 17-08-09     | 42                                                           | 32                                                     | 10                                     |
| 18-08-09     | 41                                                           | 31                                                     | 10                                     |
| 19-08-09     | 42                                                           | 31                                                     | 11                                     |
| 20-08-09     | 40                                                           | 30                                                     | 10                                     |
| Promedios    | $\overline{T_e} = 42$                                        | $\overline{T_s} = 32$                                  | $\overline{\Delta T} = 10$             |

FUENTE: Mónica Alexandra MedinaVizueté – Mediciones realizadas en planta durante un periodo de 20 días.

Se realizaron mediciones durante un periodo de 20 días, para controlar la temperatura del agua de recirculación y de enfriamiento, para posteriormente sacar el promedio en la cual la misma ingresa y sale del sistema de la torre Y-ME3003B de la REE.



### 2.3.7. ANÁLISIS EXPERIMENTALES DE CARACTERIZACIÓN DEL AGUA QUE INGRESA A LA TORRE Y-ME3003B DE LA REE

TABLA 2.3.7-1.

Análisis de caracterización del agua que ingresa a la torre.

| Análisis                              | Unidades | Torre de enfriamiento |                       |            |
|---------------------------------------|----------|-----------------------|-----------------------|------------|
|                                       |          | Agua filtrada         | Agua de recirculación | Parámetros |
| Cloro residual (Cl <sub>2</sub> )     | Ppm      | -                     | 0.03                  | 0.2-0.5    |
| Conductividad                         | Umhos/cm | -                     | 791                   | -          |
| Dureza cálcica (CO <sub>3</sub> Ca)   | Ppm      | -                     | 138                   | -          |
| Dureza magnésica                      | Ppm      | -                     | 129                   | -          |
| Dureza total                          | Ppm      | -                     | 267                   | Max.400    |
| Fosfatos (PO <sub>4</sub> )           | Ppm      | 2.18                  | 2.08                  | 3-5        |
| Materia Orgánica<br>KMnO <sub>4</sub> | Ppm      | -                     | 2.50                  | 3.5        |
| pH                                    |          | -                     | 8.32                  |            |
| Sílice SiO <sub>2</sub>               | Ppm      | 119.8                 | 119.5                 | 125        |
| Turbidez                              | NTU      | 3.5                   | 4.2                   | -          |

FUENTE: Mónica Alexandra MedinaVizuite – CONCAL.

Los análisis de laboratorio que nos permitieron medir los parámetros del agua de recirculación (agua que ingresa a la torre) y del agua filtrada (agua que se utiliza para la compensación), fueron realizados en el CONCAL de la REE.

Para la realización de los análisis que se realizaron en el laboratorio para el agua que ingresa a la torre, se contó con la ayuda del personal de turno que labora en el CONCAL, los materiales y reactivos fueron proporcionados por la empresa, también se utilizó como guía el manual de laboratorio con las técnicas adecuadas para la determinación de las características del agua de enfriamiento y sus parámetros establecidos por la REE.

### **3. CÁLCULOS Y RESULTADOS**

### **3.1. CÁLCULOS**

#### **3.1.1. DATOS ADICIONALES**

##### **3.1.1.1. CONSTANTES DEL AIRE**

En la siguiente tabla se representan los valores de la constante universal de los gases y el peso molecular del aire para las condiciones de 1 atmósfera de presión.

TABLA 3.1.1.1-1.  
Valores Constantes del aire.

| Aire                                | Valor | Unidades     |
|-------------------------------------|-------|--------------|
| R(Constante Universal de los gases) | 0.082 | atm.L/°K.mol |
| PM(Peso Molecular del aire)         | 28.96 | g/mol        |

FUENTE: Datos obtenidos en Termodinámica de SENGEL.

#### **3.1.2. CÁLCULOS DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO PARA OPTIMIZACIÓN DE LA TORRE Y-ME3003B DE LA REE**

Los cálculos se realizaron tomando como referencia el punto de Diagnóstico que corresponde al sistema actual de los motores de la Torre Y-ME3003B que continuamente presentan fallas operacionales por sobrecalentamiento y exceso de vibraciones, además la empresa tiene proyectado a futuro incrementar el flujo de aire utilizado para el sistema de enfriamiento para lo cual se realizaron los siguientes cálculos de Ingeniería para Optimizar el proceso dicho proceso.

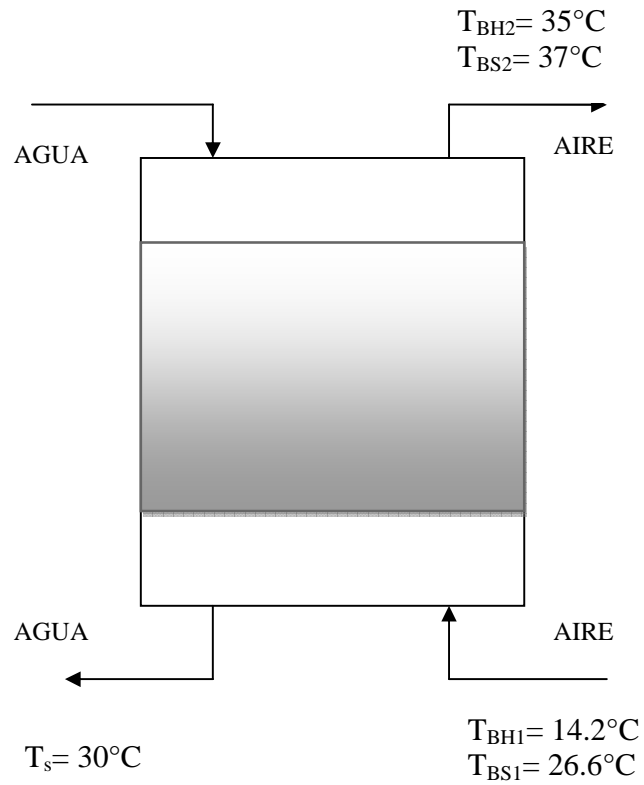
### **3.1.2.1. DIAGRAMA DE LA TORRE Y-ME3003B DE LA REE**

Para la realización del diagrama se utilizaron datos reales de la torre Y-ME3003B como son datos de: temperatura del agua de recirculación (actual), temperatura del agua de enfriamiento (propuesta), flujo de agua que ingresa al sistema (actual), temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo a la (entrada y salida de la torre) obtenidas experimentalmente.

El agua de recirculación ingresa a la torre por la parte superior a una  $T = 42^{\circ}\text{C}$  y en un flujo de  $4900 \text{ m}^3/\text{h}$  y sale por la parte inferior hacia la piscina de agua de enfriamiento a una  $T=30^{\circ}\text{C}$ .

El aire ingresa por la parte inferior de la torre a una  $T_{\text{BH1}}= 14.2^{\circ}\text{C}$  y  $T_{\text{BS1}}= 26.6^{\circ}\text{C}$  y sale por la por la chimenea de la torre que cubre los ventiladores a una  $T_{\text{BH2}}= 35^{\circ}\text{C}$  y  $T_{\text{BS2}}= 37^{\circ}\text{C}$ .

$$T_e = 42^{\circ}\text{C}$$
$$G_L = 4900 \text{ m}^3/\text{h}$$



Donde:

$T_e$  = Temperatura del agua que entra a la torre

$T_s$  = Temperatura del agua que sale de la torre

$T_{BH1}$  = Temperatura de bulbo Húmedo del aire que ingresa a la torre

$T_{BS1}$  = Temperatura de bulbo seco del aire que ingresa a la torre

$T_{BH2}$  = Temperatura de bulbo Húmedo del aire que sale de la torre

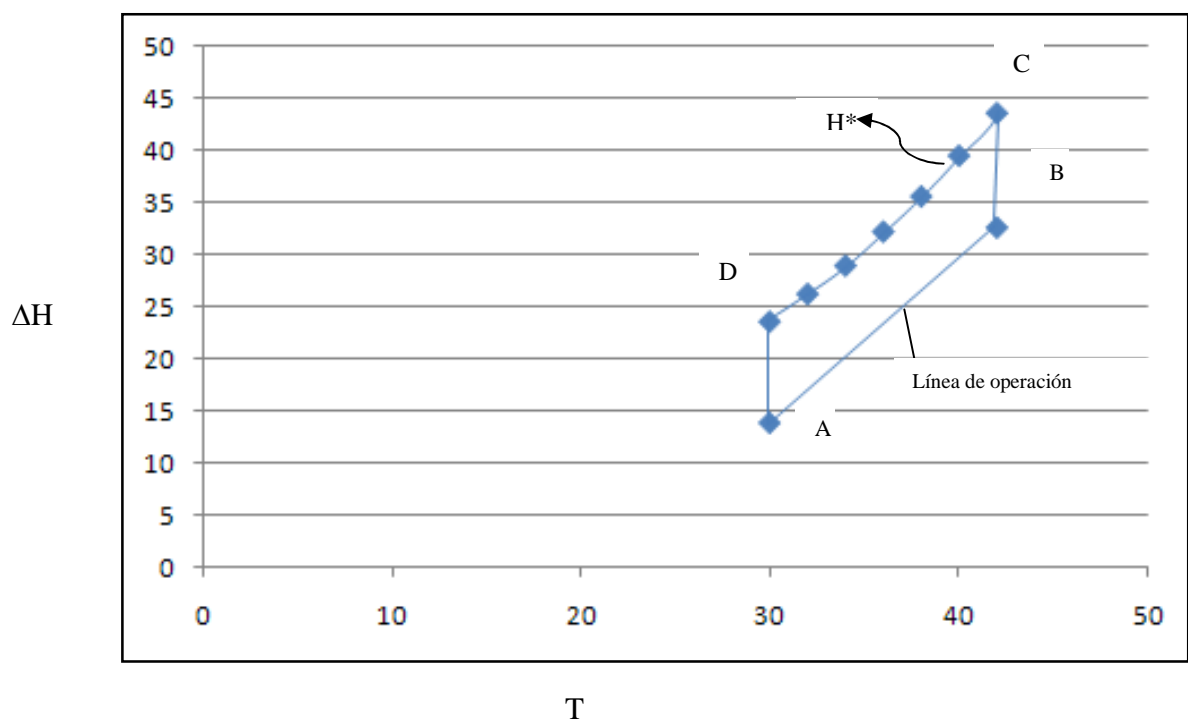
$T_{BS2}$  = Temperatura de bulbo seco del aire que sale de la torre

### 3.1.2.2. DIAGRAMA ENTÁLPICO

Se representa en el siguiente diagrama la temperatura-entalpía para un proceso de interacción aire-agua, considerando la teoría de Merkel.

