

**UNIVERSIDAD DEL BÍO - BÍO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL**



**“ESTUDIO TERMODINAMICO PARA EL  
ABATIMIENTO DEL PENACHO DE LA TORRE DE  
ENFRIAMIENTO DE PETROPOWER S.A.”**

Informe de Proyecto de Título  
presentado en conformidad con los  
requisitos para obtener el título de:  
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL  
Mención Mecánica.

*Profesor Guía:*

Ing. Sr. Vicente Pita Vives

*Ingeniero Asesor:*

Sr. Oscar Hidalgo Díaz.

Gerente de Mantención.

Foster Wheeler Talcahuano Ltda.

**RENE F. VILLAGRAN HERMOSILLA**

CONCEPCION – CHILE

JULIO 2007

## **DEDICATORIA**

La gloria de Dios es la inteligencia, en otras palabras luz y verdad..

...Y si en esta vida una persona adquiere mas conocimiento e inteligencia que otra, por medio de su diligencia y obediencia, hasta ese grado le llevara la ventaja en el mundo venidero..

Gracias a Dios, por toda su ayuda.....

Dedico este Proyecto de Título...

... A mi Padre, Santiago

... A mi Madre, Felicia

... A mi Hermano, Santiago

...Y a Priscilla, mi amor.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco el apoyo otorgado por mis Profesores del departamento de Ingeniería Mecánica, de mi Universidad:

Sr Victor Durán Saéz.

Sr Luis San Juan

Sepúlveda.

En forma especial agradezco a mi Profesor Guía Sr Vicente Pita Vives.

Agradezco a la Empresa **Foster Wheeler Thno Ltda.**, a su Gerente de Mantenición Sr Oscar Hidalgo Diaz, al Supervisor de Mantenición Sr. Marco Aguilera y al personal de planta: por los conocimientos, el valioso tiempo entregados, y sobre todo, su gran calidad como personas.

## INDICE

<b>CAPITULO I</b>	<b>INTRODUCCIÓN.</b>	6
<b>CAPITULO II</b>	<b>ANTECEDENTES DE LA EMPRESA.</b>	8
<b>CAPITULO III</b>	<b>ORIGEN DEL TEMA.</b>	10
<b>CAPITULO IV</b>	<b>OBJETIVOS.</b>	11
4.1-	Objetivo General.	11
4.2-	Objetivos Específicos.	11
<b>CAPITULO V</b>	<b>RECONOCIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DEL COMPLEJO ENERGÉTICO PETROPOWER ENERGÍA LTDA.</b>	12
5.1-	Unidad de Coquización Retardada.	12
5.2-	Unidad de Hidrotratamiento.	13
5.3-	Unidad de Cogeneración.	14
5.3.1-	Caldera.	15
5.3.2-	Turbogenerador.	16
5.3.3-	Condensador.	18
5.3.4-	Torre de Enfriamiento.	19
5.3.5-	Bomba.	20
5.3.6-	Planta de tratamiento de Agua.	21
5.3.7-	Productos de la Unidad de Cogeneración.	23
5.3.8-	Distribución de la Energía Eléctrica entre los distintos Consumidores (MWH).	23
<b>CAPITULO VI</b>	<b>CLASIFICACIÓN DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO.</b>	24
6.1-	Torre de Circulación Natural.	25
6.2-	Torre de Tipo Mecánico.	26
6.2.1-	Torre de Tiro Inducido.	26
6.2.2-	Torre de Tiro Forzado.	29
<b>CAPITULO VII</b>	<b>COMPONENTES PRINCIPALES DEL SISTEMA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO.</b>	30
7.1-	Función.	30
7.2-	Descripción del Sistema de Agua Enfriamiento.	30
7.2.1-	Información de Diseño de la Torre.	31
7.2.1.1-	Estructura	32
7.2.1.2-	Tuberías de Distribución	33
7.2.1.3-	Relleno.	34
7.2.1.4-	Eliminadores de Neblina.	35
7.2.1.5-	Sistema de Admisión del Aire.	36
7.2.1.6-	Equipo Móvil.	36
7.2.1.7-	Estanque de Almacenamiento del Agua.	38
7.2.1.8-	Agua de Reposición	39
7.2.2-	Bombas de Agua de Enfriamiento.	39
7.2.3-	Sistema de Tratamiento de Agua de Enfriamiento.	40
7.2.4 -	Calidad del Agua de Enfriamiento	41
<b>CAPITULO VIII</b>	<b>GENERALIDADES Y PRINCIPIOS TEORICOS.</b>	44
8.1-	Definiciones Generales.	44
8.2-	Carta Psicrométrica.	47
8.3-	Transferencia de Calor y de Masa por Difusión.	49
8.4-	Teoría de las Torres de Enfriamiento.	51
8.4.1-	Definiciones	51
8.4.2-	Transferencia de Calor en las Torres de Enfriamiento.	52
8.4.3-	Evaporación en las Torres de Enfriamiento.	53
8.4.4-	Diagrama de Operación de una Torre de Enfriamiento.	53

<b>CAPITULO IX VERIFICACION OPERACIONAL DE LA TORRE.</b>	55
9.1- Hipótesis y Condiciones de Cálculo.	55
9.2- Modelo Termodinámico de la Torre de Enfriamiento.	56
9.3- Mediciones.	57
9.4- Balances de Energía.	58
9.5- Balances de Masa.	59
9.5.1- Caudales de Agua.	59
9.5.2- Masa de Aire que Circula por la Torre.	61
9.6- Cálculos.	62
9.7- Cálculos en el Diagrama de Operación de una Torre de Enfriamiento.	65
9.8- Resultados.	67
9.8.1- Capacidad o Carga Térmica del Equipo.	67
9.8.2- Rendimiento del Equipo.	67
9.9- Comentarios.	69
<b>CAPITULO X MODIFICACION Y CALCULOS ESTIMATIVOS DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DEL COMPLEJO ENERGETICO PETROPOWER Energía Ltda.</b>	72
10.1- Descripción del Proyecto de Reforma	72
10.2- Desmontaje No Destructivo	74
10.3- Montaje	76
10.4- Evaluación Teórica del Comportamiento Sicrométrico, de la Reforma a la Torre de Enfriamiento de Petropower S.A.	81
<b>CAPITULO XI VALORACION DE TRABAJOS PARA LA REFORMA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.</b>	93
11.1- Presupuesto de Esindus S.A.	93
11.2-. Oferta Económica de Proyecmetal Ltda.	93
11.3- Tablas	94
11.4- Gráficos.	96
<b>CONCLUSIÓN.</b>	97
<b>BIBLIOGRAFÍA.</b>	98
<b>ANEXOS.</b>	100
ANEXO 1. Cálculo de Incremento de Potencia, por Ventilador de la Torre.	100
ANEXO 2. Plano de la Torre en Estudio.	107
ANEXO 3. Plano de Reforma a Torres Similares.	110

## **CAPITULO I INTRODUCCION.**

En nuestro planeta, el agua ha sido uno de los elementos básicos y ha estado dispuesta para el uso como una fuente casi inagotable, para el desarrollo de la vida. A pesar de su abundancia, se debe optimizar su uso y consumo.

Hoy en día y frente a los efectos climáticos, como son las sequías y los efectos que provocan la contaminación y el abuso del recurso, se han limitado de manera alarmante las fuentes de agua. Por estas razones, el hombre ha tenido que recurrir a la reutilización del agua para optimizar así los servicios que otorga este valioso recurso.

Muchos de los procesos que requieren el uso del agua, implican el calentamiento de ésta, por eso se han diseñado constantemente procesos que disminuyan la temperatura del agua, para lograr así su reutilización.

Las Torres de Enfriamiento se han utilizado ampliamente para rechazar al ambiente el calor proveniente de los procesos industriales, mediante la transferencia de calor y materia al aire que circula por el interior de la torre, en vez de hacerlo a través del agua de un río, un lago o un océano.

El Complejo Energético PETROPOWER Energía Ltda., posee una Torre de Enfriamiento de tipo contra-corriente y de tiro inducido. En la cual se forma una fuerte corriente interior ascendente de aire frío, que se encuentra con el agua del sistema de enfriamiento del condensador, la que se hace descender en forma de ducha por el interior de las torre. El **Penacho** se forma cuando el vapor de agua presente en el aire caliente, que sale de la torre, condensa al entrar en contacto con el aire ambiente más frío.

En este estudio, a partir de los principios básicos de transferencia de calor y materia, en conjunto con los balances de masa y energía, se plantean ecuaciones que permiten evaluar sus condiciones actuales de operación. Efectuando mediciones en terreno de temperatura del aire, del agua y velocidad del aire, se determina la capacidad de enfriamiento de la torre y los restantes parámetros de operación actual.