La entalpía de interfase o de saturación en función de la temperatura está representada por la curva de equilibrio y representa la entalpía de mezclas saturadas de aire-vapor de agua en función de la temperatura del agua de la torre.

La línea de operación está representada por A-B, en donde: A es la intersección de la entalpía del aire al ingreso de la torre en función del agua de enfriamiento y B es la intersección de la entalpía del aire a la salida de la torre en función del agua de recirculación.



Graf. 3.1.2.2-1. Entalpías en Función de las Temperaturas

Donde:

B-C = Pendiente de la gráfica.

A-B = Línea de Operación

$\Delta H$  = Entalpía del aire

T = Temperatura del agua

H\* = Entalpía de Interfase

D-C = Curva de equilibrio

➤ La Curva de Equilibrio está representada con la siguiente ecuación:

$$H^* = C_p \cdot t_L + \lambda Y_S \quad \text{Ec. 3.1.2.2-1}$$

Donde:

$$t_L = t_{\text{sat}}$$

- La humedad calculada para la Torre de enfriamiento Y-ME3003B, es determinada mediante la Ec.3.1.2.2-2.

$$Y_S = 0.62 \frac{P_W}{P - P_W} \quad \text{Ec. 3.1.2.2-2}$$

Donde:

$Y_s$ = Humedad calculada para el Sistema de Enfriamiento Torre Y-ME3003B de la REE.

✓ 30° C

$$Y_S = 0.62 \frac{31.82 \text{ mmHg}}{(760 - 31.82) \text{ mmHg}} = 0.0270 \frac{\text{Kg de agua}}{\text{kg de aire seco}}$$

Para la determinación de las distintas humedades a diferentes temperaturas se considera intervalos de 2°C entre el rango mínimo y máximo de las temperaturas del flujo líquido a la entrada y salida del sistema de enfriamiento antes mencionado, como se representa en la Tabla 3.1.2.2-1.

TABLA 3.1.2.2-1.



Datos determinados de humedad para la Torre Y-ME3003B antes de la optimización

| Temperatura (°C) | Ys<br>(lbs de agua/lbs de aire seco) |
|------------------|--------------------------------------|
| 30               | 0.0270                               |
| 32               | 0.0305                               |
| 34               | 0.0343                               |
| 36               | 0.0386                               |
| 38               | 0.0433                               |
| 40               | 0.0486                               |
| 42               | 0.0545                               |

FUENTE: Mónica Alexandra Medina Vizuetete

- El calor potencial del referente sistema de enfriamiento es calculada mediante la Ec. 3.1.2.2-3.:

$$C_p = 0.24 + 0.46 Y_s \quad \text{Ec. 3.1.2.2-3}$$

Donde :

$C_p$  = Es el calor potencial para las diferentes humedades.

$$\checkmark C_p = 0.24 + 0.46(0.0270) = 0.252$$

TABLA 3.1.2.2-2.

Datos de Calor Potencial de la Torre Y-ME3003B para las diferentes temperaturas del flujo líquido considerando 2 °C como rango entre la temperatura de entrada y salida del sistema.

| Temperatura (°C) | Capacidad calorífica | Valor |
|------------------|----------------------|-------|
| 30               | Cp <sub>1</sub>      | 0.252 |
| 32               | Cp <sub>2</sub>      | 0.254 |
| 34               | Cp <sub>3</sub>      | 0.255 |
| 36               | Cp <sub>4</sub>      | 0.257 |
| 38               | Cp <sub>5</sub>      | 0.259 |
| 40               | Cp <sub>6</sub>      | 0.262 |
| 42               | Cp <sub>7</sub>      | 0.265 |

FUENTE: Mónica Alexandra Medina Vizuetete

- Posteriormente se reemplazan los datos de la humedad,  $C_p$  y las diferentes temperaturas del agua de la torre, en la ecuación de la curva de equilibrio:

$$H^* = C_p \cdot t_L + \lambda Y_S \quad \text{Ec. 3.1.2.2-4}$$

Donde :

$H^*$  = Entalpía de Saturación

$$\lambda = 597.2$$

➤  $H^* = 0.252(30) + 597.2 (0.0270)$

$$= 7.56 + 16.12 = 23.68$$

$$= 23.68 \text{ Kcal de agua} / \text{Kg de aire seco}$$

TABLA 3.1.3.2-3.

Entalpías de saturación de la Torre Y-ME3003B de la REE considerando las temperaturas del agua de Entrada y salida del sistema de enfriamiento en un rango de 2°C entre el agua de recirculación y de enfriamiento

| T  | H* Kcal/kg |
|----|------------|
| 30 | 23,68      |
| 32 | 26,33      |
| 34 | 29,05      |
| 36 | 32,3       |
| 38 | 35,69      |
| 40 | 39,59      |
| 42 | 43,67      |

FUENTE: Mónica Alexandra Medina Vizuete.

- Para determinar las entalpías de entrada y salida de la torre, se utiliza la tabla psicométrica .Utilizando las temperaturas de bulbo seco a la entrada y salida de la torre y las temperaturas de bulbo húmedo a la entrada y salida de la torre. (Ver Anexo X).

$$H_1 = 25.2 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm de aire seco}} * \frac{252\text{cal}}{1 \text{ Btu}} * \frac{1\text{Kcal}}{1000\text{cal}} * \frac{2.2 \text{ lbm de aire seco}}{1\text{Kg de aire seco}}$$

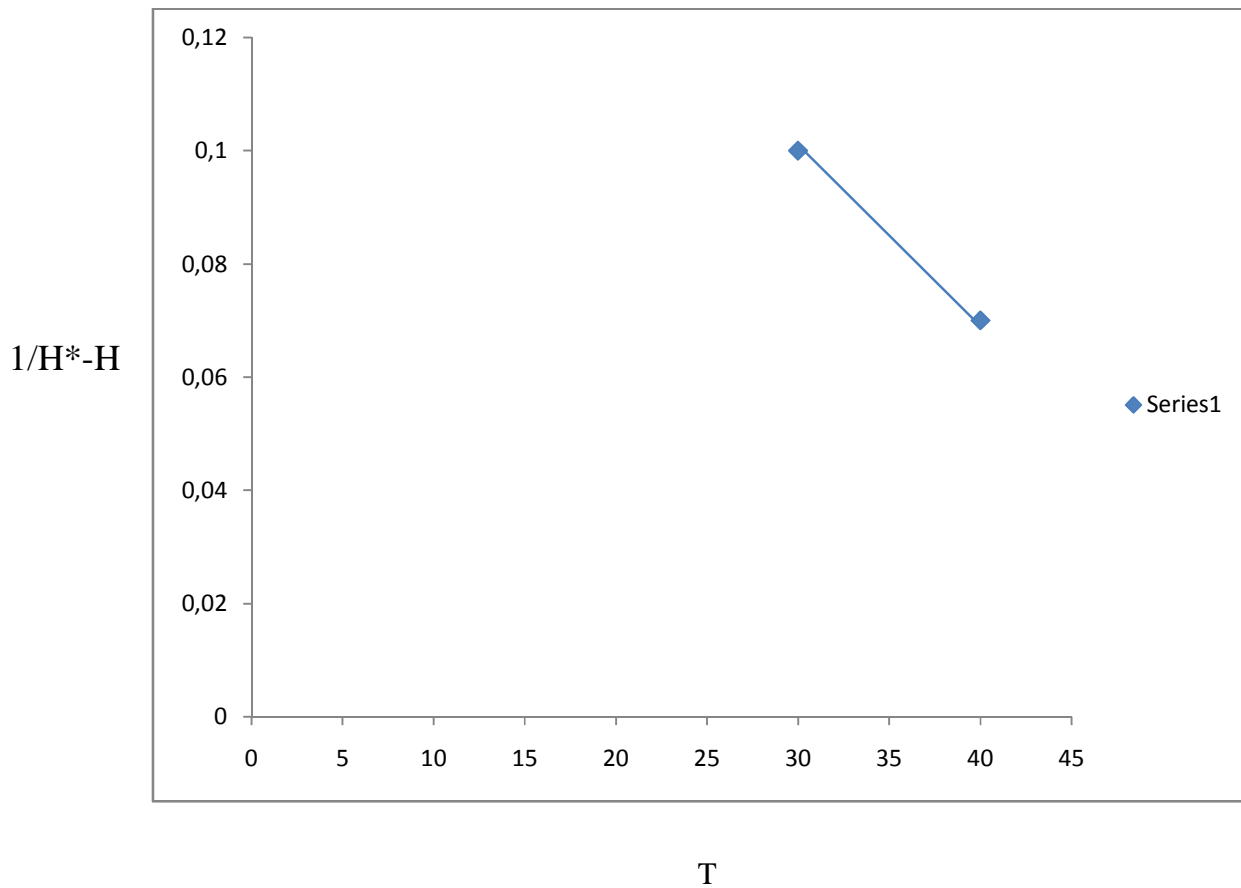
$$H_1 = 13.97 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg de aire seco}}$$

TABLA 3.1.2.2-3.

Datos de Entalpías del aire con el que trabaja la Torre Y-ME3003B de la REE

| Entalpías del aire de la Torre Y-ME3003B | Kcal /Kg de aire seco |
|------------------------------------------|-----------------------|
| H <sub>1</sub>                           | 13.97                 |
| H <sub>2</sub>                           | 16.07                 |
| H <sub>3</sub>                           | 18.84                 |
| H <sub>4</sub>                           | 20.51                 |
| H <sub>5</sub>                           | 24.67                 |
| H <sub>6</sub>                           | 26.33                 |
| H <sub>7</sub>                           | 32.70                 |

FUENTE: Mónica Alexandra Medina Vizueté



Graf. 3.1.2.2-2. Integral de la ecuación

En el gráfico 3.1.2.2-2. se sitúan los valores de  $1/H^*-H$  en función de la temperatura del flujo líquido del agua del sistema de enfriamiento.

### 3.1.2.3. CÁLCULO DE EL ÁREA BAJO LA CURVA

Para calcular el área bajo la curva, se considera como límites los valores de entalpía inicial y final con la que trabaja el sistema de enfriamiento utilizando los datos entalpías del aire a la entrada y a la salida de la torre y las entalpías de saturación para las diferentes temperaturas obtenidas anteriormente:

$$N_{OH} = \int_{13.97}^{32.70} \frac{1}{H^* - H} dH \quad \text{Ec. 3.1.2.3-1}$$

-Considerando que:

$$\left( \frac{1}{H^* - H} \right) = \frac{0.62}{7} = 0.08 \text{ kcal/kg de aire seco}$$

➤ Entonces, el área bajo la curva será:

$$N_{OH} = 0.08 \int_{13.97}^{32.70} dH$$

$$N_{OH} = 0.08(32.70 - 13.97) \text{ Kcal/Kg de aire seco}$$

$$N_{OH} = 1.5 \text{ Kcal/Kg de aire seco}$$

#### 3.1.2.4. CÁLCULO DE LA CORRIENTE GASEOSA

Para el cálculo de la corriente gaseosa se utilizan los valores de entalpía (obtenidas con la utilización de las temperaturas del aire medidas en el sistema de enfriamiento), en función de las temperaturas de entrada y salida del agua en la torre, tenemos lo siguiente:

$$m_{AB} = \frac{H_2 - H_1}{T_2 - T_1} \text{ Ec. 3.1.2.4-1}$$

Donde:

$m_{AB}$  = Masa de corriente gaseosa (pendiente de la recta)



$H_1$  = Entalpía del aire a la entrada de la torre.

$H_2$  = Entalpía del aire a la salida de la torre.

$T_1$  = Temperatura del agua de enfriamiento.

$T_2$  = Temperatura del agua de recirculación.

$$m_{AB} = \frac{(32.7 - 13.97) \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}}{(42 - 30)^\circ\text{C}}$$

$$m_{AB} = \frac{18.7 \text{ Kcal}}{12 \text{ Kg}}^\circ\text{C}$$

$$m_{AB} = 1.56 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}^\circ\text{C}$$

### 3.1.2.5. FLUJO DE AGUA DE RECIRCULACIÓN

Considerando las condiciones del sistema de enfriamiento de agua de la torre Y-ME3003B:

-Flujo de agua de recirculación antes de la optimización:

$$G_L = 4900 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * \frac{1000\text{L}}{\text{m}^3} * \frac{\text{kg}}{\text{L}} * \frac{\text{h}}{3600\text{s}} = 1361.11 \text{ kg/s}$$

-Flujo de agua de recirculación propuesto:

$$G_L = 6270 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * \frac{1000\text{L}}{\text{m}^3} * \frac{\text{kg}}{\text{L}} * \frac{\text{h}}{3600\text{s}} = 1741.66 \text{ kg/s}$$

### 3.1.2.6. CÁLCULO DEL FLUJO DE AIRE

Para el cálculo del flujo de aire se considera la cantidad flujo líquido del agua con la que trabaja el sistema de enfriamiento, la capacidad calorífica del agua (específica) para las condiciones del ambiente en donde se encuentra ubicada la torre de referencia y la cantidad de masa gaseosa es decir pendiente de la recta del gráfico 3.1.2.3-1. , se tiene la siguiente ecuación:

$$G_G = \frac{G_L C_L}{m_{AB}} \quad \text{Ec. 3.1.2.6-1}$$

Donde:

$G_G$  = Flujo de aire de los ventiladores

$G_L$  = Flujo de agua de recirculación (4900 m<sup>3</sup>/h)

$C_L$  = Capacidad calórica del agua

$m_{AB}$  = Pendiente de la gráfica A-B (línea de operación)

➤ Flujo de aire de los ventiladores antes de la optimización es:

$$G_G = \frac{1361.11 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \cdot \frac{1\text{Kcal}}{\text{Kg}} \cdot ^\circ\text{C}}{1.56 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$G_G = 872.50 \text{ Kg/s}$$

➤ Flujo de aire de los ventiladores antes de la optimización en m<sup>3</sup>/s:

$$G_G = 872.50 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \cdot \frac{1000\text{g}}{1 \text{ Kg}} \cdot \frac{1\text{L}}{1.2896\text{g}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000\text{L}} = 676.57\text{m}^3/\text{s}$$

- Flujo de aire propuesto para los ventiladores:

$$G_G = \frac{1741.66 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \cdot \frac{1\text{Kcal}}{\text{Kg}} \cdot ^\circ\text{C}}{1.15 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} ^\circ\text{C}}$$

$$G_G = 1514.48 \text{ Kg/s}$$

- Flujo de aire propuesto para los ventiladores en m<sup>3</sup>/s:

$$G_G = 1514.48 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \cdot \frac{1000\text{g}}{1 \text{ Kg}} \cdot \frac{1\text{L}}{1.2896\text{g}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000\text{L}} = 1174.38 \text{ m}^3/\text{s}$$

### 3.1.2.7. FLUJO DE CADA VENTILADOR

Según el Colling Tower, para el cálculo del flujo de aire de cada ventilador se aplica la siguiente Ecuación:

$$G'_G = \frac{G_G}{\text{Número de ventiladores}} \quad \text{Ec. 3.1.2.7-1}$$

Donde:

$G_G$  = Flujo de aire total de los ventiladores.

$G'_G$  = Flujo de aire individual para cada ventilador.

-Flujo de aire de cada ventilador antes de la optimización:

$$G'_G = \frac{676.57 \text{ m}^3/\text{s}}{5}$$

$$G'_G = 135.31 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Para el flujo de aire propuesto:

$$G'_G = \frac{1174.38 \text{ m}^3/\text{s}}{5}$$

$$G'_G = 235 \text{ m}^3/\text{s}$$

### 3.1.2.8. CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO

Para calcular la capacidad de enfriamiento de la torre Y-ME3003B de la REE se tomo en cuenta la capacidad de flujo de aire de diseño establecida por los fabricantes de dicho sistema y el flujo de aire que ingresa a la torre antes y después de la optimización.

- Antes de la optimización, la capacidad de enfriamiento:

$$\begin{array}{rcl} 240 \text{ m}^3/\text{s} & \text{———} & 100\% \\ 135.31 \text{ m}^3/\text{s} & \text{———} & x = 56.4 \% \end{array}$$

-Eficiencia propuesta de la capacidad de enfriamiento:

$$\begin{array}{rcl} 240 \text{ m}^3/\text{s} & \text{———} & 100\% \\ 235 \text{ m}^3/\text{s} & \text{———} & x = 98 \% \end{array}$$

### 3.1.2.9. CÁLCULO DE LA POTENCIA REQUERIDA PARA EL VENTILADOR

Partiendo de los datos de los ventiladores como: caudal, diámetro de referencia, velocidad angular de entrada y de salida del ventilador, se halla el diámetro teórico del ventilador para posteriormente encontrar el valor de la potencia requerida.

$$\frac{Q_1}{W_1 D_1^3} = \frac{Q_2}{W_2 D_2^3} \text{ Ec. 3.1.2.9-1}$$

Donde:

$Q_1$  = Caudal del aire a la salida del ventilador (dato de diseño).

$Q_2$  = Caudal del aire a la salida del ventilador (dato calculado).

$D_1$  = Diámetro 1 (dato de diseño).