Se reformará la Torre de Enfriamiento para reducir el impacto visual del penacho existente. La reforma está presupuestada, en principio, para fines de año

2007. Consiste en introducir en las caras de entrada de la torre, en la parte superior de ésta, intercambiadores secos y mezcladores de aire, aumentando la altura de la plataforma. De esta forma, una parte del aire ambiente entrando en la torre se calentará sin humidificarse. La mezcla de este aire seco y del aire húmedo, encima de los separadores de gotas, permitirá eliminar el penacho en la salida de la torre. Sin embargo esta reforma impactará reduciendo el rendimiento de la torre.

Se hará una descripción del proyecto de reforma de la torre, se evaluará termodinámicamente la reforma propuesta y se identificará las etapas y procesos para implementar la reforma, con los respectivos costos.

Para realizar los cálculos termodinámico, tanto para la situación actual de la torre como para la reforma de ésta, se utilizará el software E.E.S (Engineering Equation Solver, que traducido es Solucionador de Ecuaciones de Ingeniería)

## CAPITULO II ANTECEDENTES DE LA EMPRESA.

PETROPOWER Energía Ltda. (Fig. N° 2.1).



Fig. N° 2.1 PETROPOWER Energía Ltda.

El 15 de febrero de 1996, se dio inicio a la construcción del **Complejo Energético PETROPOWER Energía Ltda.**, proyecto considerado único en su tipo al convertirse en la primera sociedad privada ligada a una empresa pública de nuestro país y el primer proyecto que combina una tecnología de coke y una de cogeneración mediante un solo financiamiento.

La empresa **PETROPOWER Energía Ltda.**, es una sociedad conformada por **FOSTER WHEELER POWER SYSTEM** (85%), y **ENAP Refinerías** (15%). Fue creada para llevar adelante una idea equivalente a tres proyectos en uno, ya que cuenta con igual número de unidades; una de **Coquificación Retardada**, otra de **Hidrotratamiento** y una tercera de **Cogeneración**.

Fue reconocido como uno de los más ambiciosos proyectos industriales llevados a cabo en nuestro país, catalogado en Estados Unidos como “El negocio



del año 1996”, Un proyecto único en su tipo para este continente, al unir una tecnología de Coquificación con otra de Cogeneración.

Con una inversión cercana a los 240 millones de dólares, que fue asumida en mayor parte por FOSTER WHEELER que fue responsable del desarrollo de la ingeniería, construcción, puesta en marcha y explotación de la cogeneradora, mientras que ENAP asumió el riesgo país (políticas estatales y representación frente a las autoridades), y la operación de las unidades de Hidrotratamiento y Coquización.

La principal materia prima de ENAP Refinerías, es el petróleo crudo, liviano y pesado. Los crudos livianos tienen un bajo contenido de azufre y de ellos se obtienen una mayor proporción de productos livianos (gasolina y diesel) y son más caros. Los crudos pesados tienen más azufre y se obtienen de ellos productos más densos (pitch asfáltico), pero también son más baratos. ENAP, podría procesar crudos más pesados, y convertir aquellos fondos de vacío (pitch asfáltico), en productos más nobles y con mayor valor de mercado, como son el diesel sin azufre, la electricidad, el vapor de alta presión y también las gasolinas sin plomo, mejorando por tanto los índices económicos de la refinación.

Separada de hecho en tres partes, Hidrotratamiento, Coquización y Cogeneración, permitió a la refinería aumentar la compra de petróleos pesados (más baratos), desde un 16,7% (adquisiciones 1996), hasta un 28% (Unidad de Hidrocracking) y hasta un 40% (Unidad de Coquización Retardada), bajando los costos de refinación. Esto involucró mejorar no sólo la flexibilidad del procesamiento y la economía de la refinería, sino lo que es igualmente importante, mejorar el efecto sobre el medio ambiente al generar productos más limpios.

Entre las cualidades del Proyecto, se puede mencionar: su alta tecnología, alto rendimiento en la combustión, alta seguridad en operación, alta seguridad en despacho de potencia y bajo costo marginal de generación.

El 15 de junio de 1998, se dio fin a la construcción del Complejo y se dio paso al proceso de puesta en marcha de las dos primeras unidades de PETROPOWER: la de Coquización Retardada y la de Hidrotratamiento, la planta de Cogeneración inició sus operaciones en el mes de agosto del mismo año.

### **CAPITULO III ORIGEN DEL TEMA.**



Es una solicitud del Sr. Oscar Hidalgo Díaz, Gerente de Mantenimiento de FOSTER WHEELER Talcahuano Ltda., para desarrollar un “**Estudio Termodinámico para el Abatimiento del Penacho de la Torre de Enfriamiento de PETROPOWER S.A.**”.

Este estudio está orientado a una Torre de Enfriamiento, que es de tipo mecánico, de tiro inducido y a contraflujo.

**Foster Wheeler Iberia S.A.** ha solicitado los servicios de **Esindus S.A.** para reformar la torre de enfriamiento y reducir el impacto visual del **Penacho** existente (Fig. N° 3.1). Esta es una decisión estratégica, considerando la cercanía con la comunidad, el efecto del penacho acarrea expectativas inconvenientes para la empresa que pueden ser perjudiciales para proyectos futuros, por lo que es necesario resolver el problema en el corto plazo. Y en el ámbito económico, se generan perjuicios para la empresa. (Daños a sensores y otros dispositivos).



Fig. N° 3.1 Penacho de la Torre de Enfriamiento.

## **CAPITULO IV OBJETIVOS.**

### **4.1- OBJETIVO GENERAL.**

- Estudio termodinámico para el abatimiento del penacho de la torre de enfriamiento de PETROPOWER S.A.

### **4.2- OBJETIVOS ESPECIFICOS.**

- Evaluar termodinámicamente el comportamiento de la torre de enfriamiento, en las condiciones actuales.
- Evaluar termodinámicamente la reforma propuesta a la torre de enfriamiento, para el abatimiento del penacho.
- Identificar etapas y procesos necesarios para implementar la reforma Propuesta, con los costos asociados.

## **CAPITULO V RECONOCIMIENTO Y DESCRIPCION DEL COMPLEJO ENERGÉTICO PETROPOWER ENERGÍA LTDA.**

### **5.1- UNIDAD DE COQUIZACION RETARDADA:**

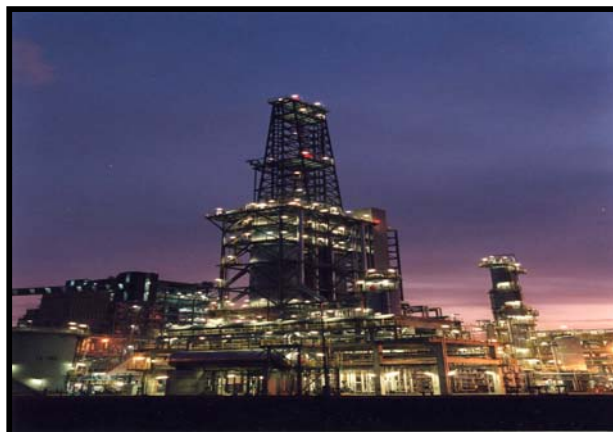


Fig. Nº 5.1 Planta de Coquización Retardada.

La palabra Petcoke es un apócope de la expresión inglesa “Petroleum Coke”, que traducida al castellano es Carbón de Petróleo (Petcoque o Coque). Es una sustancia que tiene las características esenciales del carbón, pero que se obtiene como un derivado del petróleo, por lo que está compuesto principalmente de carbono e hidrocarburos (compuestos de carbono e hidrógeno). Es un combustible sólido, negro, poroso, de un aspecto similar al de algunos carbones fósiles.

Su combustión genera óxidos de carbono y azufre, en tanto que, la combustión incompleta produce monóxido de carbono.

La principal unidad del proceso, es decir, la Unidad de *Coquización Retardada* (Fig. Nº 5.1), desarrolla un proceso de transformación de los pitch provenientes de las torres de destilación a fracciones de destilado livianas y Petcoke. Las fracciones livianas destiladas después de pasos de procesos posteriores se convierten en productos finales de refinación como ser gasolinas, kerosenes, diesel y gases licuados de proceso. Esto permite refinar crudos pesados más baratos y transformarlos en productos de alto valor.

La capacidad de diseño para la unidad es de 12.000 bpsd. El horno de la Coquizadora fue diseñado para calentar los fondos de vacío de ENAP provenientes de Venezuela, de unos 300 a 500 °C con una eficiencia del 92%.

La materia prima (pitch) es calentada a temperatura de craking de 480 °C y mantenida a esta temperatura en enormes tambores de precipitación de coke. Los productos livianos o volátiles salen por la parte superior de estos reactores en forma de vapor y posteriormente enfriados y fraccionados en torres de destilación. El coke se deposita en las paredes interiores de los tambores hasta que estos se llenan totalmente y están listos para su descarga.