$W_1$  = Velocidad angular 1

$D_2$  = Diámetro 2

$W_2$  = Velocidad angular 2

-Diámetro teórico de los ventiladores:

$$D_2 = \sqrt[3]{\frac{Q_2 W_1 D_1^3}{W_2 Q_1}}$$

$$D_2 = \sqrt[3]{\frac{185.17 \text{ m}^3/\text{s} * \frac{1750}{1201} \text{ rpm} * (5.45 \text{ m})^3}{\frac{261}{179} \text{ rpm} * 240 \text{ m}^3/\text{s}}}$$

$$D_2 = 5.0 \text{ m}$$

-Determinación de la potencia de un motor, de acuerdo al Colling Tower:

$$\frac{P_1}{d_1 W_1^3 D_1^5} = \frac{P_2}{d_2 W_2^3 D_2^5} \text{ Ec. 3.1.2.9-2}$$



Donde:

$D_1$  = Diámetro 1

$W_1$  = Velocidad angular 1

$D_2$  = Diámetro 2

$W_2$  = Velocidad angular 2

Para el cálculo de la eficiencia del ventilador se requiere de dos densidades, las cuales se obtienen a partir de los datos reales que fueron medidos en el sistema de la torre de referencia y se calculan con la siguiente Ecuación:

➤ Para la temperatura de  $T = 309.10 \text{ }^\circ\text{K}$

$$d_1 = \frac{PM}{RT_1} \text{ Ec. 3.1.2.9-3}$$

$$d_1 = \frac{1.54 \text{ atm} * 28.96 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{0.082 \frac{\text{atm. L}}{^\circ\text{K. mol}} (309.10)^\circ\text{K}}$$

$$d_1 = \frac{44.58 \text{ g}}{25.34 \text{ L}} = 1.75 \text{ g/L}$$

➤ Para la temperatura una  $T = 287.13^\circ\text{K}$ :

$$d_2 = \frac{PM}{RT_2}$$

$$d_2 = \frac{1.54 \text{ atm} * 28.96 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{0.082 \frac{\text{atm. L}}{^\circ\text{K. mol}} (287.13)^\circ\text{K}}$$

$$d_2 = \frac{44.58 \text{ g}}{23.55 \text{ L}} = 1.82 \text{ g/L}$$

Los valores de las densidades 1 y 2 nos permiten hallar la potencia requerida para el flujo de aire que se utiliza para el enfriamiento del agua.

En la determinación de la potencia mínima requerida para la optimización de los motores de la torre Y-ME3003B se utilizan los datos calculados anteriormente utilizando como base los datos medidos experimentalmente en el área de Utilidades de la REE.

-Potencia requerida para la Optimización del sistema de enfriamiento es:

$$P_2 = \frac{P_1 d_2 W_2^3 D_2^5}{d_1 W_1^3 D_1^5}$$

$$P_2 = \frac{80 \text{ Hp} * \frac{1.82\text{g}}{\text{L}} * \frac{1750}{1201} \text{ rpm} * (5.45\text{m})^5}{\frac{1.75\text{g}}{\text{L}} * \frac{261}{179} \text{ rpm} * (5.0\text{m})^5}$$

$$P_2 = 130 \text{ HP}$$

➤ Potencia del motor de referencia antes de la optimización:

98%      ———      130 HP

56%      ———      x      =75 HP ≈ 80 HP

El dato obtenido de la potencia del ventilador de referencia antes de la optimización es aproximadamente igual al medido experimentalmente en planta para los motores correspondientes a cada celda de la torre.



## 3.2. RESULTADOS

### 3.2.1. ENTALPÍAS DEL AIRE Y DE INTERFASE

TABLA 3.2.1-1.

Entalpías del aire y de interfase en base a las temperaturas del flujo de aire y agua que ingresa a la torre.

| T  | P <sub>w</sub> | P <sub>v</sub> | Y <sub>s</sub>          | H                    | H*                   | H*-H                 | 1/(H*-H)             |
|----|----------------|----------------|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| °C | mm Hg          | mm Hg          | Kg agua/Kg de aire seco | Kcal/Kg de aire seco | Kcal/Kg de aire seco | Kcal/Kg de aire seco | Kcal/Kg de aire seco |
| 30 | 31.82          | 0.0298         | 0.0270                  | 13.97                | 23.68                | 10                   | 0,10                 |
| 32 | 35.66          | 0.0266         | 0.0305                  | 16.07                | 26.33                | 10                   | 0.10                 |
| 34 | 39.90          | 0.0238         | 0.0343                  | 18.84                | 29.05                | 10                   | 0.09                 |
| 36 | 44.56          | 0.0213         | 0.0386                  | 20.51                | 32.30                | 12                   | 0.08                 |
| 38 | 49.69          | 0.0191         | 0.0433                  | 24,67                | 35.69                | 12                   | 0.08                 |
| 40 | 55.32          | 0.0171         | 0.0486                  | 26.33                | 39.59                | 13                   | 0,07                 |
| 42 | 61.50          | 0.0154         | 0.0545                  | 32.70                | 43.67                | 11                   | 0,09                 |
|    |                |                |                         |                      |                      |                      | $\sum = 0.62$        |

FUENTE: Mónica Alexandra Medina Vizuetete

Donde:

$H$  = Entalpías del aire (Kcal/Kg de aire seco)

$H^*$  = entalpía de saturación (Kcal/Kg de aire seco)

$Y_s$  = Humedad para las diferentes temperaturas (Kg agua/Kg de aire seco)

$P_w$  = Presión de saturación mm Hg

$P_v$  = Presión de vapor mm Hg

$T$  = Temperaturas del líquido °C

Los datos obtenidos en la tabla 3.2.1-1. Implica la relación del proceso de humidificación en donde hace referencia a las mezclas de aire y vapor de agua , considerando que el comportamiento de la mezcla se da en un área de contacto o superficie de contacto, en el proceso de enfriamiento de la Torre Y-ME3003B.

### 3.2.2. RESULTADOS ANTES Y DESPUÉS DE LA OPTIMIZACIÓN

TABLA 3.2.2-1.

Comparación de flujo de aire antes y después de la optimización.

| <b>Sistema de Enfriamiento-Torre Y-ME3003B</b> | <b>Antes</b> | <b>Después</b> | <b>Unidades</b>   |
|------------------------------------------------|--------------|----------------|-------------------|
| Flujo de aire                                  | 135.35       | 235            | m <sup>3</sup> /s |
| Flujo de agua                                  | 490          | 6270           | m <sup>3</sup> /h |
| Potencia absorbida por los ventiladores        | 80           | 130            | HP                |
| Diferencial de Temperatura                     | 10           | 12             | °C                |
| Capacidad de enfriamiento                      | 56.4         | 98             | %                 |

FUENTE: Mónica Alexandra Medina Vizueté

### 3.2.3. RECURSO PRESUPUESTARIO



La estimación presupuestaria, considerando el tiempo que se emplea para la instalación de cada motor (10 horas), el costo de los materiales empleados (5 motores eléctricos), la mano de obra empleada para la instalación de los motores y un 5% de imprevistos está representada en la siguiente tabla:

TABLA 3.2.3-1.

Recurso presupuestario estimado para la optimización del Sistema de Enfriamiento Y-ME3003B

| Ítems                                                                                                                              | Monto \$ US        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| 1. Gasto de Inversión:<br>- 5 Motores trifásicos de inducción, con rotor jaula de ardilla, 130 HP 1780 rpm, 60 Hz, Alta eficiencia | 27565.00           |
| 2. Gasto Operacional:<br>-Mano de Obra                                                                                             | 200                |
| 1Supervisor                                                                                                                        | 150                |
| 1Mecánico                                                                                                                          | 150                |
| 1Eléctrico                                                                                                                         | 40                 |
| 2Ayudantes mecánicos                                                                                                               |                    |
| Imprevistos (5%)                                                                                                                   | 1405.25            |
| <b>Costo Total</b>                                                                                                                 | <b>\$ 29510.25</b> |

FUENTE: Anexo XVII

### 3.3. PROPUESTA

TABLA 3.3-1.

Propuesta para la Optimización de la Torre Y-ME3003B de la REE

|                           | Propuesta                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Torre Y-ME3003B de la REE | Realizar el cambio de los 5 motores de la Torre cuya potencia es de 80 HP por otros de 130 HP.                                                                                                                |
|                           | Aumentar la capacidad de enfriamiento casi al doble de lo que actualmente esta funcionando obteniendo un 98% de eficiencia.                                                                                   |
|                           | Incrementar la cantidad de flujo de aire de 135.35 a 235 m <sup>3</sup> /s.<br><br>Incrementar el flujo de agua de enfriamiento de 4900 a 6270 m <sup>3</sup> /h en un diferencial de 1370 m <sup>3</sup> /h. |

FUENTE: Mónica Alexandra Medina Vizueté

#### **4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

La capacidad de enfriamiento actual del sistema de la Torre Y-ME3003B de la REE es de 56.4 % dato que indico que los equipos están funcionando aproximadamente con la mitad de su eficiencia, produciendo las fallas constantes en su operación, ocasionando sobrecalentamientos, exceso de vibraciones, motivo por el cual varias veces están en constante reparación posteriormente presentando las mismas fallas en su operación.

Al realizar el cambio de los motores de la Torre Y-ME3003B de la REE se evitara poner fuera de funcionamiento las celdas del sistema de enfriamiento, lo que permitirá que el flujo de agua que interviene en el proceso se mantenga estable, se reduzcan las fallas operacionales, disminuyendo el costo que se invierte en la constante reparación de los mismos, lo cual proporcionará un ahorro económico para la empresa.

El costo total de inversión para la instalación y puesta en marcha de los motores es de \$29510.25 lo cual no representa un valor significativo en comparación a las funciones que la Torre Y-ME3003B proporciona a la REE y para las distintas unidades que intervienen en la refinación del Petróleo, ya que al poner fuera de servicio una de las celdas de la torre afecta directamente al proceso porque no distribuye la demanda requerida para los diversas plantas que requieren del agua de enfriamiento para su normal funcionamiento.

El flujo de agua incrementa en  $1370 \text{ m}^3/\text{h}$  con la optimización, valores que permitirán que se mejore la eficiencia de la torre antes mencionada a la vez permitirá mayor distribución del flujo de agua de enfriamiento requerido por las diferentes plantas de la Refinería Estatal de Esmeraldas satisfaciendo así la demanda del agua de enfriamiento requerida para las diferentes áreas de la empresa.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Esta tesis puede ser utilizada como una guía para lograr la mejora de la eficiencia de la Torre de enfriamiento Y-ME3003B.

### 5.1. CONCLUSIONES

- En el Diagnóstico realizado se determino que la capacidad de enfriamiento de la Torre Y-ME3003B de la REE es de 56.4 % y con la Optimización su capacidad de enfriamiento será el 98%.
- Es necesario el cambio de motores cuya potencia es de 80 HP por otros de 130 HP, para mejorar la eficiencia térmica del sistema de Enfriamiento de la Torre.
- Al realizar el cambio de motores se incrementara el flujo de aire que ingresa a la torre de 135.35 a 235 m<sup>3</sup>/s.
- Con la optimización del sistema de enfriamiento el flujo de agua es de 4900 m<sup>3</sup>/h, después de la optimización es de 6200 m<sup>3</sup>/h aumentando así el flujo en 1300 m<sup>3</sup>/h.

- Al realizar el cambio de motores se tiene que hacer una inversión total de \$29510.25 incluyendo los materiales, la mano de obra y el tiempo que se requiere para la instalación y montaje de los mismos, lo cual no es un costo significativo considerando que al incrementar la eficiencia térmica del sistema de la torre se evitarán las constantes paradas del referente y por ende se evitarán las pérdidas económicas y de producción en las diferentes unidades de la REE.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- Una buena limpieza en las áreas de depósito de agua fría y agua caliente, permitirán verificar que la zona de succión y las rejillas estén limpias y adecuadamente instaladas.
- Realizar un control para asegurarse que el agua fluya y se distribuya correctamente en las bandejas laterales del material de relleno de cada celda de la torre.
- Verificar que los niveles de ruido y vibración del motor, reductor y ventilador sean adecuados de acuerdo a la función de cada instrumento.
- Es recomendable que el operador este correctamente protegido con la ropa apropiada e instrumentos de protección para la manipulación de químicos que utilizan para tratamientos del agua de enfriamiento de las torres.
- Eliminar las fugas de agua de las estructuras de concreto de las torre Y-ME3003B.
- Limpiar constantemente las rejillas que se encuentran ubicadas en la parte inferior de cada celda.
- Se debe controlar la temperatura de los motores y el nivel de vibraciones por lo menos 2 veces por turno de cada operador para evitar cualquier problema operacional de los motores.

## **BIBLIOGRAFÍA**

### **BIBLIOGRAFÍA GENERAL**

- BAÉZ, L. Diccionario de Terminología Empleada en Refinería- Petróleo en Ecuador y el Mundo. Ecuador 1996.
- TOSCHEM. Tecnología del Tratamiento Químico de Agua de Enfriamiento-Water & Process Technologies. Ecuador.
- PETROINDUSTRIAL, Manual de Operación Torres de Enfriamiento-Tratamiento de Aguas. Ecuador 2008. pp.s-n.
- PETROINDUSTRIAL. Funcionamiento-Torres de Enfriamiento. Ecuador, 2008. Pp. s-n
- PETROINDUSTRIAL. Torre Y-ME3003B: Descripción, Flujo-Control y Tratamiento del Agua de Enfriamiento. Ecuador, 2008. Pp. s-n
- REE. Unidad de Control de Calidad - Métodos de Análisis para el Laboratorio de Aguas. pp. s-n.
- PETROINDUSTRIAL. Conceptos Básicos. Ecuador, 2008. Pp. S-n.
- PÉREZ, J. Soluciones Prácticas para el Ing. Químico. México: McGraw Hill, Segunda Edición. 2000. pp. 151-153.

- WATSON, H. Principios de los Procesos Químicos. Pp. 128-133.
- CHIYODA, Manual de Operación de las Torres de Enfriamiento. Japón: Chemical Engineering & Construction, 1987, v8. pp. s-n



## **BIBLIOGRAFÍA ESPECÍFICA**

- Torres de Enfriamiento - Generalidades

<http://depa.pquim.unam.mx/~luimary/generalidades.html>

- Descripción de Torre de Enfriamiento, Teoría del enfriamiento:

<http://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/refrigeracion/torres-enfriamiento.htm>

- Clasificación- Torres de Enfriamiento.

<http://www.sc.ehu.es/hmwmigaj/Torre.htm>

- Torres de Enfriamiento de Tiro Mecánico.

[http:// www.iq.uva.es/separación/archivos/toroforzado.doc](http://www.iq.uva.es/separación/archivos/toroforzado.doc)

## ANEXO I

### MOTOR ACCIONADOR DEL VENTILADOR DE LA CELDA “d” DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO Y-ME3003B



## ANEXO II

### ASPAS DEL VENTILADOR DE LA CELDA “d”



## **ANEXO III**

### **PARTE INFERIOR DE LA CELDA “d”-PISCINA RECOLECTORA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO**



## ANEXO IV

### REJILLAS QUE RETIENEN LOS RESIDUOS SÓLIDOS PARA CADA CELDA





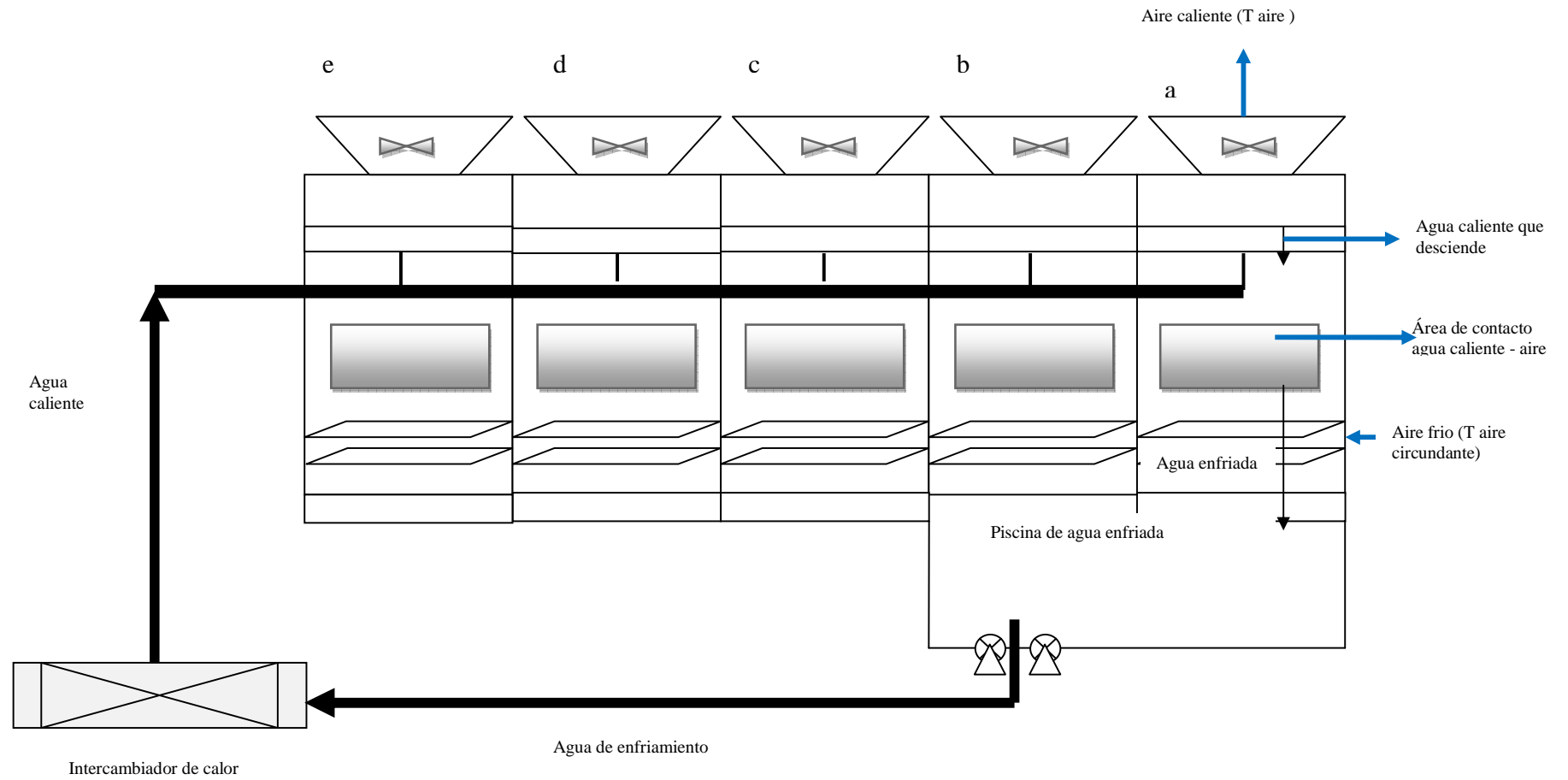
## ANEXO V

### VENTILADOR DE LA CELDA “d”



## ANEXO VI

### DIAGRAMA DE TORRE DE ENFRIAMIENTO Y-ME3003B DE LA REE



## **ANEXO VII**

### **INSTRUCCIONES PARA LA MAQUINARIA Y ESTRUCTURA DEL VENTILADOR DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO**

Es indispensable la presencia de un supervisor proporcionado por el fabricante durante el periodo de arranque inicial.