La Unidad de Coker cuenta con dos tambores precipitación de coke, cada uno de ellos operando continuamente en ciclos opuestos de 18 a 24 horas seguido por ciclos de descarga de 4 horas. La capacidad de producción de la unidad es de 600 a 650 ton/día de coke verde y este combustible sólido es enviado para ser usado como combustible a la Unidad de Cogeneración.

bpsd: barrels per stream day, es decir, Flujo de barriles por día.

## **5.2- UNIDAD DE HIDROTRATAMIENTO.**

Las fracciones destiladas producidas en la unidad de Coker requieren procesos de Hidrotratamiento para la extracción del azufre y su transformación en productos más refinados. Este proceso se realiza en la Unidad de Hidrotratamiento de capacidad de 7.014 bpsd en la cual, todo el contenido de azufre es extraído.

El destilado del coke que es procesado en esta unidad incluye 1.919 bpsd de naftas y 4.905 de gas oil, además se procesan 1.000 bpsd de diesel provenientes desde la Unidad de Visbreaker de ENAP. El hidrógeno de recuperación proviene de la Unidad de Hidrotratamiento de la misma refinería.

El Hidrotratamiento tiene lugar a alta presión y temperatura en un catalizador y en presencia de hidrógeno. Los sulfuros orgánicos presentes en los destilados se transforman en ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) el cual puede ser fácilmente extraído de las corrientes de hidrocarburos. Normalmente entre el 80% y 95% del azufre contenido en los flujos de hidrocarburos alimentados a la Unidad de Hidrotratamiento es eliminado en este proceso. Los productos del Hidrotratamiento son dos fracciones destiladas de alta calidad: naftas hidrotratadas y diesel hidrotratado.

### 5.3- UNIDAD DE COGENERACION.

A modo general, la Unidad Cogeneradora produce vapor de alta presión y electricidad. Consta de: una Caldera, una Turbina, un Generador, un Condensador, Bombas, un Sistema de Molienda y Manejo del Coke, una Planta de Molienda de Caliza, una Planta de Precalentamiento Regenerativo, un Sistema de Extracción de Incondensables, un Sistema de Agua de Alimentación y una Torre de Enfriamiento.

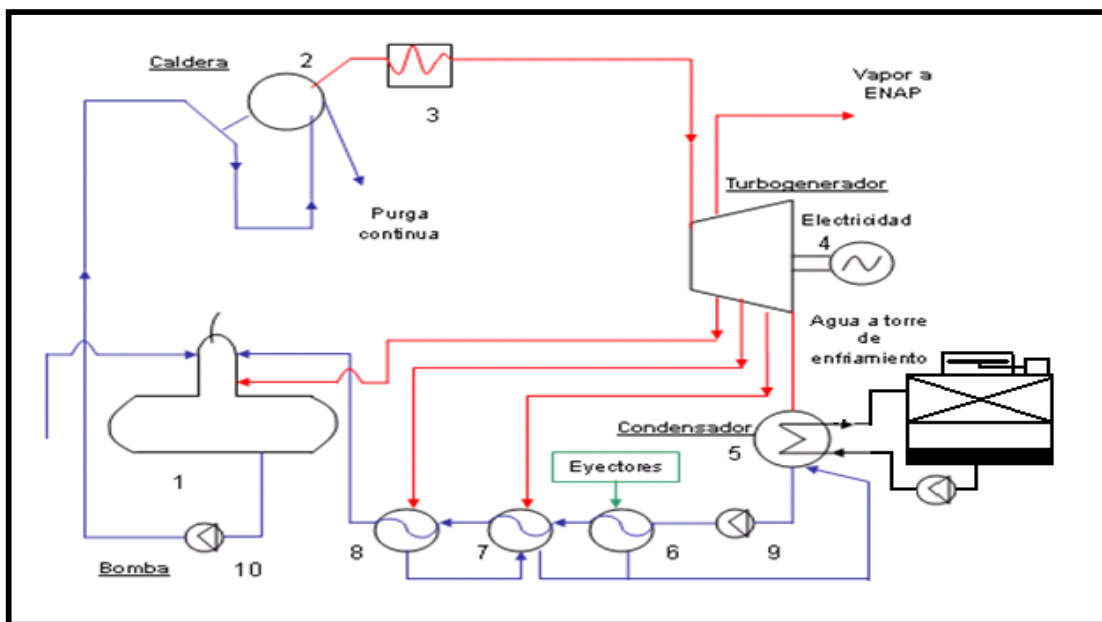


Fig. N° 5.2 Circuito de vapor y condensado.

— Línea correspondiente a vapor. — Línea correspondiente al líquido.

1. Desaireador y estanque de agua de alimentación.
2. Domo o Colector superior.
3. Sobrecalentador.
4. Turbina.
5. Condensador
6. Estanque de condensación para eyectores del condensador y sellos de la turbina.
7. Precalentador del agua de condensación 1.
8. Precalentador del agua de condensación 2.
9. Bomba de compresión de condensado.
10. Bomba de agua de alimentación a la caldera.

### **5.3.1- CALDERA:**

La planta de Cogeneración cuenta con la última tecnología en Calderas, de tipo de lecho fluidizado Circulante (CFB: Circulating Fluidized Bed), que tiene una eficiencia del 92,6%, y cuya principal característica es la excelente mezcla en la combustión, con el consiguiente alto rendimiento en este ámbito. Junto a esto como característica importante, esta caldera cuenta con una alta captación del azufre presente en el coke la cual es del 95%, situación que contribuye a la protección del ambiente y de equipos terminales de la caldera. Está diseñada para permitir la generación de 66,5 MW neto de energía eléctrica y 26 ton/h de vapor de alta presión, cuando se queman 24,8 ton/h de Coke.

La tecnología CFB tiene una combustión amigable para el medio ambiente. El combustible ocupado en esta caldera es el coke, destacándose por su bajo costo de adquisición y su aceptable poder calorífico (7500-7899 (kcal/kg)). Junto a este combustible, a la caldera se le inyecta caliza y arena de alto punto de fusión. La caliza tiene como función captar el azufre presente en el coke y controlar las emisiones de anhídrido sulfuroso y la arena tiene la función de fluidizar el lecho y proporcionar la temperatura suficiente en el hogar para que se logre la combustión del coke, siendo ésta superior a los 905 °C.

Al gas de combustión se le extraen las cenizas volátiles mediante filtros de mangas, de tal manera que éstas se recuperan como sólidos. Está diseñada para una producción máxima de 272 ton/h de vapor a una presión 107kg/cm<sup>2</sup> a 540 °C.

Como primera superficie de transferencia de calor se tiene el hogar, el cual es refrigerado por tubos que bajan del domo, posteriormente tenemos el ciclón, donde las partículas mas pesadas que no se han quemado completamente bajan a la válvula J, encargada de enviarlas de nuevo al hogar para que sean quemadas completamente, después vienen los sobrecalentadores, economizador y precalentador de aire primario.

Esta caldera posee dos sistemas de captación y evacuación de material particulado. Un sistema se encuentra ubicado debajo del lecho y evacúa el material de mayor tamaño de éste (*streepper cooler*), enviándolo al silo de cenizas, ubicado después de la chimenea y mantiene de esta manera un nivel

controlado del lecho. El otro sistema de captación de ceniza ubicado antes del ventilador de tiro inducido, es un filtro de mangas (*baghouse*), éste capta las cenizas o partículas que se puedan encontrar en los gases de salida, para que no sean evacuadas al ambiente. Este sistema descarga las cenizas al mismo silo mencionado anteriormente.



Fig. N° 5.3

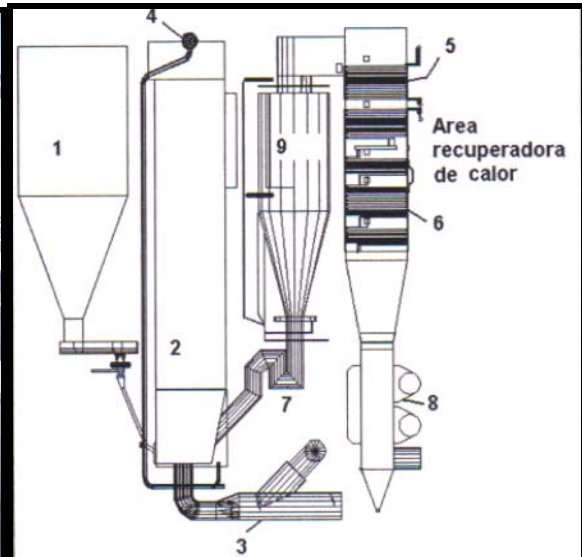


Fig. N° 5.4

La Caldera de lecho fluidizado y sus principales componentes. Fig. N° 5.3 y N° 5.4

- |                               |                            |
|-------------------------------|----------------------------|
| 1- Silos de coque y caliza    | 6- Economizador            |
| 2- Hogar (Zona de combustión) | 7- Válvula Jota            |
| 3- Conductos de aire primario | 8- Precalentadores de aire |
| 4- Domo o Colector superior   | 9- Ciclón.                 |
| 5- Sobrecalentadores          |                            |

### 5.3.2- TURBOGENERADOR:

La unidad Turbo-generador fue construida por GENERAL ELECTRIC, y se encuentra constituida por una Turbina a vapor de flujo axial y un Generador sincrónico.