#### **Equipo Mecánico**

Los fusibles en el circuito de control del motor del ventilador deben ser retiradas y guardados por el Ing. de turno.

Se deben chequear los pernos de fijación de los siguientes equipos:

- Caja de engranajes
- Motor
- Eje de salida del ventilador hasta la caja de engranajes.

Es de suma importancia para un máximo de eficiencia en la operación

Realizar un chequeo visual general de cada uno de los componentes del ventilador.

Los ventiladores están ahora listos para un chequeo inicial en el movimiento.



## **ANEXO VIII**

### **REGLAS DE OPERACIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO**

- ↗ El flujo de aire que entra a través de una serie de compuertas es en sentido contrario al del flujo del agua a ser enfriada.
- ↗ La mezcla del aire y agua se lleva a cabo en el área de fraccionamiento localizada dentro de la torre ocupada por las rejillas.
- ↗ El aire caliente luego que ha pasado el área de eliminación de arrastre es expulsado a través de las chimeneas de los ventiladores.
- ↗ La línea de entrada de agua caliente termina al punto de entrada por medio de una brida que conecte con la línea del cliente.
- ↗ La distribución del agua caliente, dentro de la torre se realiza por medio de una bandeja principal y bandejas laterales. Al fondo de las bandejas laterales están colocadas las boquillas plásticas que dirigen sus chorros a una serie de placas difusoras primarias luego el agua empieza a caer a través del área de fraccionamiento. Tanto la bandeja principal como las secundarias, tiene dimensiones ligeramente superiores a la capacidad normal.
- ↗ El grupo mecánico está formado por un ventilador axial, una caja reductora y un motor eléctrico. El motor localizado fuera de la chimenea del ventilador se conecta a la caja de reducción por medio de un eje flexible.
- ↗ Para los controles que se realizan antes de iniciar la operación de la torre de enfriamiento:
  - Inspección visual exterior de la torre para ver si la estructura general no ha sufrido variaciones debido a cualquier causa.
  - Inspección visual interior de la estructura de relleno eliminador de arrastre.

## **ANEXO IX**

### **INSTRUCCIONES PUESTA EN MARCHA Y FUNCIONAMIENTO**

Se debe observar las siguientes instrucciones en la preparación del grupo mecánico y estructura de la torre, antes del periodo inicial de la puesta en marcha (sin carga térmica).

1. Los fusibles del circuito eléctrico que regulan los motores eléctricos se tienen que extraer y entregar al ingeniero del cliente encargado de la puesta en marcha.
2. Antes de iniciar el funcionamiento de la torre de enfriamiento, son necesarios los siguientes controles:
  - a. El control visual exterior de la torre, para observar si la estructura general no sufrió variaciones debido a cualquier circunstancia.
  - b. El control visual interno de la estructura, relleno y eliminadores de gotas.
  - c. Asegurarse que las toberas no estén obstruidas.
  - d. El control de las partes mecánicas y particularmente de:
    - Estabilidad y rigidez del anclaje del reductor.
    - Nivelación y alineamiento del árbol de transmisión entre motor y reductor.
    - Angulación ajustable de las palas del ventilador, apretando centro palas. La distancia entre la extremidad de las palas y la chimenea no debe ser menor de 20mm ni mayor de 38mm. El ajuste final del ángulo de palas se hará durante la primera puesta en marcha.
    - La estabilidad y nivelación sobre el actual lente del reductor.
    - El ventilador al hacerle girar manualmente, para asegurarse que la rotación se efectúa sin interferencias.

e. El ángulo de extremidad de palas regula el flujo de aire a través de la torre. Para el periodo de primera puesta en marcha ( sin carga térmica) el ángulo de palas será fijado en grados. Esta operación se efectúa del siguiente modo:

- Los bulones que aseguran la pala deben ser aflojados y cada pala será girada a un ángulo de 5 grados, mediante goniómetro( ver las instrucciones del ventilador).
- Usando una llave dinamométrica apretar progresivamente los correspondientes bulones con igual tensión. Controlar continuamente para mantener constante el debido ángulo de palas.
- Para la puesta a punto del ángulo de palas requerido para el funcionamiento, tomar nota que el ángulo correcto en este caso es del 16,5°.

f. El nivel y el estado del aceite en el reductor son de capital importancia, para la máxima eficiencia de funcionamiento. Cada reductor está provisto de un tubo de ventilación (posición superior). No se deben absolutamente introducir aceite en el tubo de ventilación superior. Cada reductor debe ser llenado de aceite después de su montaje. El nivel del aceite debe ser controlado anotando dicho nivel indicado al final del tubo de nivel, situado al exterior de la chimenea.

A este punto, es necesario un control de todas las uniones de tubo de aceite, para asegurarse que no haya pérdidas.

g. Debe hacerse un control visual general de cada grupo de ventiladores.

h. Se tiene que controlar los bulones que aseguran las partes siguientes:

- Reductor.
- Motor eléctrico.
- Centro-palas-árbol de salida del reductor.
- Juntas elásticas.

- i. Control de la parte hidráulica.
  - Abrir muy lentamente la válvula principal.
  - Abrir muy despacio y regular la válvula de admisión de agua en cada celda de la torre y asegurarse que el agua sea distribuida de modo parejo en todos los canales o pileta de distribución de agua caliente.
  - El reflujó de agua de la pileta de agua fría tiene que efectuarse sin problemas.
  - Cerrar la válvula principal.
3. Iniciar el funcionamiento de la torre:

Los ventiladores ahora están listos para el central inicial de rotación.

- a) Controlar que cada celda del ventilador haya sido evacuado de personal y que solo el personal específicamente encargado de esta operación sea admitido al techo de la torre durante el periodo de la puesta en marcha.
- b) Volver a colocar los fusibles en los circuitos eléctricos y después de planificada la serie de las operaciones de puesta en marcha, poner en funcionamiento el primer ventilador, permitiéndole funcionar solamente pocos segundos para controlar la dirección de rotación (en sentido horario mirando desde arriba).
- c) Después de controlado el sentido de rotación de todos los ventiladores, recién entonces se puede hacer una prueba completa de los ventiladores.
- d) Abrir la válvula principal del agua caliente y asegurarse que el agua se distribuya de modo parejo en todo el sistema de distribución.
- e) Poner en marcha el motor y por consecuencia el reductor y el ventilador.
  - Arrancar cada grupo mecánico en secuencia. No pasar al gripo siguiente hasta que el técnico encargado esté satisfecho de que haya sido alcanzada la velocidad normal de funcionamiento y que el sistema esté libre de vibraciones anómalas.

- Permitir a los ventiladores de funcionar en un periodo inicial de una hora, durante la cual se tiene que controlar constantemente que las vibraciones no sean excesivas y sobre todo que no hayan variaciones en el nivel de aceite de reductor.
- Controlar el ruido del grupo mecánico sea admisible para este tipo de equipos.
- Controlar que el árbol de transmisión gire sin ninguna fricción anormal.
- Controlar que el motor no exceda de una temperatura y amperaje normal.

f. Observar el funcionamiento de toda la torre. La torre dará los mejores resultados después de haber funcionado por un breve periodo.

g. Después de un lapso de una hora de funcionamiento, para todos los motores y sacar los fusibles de los circuitos eléctricos. Hay que controlar la temperatura de los reductores, como así mismo el nivel de aceite de los mismos. Al cambiar la alta temperatura inicial dentro del reductor, la viscosidad del aceite habrá disminuido con posibles pérdidas de las juntas del tubo de aceite. Controlar nuevamente estos puntos.

h. Con todos los controles aprobados por el técnico encargado, el personal debe evacuar los habitáculos de los ventiladores y el techo. Calcular nuevamente los fusibles en los circuitos eléctricos y arrancar de nuevo con los ventiladores.

El periodo de funcionamiento, a carga ligera con menor inclinación de palas, debe ser decidido a discreción del ingeniero encargado de la puesta en marcha. Cuanto más se extiende este periodo, lógicamente con los controles regulares de las vibraciones y el nivel de aceite, será mejor. Si los ventiladores quedan parados por un periodo prolongado después de la primera hora de marcha, antes de volver a arrancar es necesario controlar que el tubo de aceite no esté obstruido con basuras o una bolsa de aire y que el nivel del aceite sea correcto.

i. Con una eficiente mantención, el grupo de los ventiladores dará amplia satisfacción al cliente. Lógicamente siempre que la puesta en marcha inicial y los controles regulares sean en observancia con el presente manual de funcionamiento y mantención.

4. Para parar la torre es necesario:

a) Desconectar en primer lugar los motores y consecuentemente los reductores y ventiladores.

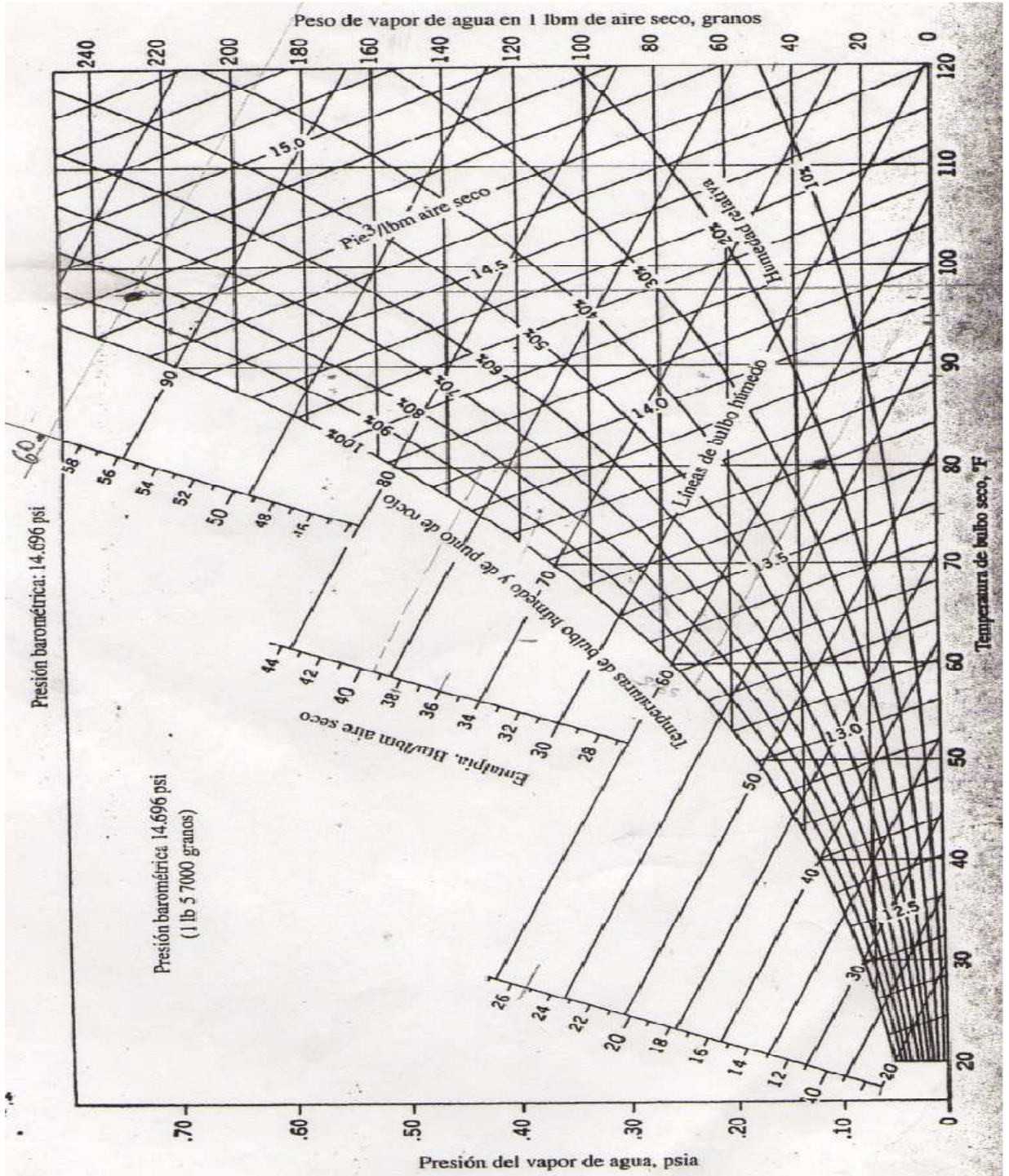
b) Cerrar la válvula principal de entrada del agua caliente.

**Nota General:**

Una vez parados los motores, no deben ser reactivados inmediatamente.

# ANEXO X

## CARTA PSICOMÉTRICA



## ANEXO XI

### ESPECIFICACIONES DE LOS FILTROS DE ARENA Y-ME 3007 A/B/C

|                                         |                                  |
|-----------------------------------------|----------------------------------|
| <b>Manufacturado por</b>                | <b>CHARBOCK AND COMPANY LTD.</b> |
| Tipo                                    | A presión                        |
| Capacidad                               | 205 m <sup>3</sup> /h            |
| Presión de Diseño                       | 11 Kg                            |
| Temperatura de diseño                   | 66°C                             |
| Altura                                  | 1.9 m                            |
| Peso con agua                           | 26647 Kg                         |
| Peso neto                               | 6763 Kg                          |
| Diámetro                                | 3 m                              |
| Sólidos suspendidos en el agua efluente | 2 mg/L                           |
| Sólidos suspendidos en el agua afluente | Máximo 40 mg/L                   |

FUENTE: Manual de Torres de Enfriamiento REE



## ANEXO XII

### ESPECIFICACIONES DE LOS REDUCTORES DE VELOCIDAD DE LOS VENTILADORES.

|                       |                    |
|-----------------------|--------------------|
| Tipo                  | Espiralado sesgado |
| Modelo                | ND24S              |
| Cantidad en total     | 5                  |
| Cantidad por celda    | 1                  |
| Razón de reducción    | 1200/190.7         |
| Número de reducciones | 2                  |

FUENTE: Manual de Torres de Enfriamiento REE

## ANEXO XIII

### ESPECIFICACIONES DE LAS BOMBAS

|                       |                               |
|-----------------------|-------------------------------|
| Tipo de bomba         | Vertical                      |
| Sustancia que bombea  | Agua a 95 °F                  |
| Capacidad             | 5042 m <sup>3</sup> /h        |
| Capacidad normal      | 4180 m <sup>3</sup> /h        |
| Presión a la descarga | 6.37 Kg/cm <sup>2</sup>       |
| Presión a la succión  | 1.27 Kg/cm <sup>2</sup>       |
| Velocidad             | 890                           |
| Eficiencia            | 83%                           |
| Conductor             | Motor eléctrico 75 Kw (91 HP) |
| Peso                  | 4900 Kg                       |

FUENTE: Manual de Torres de Enfriamiento REE

## ANEXO XIV

### DATOS DE LA BASE DE DISEÑO DE LA TORRE Y-ME3003B

| <b>AGUA DE ENFRIAMIENTO</b>                                     |        |       |
|-----------------------------------------------------------------|--------|-------|
| Temperatura del agua que ingresa a la torre                     | Te     | 42 °C |
| Temperatura de salida del agua de la torre                      | Ts     | 29 °C |
| <b>AGUA DE ENFRIAMIENTO</b>                                     |        |       |
| Diferencia de Temperatura                                       | Te -Ts | 13 °C |
| <b>CAUDAL DE RECIRCULACIÓN</b>                                  |        |       |
| Altura de la base de la pileta hasta la cubierta del ventilador |        | 9.5 m |
| Altura total de la torre                                        |        | 12 m  |
| Cantidad de ventiladores por celda                              |        | 1     |

FUENTE: Manual de Torres de Enfriamiento REE

## ANEXO XV

### PARÁMETROS PARA EL AGUA DE RECIRCULACIÓN

| Análisis          | Recirculación | Parámetros de control | Unidades              | Frecuencia de análisis |
|-------------------|---------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| pH                | 7.89          | 7.2-8.2               |                       | 2 veces/día            |
| Conductividad     | 398           |                       | Umhos/cm              | 1 vez/día              |
| TDS               | 309           | Máx. 550              | ppm                   | 1 vez/día              |
| Dureza total      | 106           | Máx.400               | ppm CaCO <sub>3</sub> | 1 vez/día              |
| Alcalinidad total | 14            | Mín. 20               | ppm CaCO <sub>3</sub> | 1 vez/día              |
| Fosfato total     | 3.98          | 3.0-5.0               | ppm                   | 1 vez/día              |
| Cinc total        | 1.98          | 2.0-5.0               | ppm                   | 1 vez/día              |
| Cloro residual    | 0.3           | 2.0-0.5               |                       | 1 vez/día              |
| Hierro total      | 0.26          | 0.67                  |                       | 2 veces/día            |
| Sílice            | 59            | Máx. 125              | ppm                   | 1 vez/día              |
| Turbidez          | 14            |                       | NTU                   | 1 vez/día              |

FUENTE: CONCAL

## ANEXO XVI

### ANÁLISIS DEL AGUA DE REPOSICIÓN

| <b>Análisis</b> | <b>Unidades</b> | <b>Reposición</b> |
|-----------------|-----------------|-------------------|
| pH              | A               | 6,43              |
| Conductividad   | Umhos/cm        | 103               |
| Fosfatos        | Ppm             | 0.09              |
| Dureza total    | Ppm             | 32                |
| Cloro residual  | Ppm             | 0.4               |
| Alcalinidad     | Ppm             | 13                |
| Hierro total    | Ppm             | 0.11              |
| Sílice          | Ppm             | 14                |
| Turbidez        | NTU             | 1.3               |

FUENTE: Utilidades.