#### a) TURBINA:

El vapor generado por la caldera es enviado hacia la entrada principal de la Turbina, pudiendo tener una generación máxima de potencia al eje de 75 MW., de donde se extrae a diferentes presiones, dependiendo de los requerimientos de los procesos productivos de la planta. Uno de ellos, el principal, es entregar energía



cinética, para mover los álabes, los cuales producen la rotación del generador principal. Esta turbina posee 16 etapas con descarga axial al condensador y el rotor de la turbina está acoplada directamente al generador en el lado de alta presión, por medio de una unión rígida.

La admisión del vapor a la turbina es a través de un filtro ubicado dentro de la válvula de cierre rápido, luego pasa por válvulas de control (válvulas de gobierno) y luego a la caja de toberas de la primera etapa. El vapor se expande en las sucesivas etapas de la turbina, desde la presión inicial hasta la presión final de descarga al condensador.

Esta turbina tiene 4 extracciones siendo la principal demanda de estas extracciones, las 26 ton/h de vapor de alta presión que es enviada a la refinería de ENAP, una segunda extracción para el desaireador y otras dos extracciones para dos precalentadores del condensado en el ciclo de precalentamiento regenerativo.

Características técnicas:

- Potencia : 74,6 MVA
- Velocidad : 3000 r.p.m.
- Temperatura de entrada : 540 °C
- Presión de entrada : 106,5 kg/cm<sup>2</sup>

**b) GENERADOR SINCRONICO:**

El encargado de producir la potencia eléctrica es el Generador, el cual produce corriente alterna (AC) trifásica. La capacidad del turbogenerador, supera los 70 MW. Los descansos del generador son refrigerados por agua, proveniente de la torre de enfriamiento. En la Fig. N° 5.5 se muestra el turbogenerador.

El generador sincrónico se encuentra protegido contra sobre temperaturas, sobre voltajes, transientes y variaciones de frecuencia. El voltaje de campo es suministrado por una excitatriz, el cual pasa por una etapa rectificadora. La sincronización con el SIC es efectuada en forma automática por operadores desde la sala de control.

Características técnicas:

- |                      |                |                    |           |
|----------------------|----------------|--------------------|-----------|
| • Polos              | : 2            | • Voltaje Armadura | : 11,5 kV |
| • Frecuencia         | : 50 Hz        | • Corriente Campo  | : 842 A   |
| • Velocidad          | : 3.000 r.p.m. | • Voltaje Campo    | : 235 V   |
| • Potencia           | : 86,6 MVA     | • Factor Potencia  | : 0,9     |
| • Corriente Armadura | : 4.348 A      |                    |           |

Las principales extracciones y componentes del Turbogenerador son.

1. Generador
2. Unión rígida entre el Generador y la Turbina
3. Válvula de control de flujo de vapor
4. Válvula de reguladora de presión para la primera extracción
5. Flujo de vapor de descarga al condensador
6. Cuarta extracción (vapor al precalentador del condensado N° 1)
7. Tercera extracción (vapor al precalentador del condensado N° 2)
8. Segunda extracción (vapor al desaireador)
9. Primera extracción (vapor de alta presión a ENAP).

### 5.3.3- CONDENSADOR:



Fig. N° 5.5 Turbogenerador y Condensador.

.Después de que el vapor acciona la turbina, éste pasa a la fase líquida en el Condensador (Fig. N° 5.5) .La función del sistema de condensado es ofrecer la fuente fría indispensable para el funcionamiento de un ciclo de trabajo. El condensado (fase líquida) es almacenado en un pozo en depresión (*Hotwell*). Posteriormente existen dos bombas de compresión de condensado, que elevan el caudal desde la cota piezométrica del pozo de condensado (*Hotwell*), hasta la cota de entrada a las duchas del desaireador, venciendo las pérdidas de carga en los intercambiadores de calor de superficie, de la planta de precalentamiento regenerativo. Es decir este sistema cumple con la función de mantener el ciclo de líquido/vapor de la unidad. El agua obtenida por la condensación del vapor,

después de ser sometida a diversas etapas se inyecta de nuevo en la caldera en las condiciones de presión y temperatura más adecuadas para obtener el máximo rendimiento del ciclo. El sistema de agua de circulación que enfría el condensador se opera en circuito cerrado, trasladando el calor extraído del condensador a la atmósfera mediante torres de enfriamiento.

En la tabla siguiente, se nombran las principales características de diseño del condensador y del pozo de almacenamiento de condensado (*Hotwell*).

Número de pasos de agua	2
Presión de operación	0,0642 kg/cm <sup>2</sup>
Temperatura de operación	37,07 °C
Flujo de vapor de escape	170.000 kg/h
Caudal de agua de enfriamiento	9.062 m <sup>3</sup> /h
Temperatura de entrada del agua de enfriamiento	24 °C
Temperatura de salida del agua de enfriamiento	33,38 °C
Número de tubos	5.724
Diámetro de los tubos	25,4 mm
Medida de la pared del tubo	1,24 mm
Longitud del tubo	8,46 m
Almacenamiento en el Hotwell	3 min.

#### 5.3.4- TORRES DE ENFRIAMIENTO:

Son dispositivos que se usan para enfriar el agua que se usa para remover el calor del condensador en las plantas de potencia, mediante la transferencia de calor y materia al aire que circula por el interior de la torre.

La Torre de Enfriamiento de la planta de Cogeneración de PETROPOWER S.A. (Fig. N° 5.6) cumple con la función de rechazar al aire las energías degradadas en el funcionamiento de la planta: suministrando agua de enfriamiento al condensador y abasteciendo con agua de enfriamiento a los intercambiadores de calor del turbogenerador y otros componentes de la planta, como son los compresores. El agua de enfriamiento disminuye su temperatura poniéndola en contacto con el aire, mediante cuatro ventiladores que produce un tiro inducido en contraflujo y transfiriendo el calor desde el agua caliente hacia la atmósfera principalmente mediante evaporación y convección.

La torre cuenta con tres bombas para entregar el agua desde la piscina de la torre a un colector de descarga. Actualmente se opera con una bomba diseñada

para 5.000 m<sup>3</sup>/h, que en realidad mueve 8.000 m<sup>3</sup>/h, por disposición de la planta. (Cavitación y ahorro energético)

En forma continua, agua de reposición (clarificada) alimenta a la piscina de la Torre de Enfriamiento desde el Sistema de tratamiento de agua. Además se adicionan productos químicos, como biocidas e inhibidores de corrosión para el control químico en el sistema de agua de enfriamiento. Un flujo de purga se dirige desde el colector de suministro al colector de retorno de ENAP para su desecho.

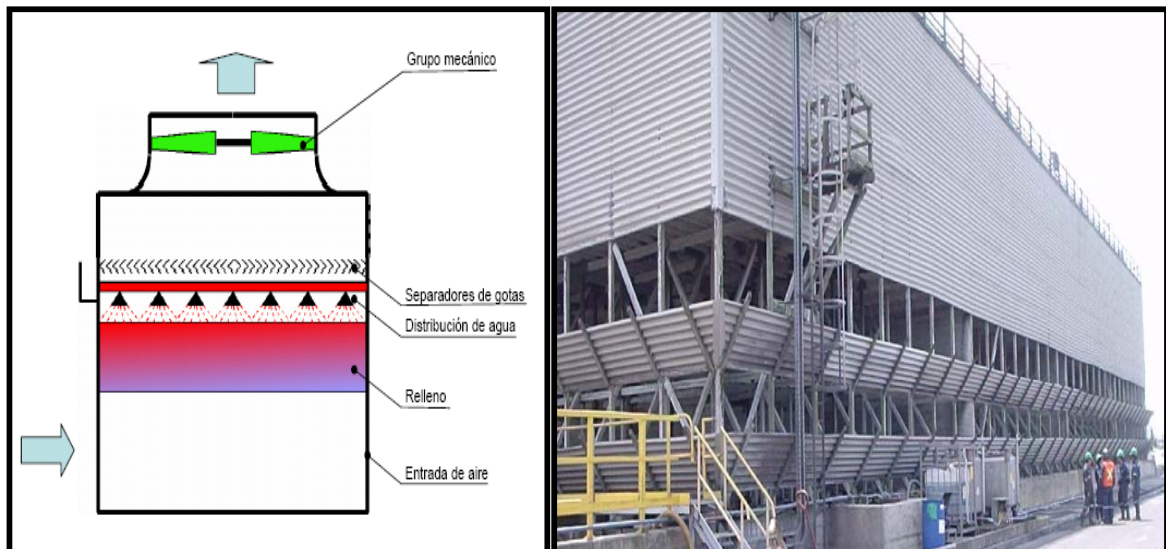


Fig. N° 5.6 Esquema de la torre de tipo contracorriente y tiro inducido, Torre PETROPOWER S.A.