## ANEXO XVII

### COTIZACIÓN DE UN MOTOR PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA TORRE

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>WEG Industrias S.A.</b>           | Nr.: 99764/2010                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |       |                |                 |      |      |      |     |      |      |     |      |      |  |            |                       |           |         |     |         |         |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------------|-----------------|------|------|------|-----|------|------|-----|------|------|--|------------|-----------------------|-----------|---------|-----|---------|---------|-----|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                      | Fecha: 3-FEB-2010                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |       |                |                 |      |      |      |     |      |      |     |      |      |  |            |                       |           |         |     |         |         |     |
| <b>MARCA AMARILLO</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |       |                |                 |      |      |      |     |      |      |     |      |      |  |            |                       |           |         |     |         |         |     |
| <b>MOTORES TRIFASICOS DE INDUCCION<br/>JAULA DE ARDILLA</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |       |                |                 |      |      |      |     |      |      |     |      |      |  |            |                       |           |         |     |         |         |     |
| Cliente                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | :                                    | REE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |       |                |                 |      |      |      |     |      |      |     |      |      |  |            |                       |           |         |     |         |         |     |
| Línea del producto                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | :                                    | Alta eficiencia                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |       |                |                 |      |      |      |     |      |      |     |      |      |  |            |                       |           |         |     |         |         |     |
| Potencia                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | :                                    | 130 HP                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |       |                |                 |      |      |      |     |      |      |     |      |      |  |            |                       |           |         |     |         |         |     |
| Resbalamiento : 1.11 %<br>Tensión nominal : 220/380/440V<br>Corriente nominal : 292/169/146 A<br>Corriente de arranque : 2102/1217/1051 A<br>Ip/In : 7.2<br>Corriente en vacío : 102.1/59.04/51.05 A<br>Torque nominal : 482 Nm<br>Torque de arranque : 210 %<br>Torque máximo : 260 %<br>Categoría : N<br>Clase de aislamiento : F<br>Elevación de temperatura : 80 K<br>Tiempo de rotor bloqueado : 20 s<br>Factor de servicio : 1.15<br>Régimen de servicio : S1<br>Temperatura ambiente : 40°C<br>Altitud : 1000 m | Nivel de Presión Sonora : 73.0 dB(A) | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">Carga</th> <th style="width: 30%;">Fact. potencia</th> <th style="width: 40%;">Rendimiento (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100%</td> <td>0.85</td> <td>94.6</td> </tr> <tr> <td>75%</td> <td>0.82</td> <td>94.5</td> </tr> <tr> <td>50%</td> <td>0.73</td> <td>94.0</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;"></th> <th style="width: 30%;">Rodamiento</th> <th style="width: 40%;">Cantidad (lubricante)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Delantero</td> <td>6316-C3</td> <td>34g</td> </tr> <tr> <td>Trasero</td> <td>6316-C3</td> <td>34g</td> </tr> </tbody> </table> <p>Intervalo de lubricación: 8568h</p> | Carga | Fact. potencia | Rendimiento (%) | 100% | 0.85 | 94.6 | 75% | 0.82 | 94.5 | 50% | 0.73 | 94.0 |  | Rodamiento | Cantidad (lubricante) | Delantero | 6316-C3 | 34g | Trasero | 6316-C3 | 34g |
| Carga                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Fact. potencia                       | Rendimiento (%)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |       |                |                 |      |      |      |     |      |      |     |      |      |  |            |                       |           |         |     |         |         |     |
| 100%                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 0.85                                 | 94.6                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |                |                 |      |      |      |     |      |      |     |      |      |  |            |                       |           |         |     |         |         |     |
| 75%                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 0.82                                 | 94.5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |                |                 |      |      |      |     |      |      |     |      |      |  |            |                       |           |         |     |         |         |     |
| 50%                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 0.73                                 | 94.0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |       |                |                 |      |      |      |     |      |      |     |      |      |  |            |                       |           |         |     |         |         |     |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Rodamiento                           | Cantidad (lubricante)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |       |                |                 |      |      |      |     |      |      |     |      |      |  |            |                       |           |         |     |         |         |     |
| Delantero                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 6316-C3                              | 34g                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |       |                |                 |      |      |      |     |      |      |     |      |      |  |            |                       |           |         |     |         |         |     |
| Trasero                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 6316-C3                              | 34g                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |       |                |                 |      |      |      |     |      |      |     |      |      |  |            |                       |           |         |     |         |         |     |

## ANEXO XVIII

### DATOS DE TENSIONES DE VAPOR, HUMEDADES Y ENTALPÍAS DE SATURACIÓN PARA DIFERENTES TEMPERATURAS A 1 atm de P

$t$ , °C, temperatura del aire;  $p_s$ , mm Hg, presión de saturación del vapor de agua;  $Y_s$ , Kg agua/Kg aire, humedad absoluta del aire saturado con agua;  $i_s$ , Kcal/Kg, entalpía del aire saturado con vapor de agua)

| $t$ | $p_s$ | $10^3 Y_s$ | $i_s$ | $t$ | $p_s$ | $10^3 Y_s$ | $i_s$ |
|-----|-------|------------|-------|-----|-------|------------|-------|
| 0   | 4.58  | 3.78       | 2.25  | 35  | 42.18 | 36.6       | 30.8  |
| 1   | 4.93  | 4.07       | 2.66  | 36  | 44.56 | 38.8       | 32.4  |
| 2   | 5.29  | 4.37       | 3.08  | 37  | 47.07 | 41.1       | 34.0  |
| 3   | 5.69  | 4.70       | 3.52  | 38  | 49.69 | 43.5       | 35.7  |
| 4   | 6.10  | 5.03       | 3.96  | 39  | 52.44 | 46.0       | 37.6  |
| 5   | 6.54  | 5.40       | 4.42  | 40  | 55.32 | 48.8       | 39.6  |
| 6   | 7.01  | 5.79       | 4.90  | 41  | 58.34 | 51.7       | 41.6  |
| 7   | 7.51  | 6.21       | 5.40  | 42  | 61.50 | 54.8       | 43.7  |
| 8   | 8.05  | 6.65       | 5.90  | 43  | 64.80 | 58.0       | 45.9  |
| 9   | 8.61  | 7.13       | 6.43  | 44  | 68.26 | 61.3       | 48.3  |
| 10  | 9.21  | 7.63       | 6.97  | 45  | 71.88 | 65.0       | 50.8  |
| 11  | 9.84  | 8.15       | 7.53  | 46  | 75.65 | 68.9       | 53.4  |
| 12  | 10.52 | 8.75       | 8.14  | 47  | 79.60 | 72.8       | 56.2  |
| 13  | 11.23 | 9.35       | 8.74  | 48  | 83.71 | 77.0       | 59.0  |
| 14  | 11.99 | 9.97       | 9.36  | 49  | 88.02 | 81.5       | 62.1  |
| 15  | 12.79 | 10.6       | 9.98  | 50  | 92.51 | 86.2       | 65.3  |
| 16  | 13.63 | 11.4       | 10.7  | 51  | 97.20 | 91.3       | 68.6  |
| 17  | 14.53 | 12.1       | 11.4  | 52  | 102.1 | 96.6       | 72.3  |
| 18  | 15.48 | 12.9       | 12.1  | 53  | 107.2 | 102        | 75.9  |
| 19  | 16.48 | 13.8       | 12.9  | 54  | 112.5 | 108        | 80.0  |
| 20  | 17.53 | 14.7       | 13.8  | 55  | 118.0 | 114        | 84.1  |
| 21  | 18.65 | 15.6       | 14.6  | 56  | 123.8 | 121        | 88.6  |
| 22  | 19.83 | 16.6       | 15.3  | 57  | 129.8 | 128        | 93.2  |
| 23  | 21.07 | 17.7       | 16.2  | 58  | 136.1 | 136        | 98.5  |
| 24  | 22.38 | 18.8       | 17.2  | 59  | 142.6 | 144        | 104   |
| 25  | 23.76 | 20.0       | 18.1  | 60  | 149.4 | 152        | 109   |
| 26  | 25.21 | 21.4       | 19.2  | 61  | 156.4 | 161        | 115   |
| 27  | 26.74 | 22.6       | 20.2  | 62  | 163.8 | 171        | 121   |
| 28  | 28.35 | 24.0       | 21.3  | 63  | 171.4 | 181        | 128   |
| 29  | 30.04 | 25.6       | 22.5  | 64  | 179.3 | 192        | 135   |
| 30  | 31.82 | 27.2       | 23.8  | 65  | 187.5 | 204        | 143   |
| 31  | 33.70 | 28.8       | 25.0  | 66  | 196.1 | 216        | 151   |
| 32  | 35.66 | 30.6       | 26.3  | 67  | 205.0 | 230        | 160   |
| 33  | 37.73 | 32.5       | 27.7  | 68  | 214.2 | 244        | 169   |
| 34  | 39.90 | 34.4       | 29.2  | 69  | 223.7 | 259        | 179   |