### 5.3.5- BOMBAS:

El vapor, que al salir de la turbina se ha debilitado su presión, es enviado a uno condensador donde pasa a la fase líquida. Tres son la *Bombas* de agua de alimentación, cada una de 16 etapas, aseguran el suministro y comprimen el flujo de agua de alimentación desde la presión del desaireador hasta la presión en el domo de la caldera, venciendo las pérdidas de carga en las válvulas y el economizador. Dos de estas bombas operan en régimen, la tercera se usa sólo en la puesta en marcha o en una condición de emergencia volver a iniciarse

### **5.3.6- PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA:**

En la Planta de tratamiento de agua (Fig. N° 5.7) el agua cruda, proveniente del río Bío-Bío, debe pasar por una etapa de clarificación, la cual se ocupa principalmente como agua de reposición en la Torre de Enfriamiento, también se obtiene agua desmineralizada,

La clarificación consiste en reducir la turbidez y materiales en suspensión. Los pasos incluyen la adición de coagulantes químicos o controladores del PH (entre 7 y 8) para evitar la corrosión de las cañerías.

Estos químicos reaccionan para formar flóculos, los cuales se asientan por gravedad en tanques de decantación y el agua es obtenida, en este caso por rebalse. Luego el agua es filtrada en forma mecánica para remover la turbidez, y pasar por una etapa de desmineralización, obteniéndose de esta forma agua de altísima calidad en lo que se refiere a la remoción de minerales disueltos. El agua desmineralizada, que es de una mayor pureza, se ocupa como agua de reposición en el sistema de alimentación de agua a la caldera. Posteriormente el agua de alimentación posee dos tratamientos, uno es de fosfato coordinado y otro de aminos neutralizantes. Se producen 120 ton/h de agua desmineralizada y agua de alimentación de caldera

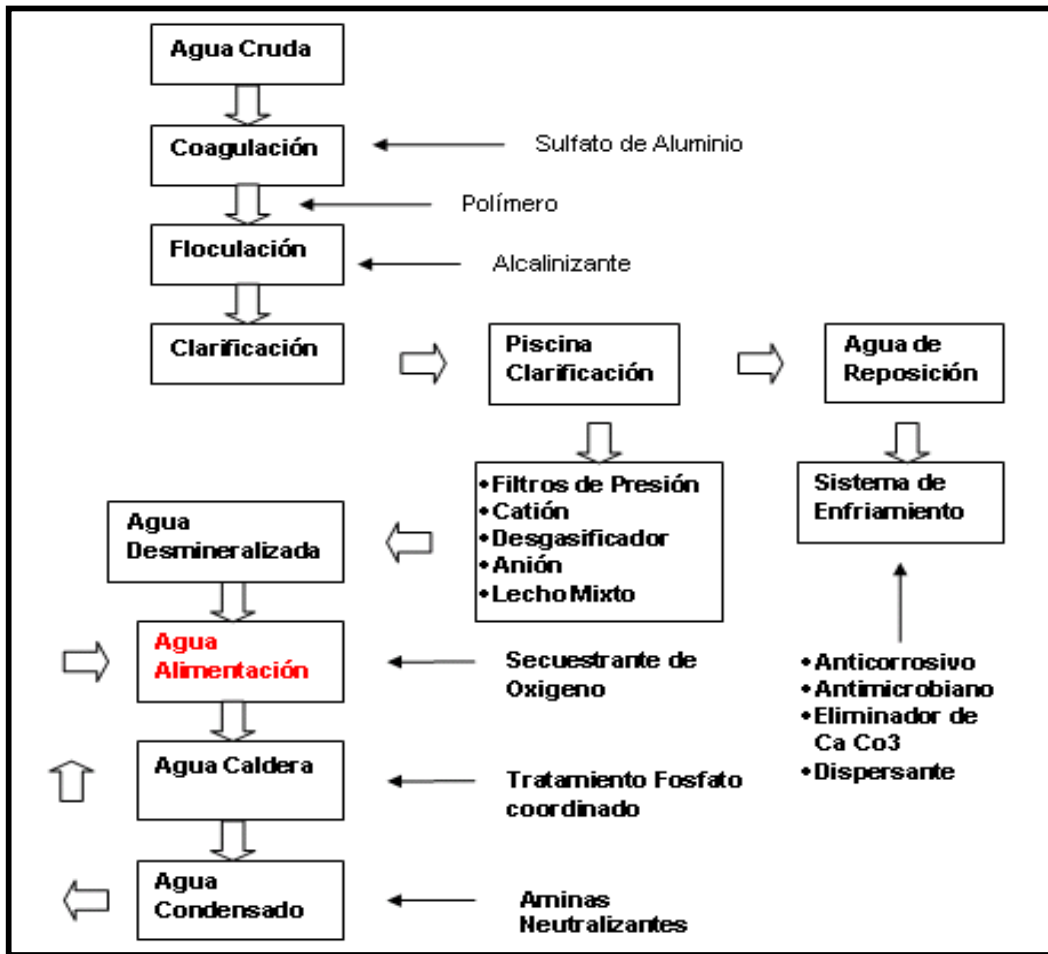


Fig Nº 5.7 Proceso Tratamiento de Agua.



Fig Nº 5.8 Planta de Tratamiento de Agua.

### 5.3.7- PRODUCTOS DE LA UNIDAD DE COGENERACION

**Hacia ENAP:**

- Energía eléctrica
- Vapor de alta presión
- Agua desmineralizada

**Hacia LA UNIDAD DE COQUIZACION RETARDADA:**

- Energía eléctrica
- Agua de alimentación de Caldera
- Aire de planta

**Hacia EL SIC:**

- Energía eléctrica

**Hacia AGA:**

- Energía eléctrica

**Hacia PETROQUIM:**

- Energía eléctrica
- Vapor

### 5.3.8- DISTRIBUCION DE LA ENERGIA ELECTRICA ENTRE LOS DISTINTOS CONSUMIDORES (MWH)

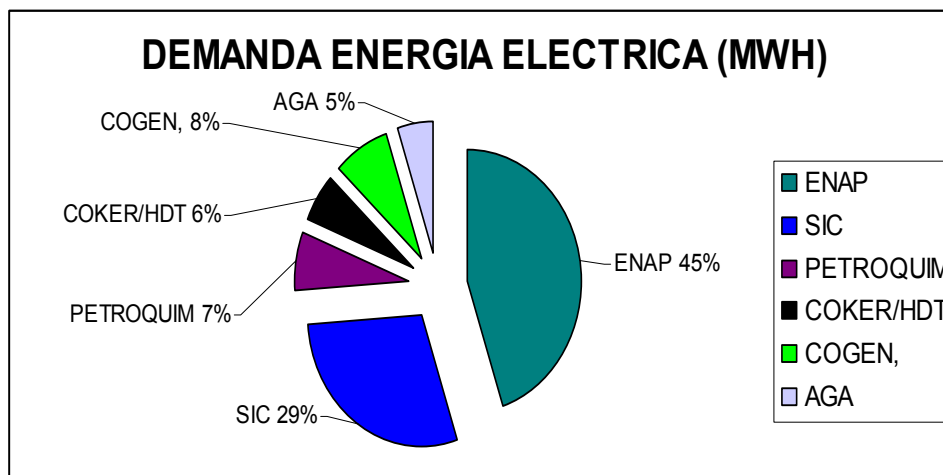


Fig. N° 5.9 Demanda de energía eléctrica

## **CAPITULO V I CLASIFICACIÓN DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO.**

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 relleno con el propósito de aumentar la superficie de contacto entre el agua-aire. El contacto entre el aire y el agua puede ser en flujo cruzado o contraflujo, siendo este último el más eficiente, puesto que, su principal ventaja es que el agua más fría se contacta con el aire más seco; ocurriendo esto en la parte inferior de la torre; en tanto que, en la parte superior de dicha torre el agua más caliente se mezcla con el aire más húmedo.

La temperatura de bulbo seco y de bulbo húmedo, son muy importantes para la evaluación del comportamiento de una torre.

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, 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 aumenten 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.

En las torres se colocan 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 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.

Se recomienda el tratamiento químico del agua a enfriar y realizar un análisis periódico para evitar las incrustaciones y la corrosión en los elementos de la torre.

La clasificación de las torres se establece basándose en el principio de convección (circulación) que emplean, es decir, a la forma en que se suministra el aire para enfriar el agua.



a). Torres de circulación natural

- Torre atmosférica.
- Torre de tiro natural.
- Torre hiperbólica.

b). Torres de tiro mecánico

- Torre de tiro inducido.
- Torre de tiro forzado.

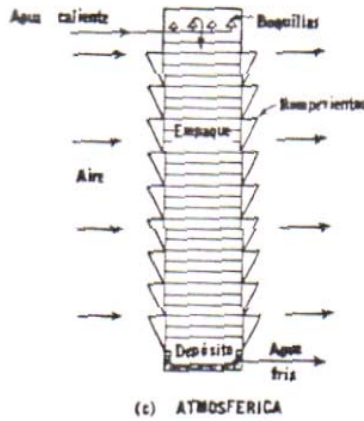


Fig. N° 6.1

Torre Atmosférica

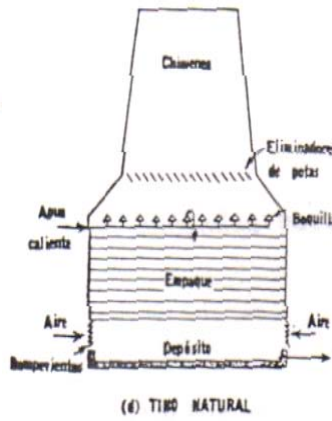


Fig. N° 6.2

Torre de tiro natural

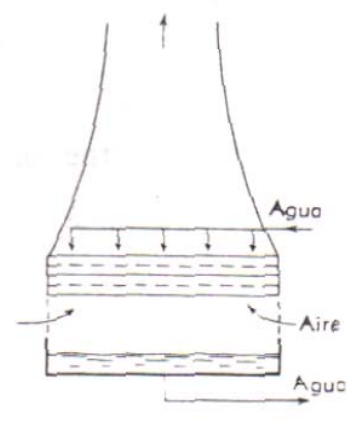


Fig. N° 6.3

Torre Hiperbólica

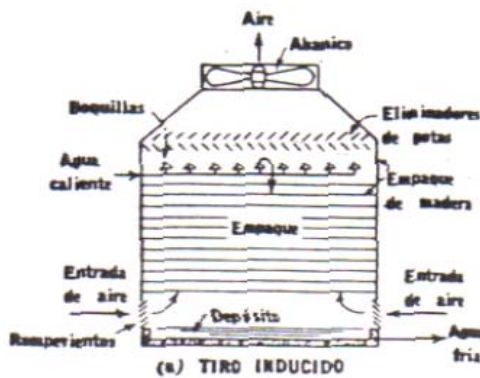


Fig. N° 6.4 Torre de tiro inducido

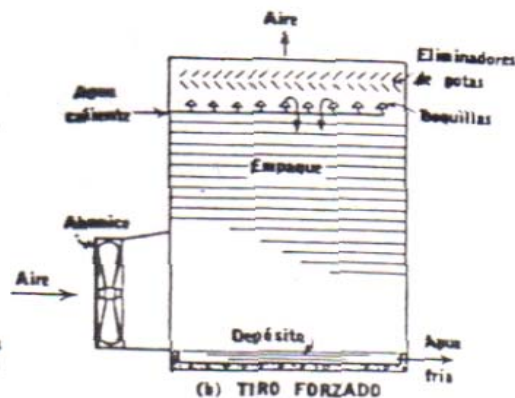


Fig. N° 6.5 Torre de tiro forzado

## 6.1- TORRE DE CIRCULACIÓN NATURAL

La Torre de Circulación Natural, entre las cuales se encuentran las **torres atmosféricas, de tiro natural e hiperbólicas**. No poseen ventilador, emplean corrientes naturales de aire, debidas a la diferencia de densidades del aire dentro de la torre. Su costo de mantenimiento es bajo por la ausencia del ventilador.

Dentro de las desventajas que presentan las torres de circulación natural es la posibilidad de recirculación de las masas de aire, debido a la baja velocidad del aire a la salida. Además, su poder de enfriamiento está condicionado por las

condiciones atmosféricas reinantes, como lo son la presión, velocidad del viento, temperaturas y estaciones del año.



Fig. N° 6.6 Torres Hiperbólicas en operación.

## **6.2- TORRE DE TIPO MECÁNICO.**

Las Torres de Enfriamiento de Tipo Mecánico, de Tiro Forzado e Inducido usan ventiladores para mover el aire en lugar de depender del tiraje natural a la velocidad del viento. Esto acelera el enfriamiento aumentando su rendimiento debido al incremento de la velocidad del aire sobre la superficie húmeda y a través de la torre. Equipos mucho más pequeños manejan flujos, bajo condiciones bien controladas de operación.

Cuando se ubica el ventilador, en la parte superior, se succiona el aire circulante en la torre, lo que se denomina "Torre de Tiro Inducido", si el ventilador está situado en la parte inferior de la Torre impulsando el aire que circula en ésta, recibe el nombre de "Torre de Tiro Forzado"

### **6.2.1- TORRE DE TIRO INDUCIDO.**

Dichas torres tienen un uso bastante alto cuando se trata de capacidad de enfriamiento que van por sobre los 150.000 m<sup>3</sup>/h. Su uso se ha ido incrementando en los últimos años (se utilizan con mayor frecuencia), ya que presentan mayores ventajas, que excepto en condiciones muy especiales debido al medio ambiente.

El aire entra a lo largo de una o más paredes de la torre (Fig. N° 6.4) y como resultado, la altura del ventilador requerida para la entrada del aire es muy pequeña. Como el aire se introduce por toda su periferia, el contacto entre aire-agua al comienzo es más homogéneo, siendo más óptimo al inicio del contacto.

El aire se descarga a través del ventilador a gran velocidad, de manera que se proyecta hacia arriba, mezclándose con las corrientes naturales de aire que evita su descenso posterior, con lo cual, se elimina la recirculación del aire por la torre.

En este tipo de torre por la ubicación del ventilador, se produce una diferencia de presión en el interior de la misma, presentando caída de presión en la entrada del ventilador, lo que aumenta los requerimientos totales de energía.

La velocidad de descarga es grande produciendo mayor neblina o pérdida de agua por gotas que son arrastradas por la corriente de aire.

Los equipos móviles (ventilador, transmisión, motor) están ubicados en la parte superior de la torre, están sujetos a vibraciones y expuestos a mayor corrosión debido al contacto con aire de salida, el cual, es más húmedo y el agua arrastrada por la velocidad del aire que circula por la torre.

Las boquillas aspersoras y las placas de relleno aseguran una amplia superficie de evaporación del agua, con coeficientes máximos de transferencia de calor.

Este diseño a su vez se divide en diseños a contraflujos y en diseños de flujos cruzados, dependiendo de las direcciones relativas de flujo de agua y de aire.

### **a) Torres de tiro inducido a contraflujo o en contracorriente**

Desde el punto de vista termodinámico, la configuración a contraflujo es más eficaz ya que el agua más fría entra en contacto con el aire más frío, obteniéndose así un potencial máximo de entalpía, es así que cuando mayores son los intervalos de enfriamiento y más difícil la diferencia útil de temperaturas, tanto más evidentes serán las desventajas del tipo de contraflujo

El aumento del flujo de aire, en estas torres, no se logra necesariamente incrementando la velocidad del aire, sino más bien alargando la torre, para

incrementar el área de corte transversal para el flujo del aire.

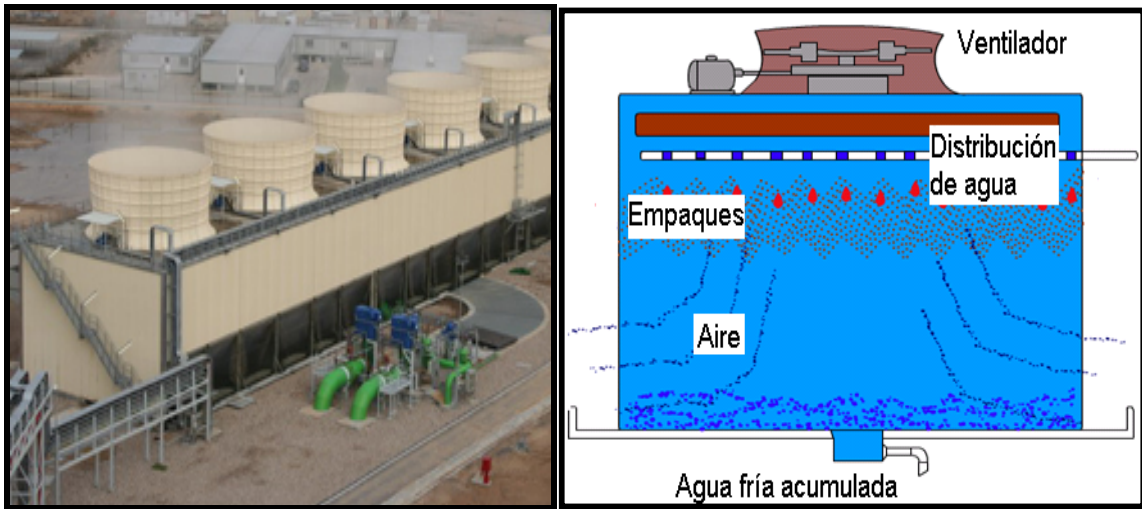


Fig. N° 6.7 Esquema de una Torre de tiro inducido a contraflujo.

**b) Torres de tiro inducido de flujo cruzado o transversal**

Las Torres de Flujo Transversal, están dispuestas de una configuración de su relleno, a través del cual el aire fluye horizontalmente a través de la caída descendente del agua. El agua a ser enfriada es suministrada a piscinas de entrada de agua caliente ubicadas en la parte superior de las áreas de relleno, y es distribuida al relleno por gravedad a través de orificios de medición ubicados en el suelo de dichas piscinas. Lo anterior elimina la necesidad de contar con un sistema de distribución de pulverización a presión, y dispone que el sistema de gravedad resultante, se encuentre a mano facilitando su mantención.

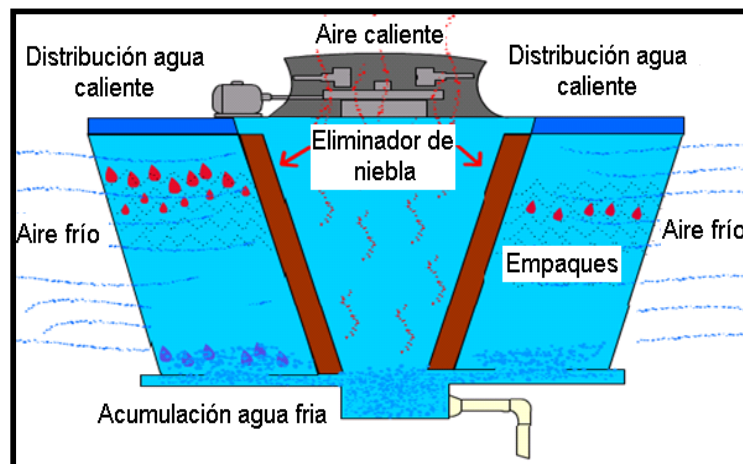


Fig. N° 6.8 Esquema de una Torre de tiro inducido de flujo cruzado.

### 6.2.2- TORRE DE TIRO FORZADO.

En esta clase de torre (Fig. N° 6.5), el ventilador es montado en la base (parte inferior) y el aire es forzado a dar una vuelta a 90° a gran velocidad, hacia dentro, por lo que la presión útil necesaria del ventilador es mayor que la de tiro inducido. La descarga es a baja velocidad desde la parte superior.

Dicho diseño tiene la ventaja de tener ubicado el ventilador y el motor fuera de la torre, lo cual resulta altamente conveniente para su inspección, mantención y reparación y los problemas de desgaste y corrosión en las aspas de los ventiladores y la presencia de humedad en la caja reductora son evitados.

Sin embargo, debido a la velocidad de salida del aire relativamente baja, la torre de tiro forzado se encuentra sujeta a una alta recirculación de los vapores de escape húmedos que vuelven a su toma de aire, esto reduce la capacidad de trabajo de las Torres de enfriamiento. Si los vientos son desfavorables, la recirculación puede bajar el rendimiento hasta más del 20%.



Fig. N° 6.9 Torre de tiro Forzado en operación

## **CAPITULO VII COMPONENTES PRINCIPALES DEL SISTEMA DE AGUA DE ENFRIAMIENTO.**

### **7.1- FUNCION**

El Sistema de agua de enfriamiento de la planta, cumple con dos funciones principales. Estas son:

- 1- Suministro de agua de enfriamiento al condensador
- 2- Abastecimiento de agua de enfriamiento a otros componentes de la Planta.

Entre los componentes tenemos: Auxiliares de la Turbina Principal, Compresores de aire de la planta, Bombas de agua de alimentación de Caldera y de Suministro a Coker/HDT, Silo de Ceniza (agua de enjuague), Descansos del Generador

El agua de enfriamiento que fluye a través del condensador y de los intercambiadores de calor, absorbe el calor de los fluidos del proceso. Dicho calor es enviado a la atmósfera a través de la torre de enfriamiento. Si el calor del agua de enfriamiento no fuese eliminado, provocaría daños a los equipos por sobrecalentamiento.

### **7.2- DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE AGUA ENFRIAMIENTO**

El Agua de Enfriamiento caliente proveniente de la planta es dirigida a la Torre de Enfriamiento y fluye por el colector de distribución y, desde ahí, a cada una de las cuatro celdas de la torre. El agua caliente es pulverizada dentro de cada celda en dirección descendente, al mismo tiempo que el aire fluye en dirección ascendente (en contraflujo). El agua enfriada se acumula en la piscina de la Torre, desde donde se alimenta la succión de las tres bombas de agua de enfriamiento que hacen circular el agua a través de la planta.

En forma continua, el agua de reposición (clarificada) es alimentada a la piscina de la torre, para mantener el volumen de agua de enfriamiento en el sistema. Existen bombas de dosificación que succionan de tanques de almacenamiento para el control químico.

Bajo condiciones de operación normal, sólo una bomba de Agua de

Enfriamiento se encuentra operando. Un fluidímetro, se encuentra instalado en el colector de suministro. Desde el colector de suministro de agua de enfriamiento, sale una línea hacia la válvula de control de purga (blowdown), con el fin de limitar la concentración de sólidos disueltos en el agua de enfriamiento. La válvula de control de purga dirige el flujo de purga desde el colector de suministro al Colector de retorno de agua de enfriamiento de ENAP para su desecho.

Los instrumentos de medición de presión, temperatura y flujo se encuentran dispuestos en puntos claves y transmiten dichos parámetros para la pantalla del PLC en la Sala de Control.

### 7.2.1-INFORMACIÓN DE DISEÑO DE LA TORRE.

Algunos de los datos de diseño clave de la Torre de Enfriamiento.

<b>Datos de Diseño de la Torre de Enfriamiento</b>	
Tipo de Torre de Enfriamiento	Del tipo mecánico con ventilador de tiro inducido, tratada por presión, fabricada por Douglas Fir
Flujo de aire	Contra flujo
Número de celdas	4
Flujo de Agua de Enfriamiento	10.000 m <sup>3</sup> /h.
Temperatura del agua de entrada	36°C
Temperatura del agua de salida (fría)	24°C
Temperatura de Bulbo Húmedo	18°C
Temperatura de acercamiento	6°C
Pérdida de agua por evaporación	170 m <sup>3</sup> /h
Pérdida de agua por rocío	0,001% de Flujo
Potencia del ventilador	130 kW (175 HP)
Requerimientos de energía del ventilador a las dos velocidades	158 kW / 23 kW
Motores del Ventilador	Inducción AC, 2 velocidades (1.486 / 740 r.p.m.)
Reductor	114 / 57 r.p.m.
Rango del motor del ventilador	158 kW / 23 kW; 380 V / 3 Ph / 50 Hz
Altura del Colector de bombeo requerido en parte superior del borde de la piscina	8,5 m
Tipo de relleno	Estructurado, PVC resistente al fuego



### 7.2.1.1- ESTRUCTURA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO

La Torre de Enfriamiento de la planta, está fabricada con una Estructura de madera, diseñada y fabricada por Marley Davenport Ltd., U.K., y está provista de cuatro celdas en líneas con extremos cerrados. Cada celda mide 14,64 m por 14,64 m, con una altura de plataforma 10,60 m. La estructura principal de la torre (postes y vigas transversales) está fabricada de una estructura mecánica de Douglas Fir. La estructura, así como la plataforma y su barandilla, las paredes interiores y los cortavientos, las chimeneas y la escalera de acceso son de madera Baltic Redwood (*Secoya Báltica*). El cerramiento exterior es de poliéster.

La estructura o marco principal de la Torre incorpora uniones de estructuras soldadas ya sea con placas metálicas de amarre y/o conectores en caso de ser necesario. Toda la madera utilizada en la construcción de la torre es tratada después de su fabricación y ha sido sometida a un proceso de ensamblaje taladrado con el fin de alcanzar la máxima protección para la estructura terminada.



Fig. Nº 7.1 Estructura de la Torre de Enfriamiento.

NOTA: Secoya: Árbol conífero de América del Norte, que llega a alcanzar 150 m de altura y 12 m de diámetro en el tronco y tiene hojas pequeñas y de color verde azulado.



### 7.2.1.2- TUBERÍAS DE DISTRIBUCIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO



Fig. N° 7.2 Tuberías de distribución de la Torre de Enfriamiento.

Las tuberías de distribución de agua de enfriamiento de la torre de la planta está diseñada de tal forma que cada celda puede ser puesta fuera de servicio sin afectar la operación de la torre (Fig. N° 7.2). Las tuberías de distribución están diseñadas para manejar el 110% del flujo de diseño sin pérdida excesiva en el colector o un rebalse de la piscina. El colector principal del sistema de distribución es de vidrio reforzado con poliéster, y atraviesa toda la torre. Dentro de cada celda el colector alimenta una serie de cañerías secundarias laterales de vidrio reforzado con poliéster (GRP) o PVC, las cuales a su vez, distribuyen el agua sobre el área completa del relleno mediante las boquillas Marley de pulverización descendente que previenen posibles atascamientos y dan contacto más homogéneo e íntimo entre aire-agua, obteniéndose de este modo, una mayor absorción de calor por parte del aire.

En la parte superior de la torre, existen aspersores para hidratar la madera en tiempos estivales para evitar el resecamiento y con el propósito de evitar daños estructurales. Para este tratamiento se utiliza el agua de servicio.

### 7.2.1.3- RELLENO O EMPAQUE.

La función que cumple el Relleno es aumentar el tiempo de contacto agua-aire en la torre, con una caída en forma ordenada y gradual. Desde el punto de vista del diseño, el relleno debe tener: un alto coeficiente de traspaso de masa, baja resistencia al flujo del aire, libertad de canalización por el aire o el agua. Desde el punto de vista de los materiales, deben ser: fuertes, livianos y resistentes al deterioro. El relleno se pueden clasificar en:

**a) Relleno de Salpique:** El tipo de Relleno de Salpique propicia la caída del agua en forma de cascada a través de elevaciones sucesivas de barras de caída dispuestas en forma paralela, aumentando el tiempo de contacto aire-agua.

Dado que se produce una gran dispersión de agua dentro del relleno de tipo salpique en una torre de enfriamiento, la acción es de una distribución de agua no uniforme.

**b) Relleno de Película:** El agua de admisión circula por el relleno en una multitud de delgadas películas fluyendo sobre un área grande de relleno para exponer una máxima superficie de agua sin que se quiebre en gotas. El material empleado en los rellenos es variado (madera, plástico, celulosa de madera, plástico fortificado, aluminio, acero inoxidable, etc). Muy sensible a la calidad del agua, niveles altos de turbidez, desechos, o la presencia de algas o lodo podrán disminuir el tamaño del paso y afectar la eficacia en la transferencia del calor.

El relleno utilizado en la Torre de Enfriamiento de la planta Petropower S.A. es uno estructurado o de película de alto rendimiento fabricado en PVC, de 15 mm de grosor. La temperatura máxima de operación del relleno es de 60°C.

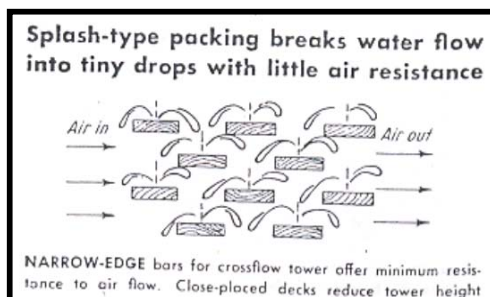


Fig. N° 7.3 Rellenos tipo salpique

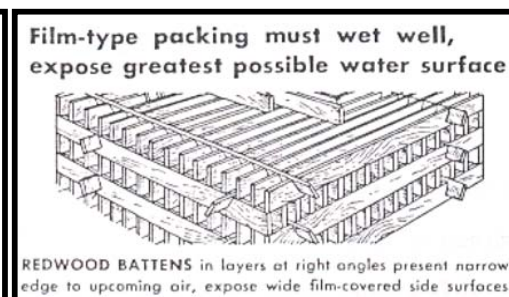


Fig. N° 7.4 Rellenos tipo película

### 7.2.1.4- ELIMINADORES DE NIEBLA

Los Eliminadores están fabricados de PVC termo-formado y se encuentran dispuestos para reducir la pérdida de agua por rocío desde la torre. Por diseño, dicha pérdida en la torre es inferior al 0,001% del flujo de agua de enfriamiento.

El aire que circula por la torre, arrastra gotas de agua hacia la atmósfera, lo que se reduce con un captador de neblina (Fig. N° 7.5), antes de que salga el aire hacia el exterior, haciendo un cambio súbito de dirección. Este fenómeno se presenta con mayor frecuencia en las torres de tiro mecánico debido al incremento de velocidad por el ventilador.



Fig. N° 7.5 Captador de niebla de uno, dos o más deflectores

### 7.2.1.5- SISTEMA DE ADMISIÓN DEL AIRE.

El Sistema de Admisión del Aire está diseñados para que el aire entre con gran facilidad a la torre e impedir pérdidas de agua.

Las siguientes figuras mostrarán formas típicas de celosía en sección. Una hilera simple de listones de madera (Fig. N° 7.6.a) se inclinan hacia abajo para quebrar la velocidad de entrada del aire y mantener el agua en el interior de la torre. Dos hileras de listones en diseño de espiguidilla (Fig. N° 7.6.b) o listones más largos (extendiéndose más allá del cuerpo de la Torre). (Fig. N° 7.6.c) Tubo de asbesto-cemento o metal en forma de S (Fig. N° 7.6.d) y fijados en ranuras para su retiro fácil. La inclinación de las lumbreras depende del diseño de la Torre. (Fig. N° 7.6.e).

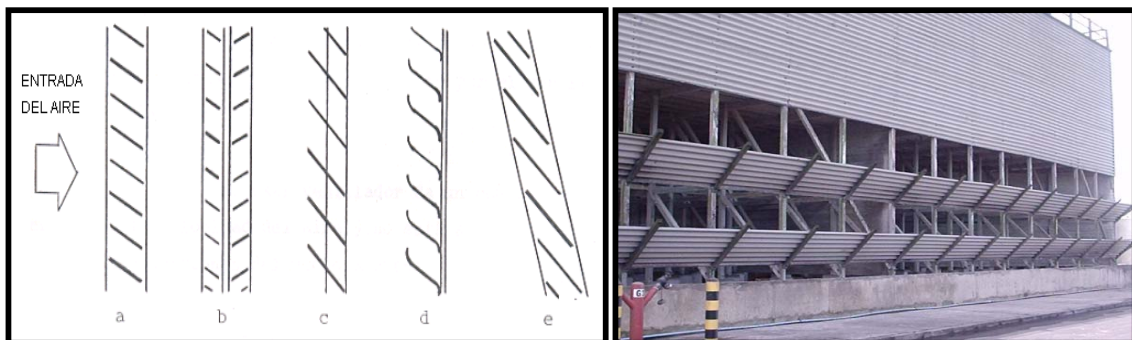


Fig. N° 7.6 a, b, c, d, e

En la entrada de aire hacia la Torre de la planta, existen unas celosías instaladas, son de PVC y se encuentran en los postes de madera en la base de la Torre de Enfriamiento.

### 7.2.1.6- EQUIPO MÓVIL.

El Equipo Móvil está presente sólo en las torres de tiro mecánico y está compuesto por el ventilador, transmisión y motor. Al usar ventilador da un control muy preciso para la velocidad del aire y no está afectado mayormente de las condiciones del medio ambiente. Los materiales con los cuales están hechas las aspas, deben ser resistentes a la corrosión como aluminio, poliéster, plástico

reforzado con fibra de vidrio, acero inoxidable. Tanto el diseño del aspa como su tamaño son importantes, ya que de estos depende enormemente el caudal másico como de la diferencia de presión.

La velocidad óptima en una torre rara vez concuerda con la velocidad óptima del motor. Lo anterior conduce a la necesidad del uso de una unidad de transmisión de energía de reducción de velocidad entre el motor y el ventilador.

Los ventiladores de la planta, son del tipo hélice y constan de 5 aspas de aluminio. El diámetro de los ventiladores es de 9.754 mm, y el ángulo inclinación de la aspa es de 8° (ajuste manual) El flujo de aire de diseño es de 671 m<sup>3</sup>/s, la presión total de diseño es de 155,3 Pa, y la energía absorbida por cada ventilador es de 129 kW a 114 r.p.m.

Los motores del ventilador son de dos velocidades, capaces de operar hasta 1.486 y 740 r.p.m. Son motores de inducción de corriente alterna (AC) y operan a 50 Hz, 380 V. La velocidad del ventilador será ajustada automáticamente basándose en la temperatura del agua de enfriamiento de alimentación a procesos.

El reductor utilizado en cada ventilador es del diseño con engranaje helicoidal fabricado por Marley. El eje de transmisión que une el motor a la entrada de la caja de engranaje está hecho de fibra compuesta y está provisto de acoplamientos flexibles para absorber pequeños desalineamientos.

La estructura soportante del ventilador, reductor de velocidad, transmisión y motor debe ser rígida, para controlar vibraciones (en Torres grandes). (Fig. 7.7)

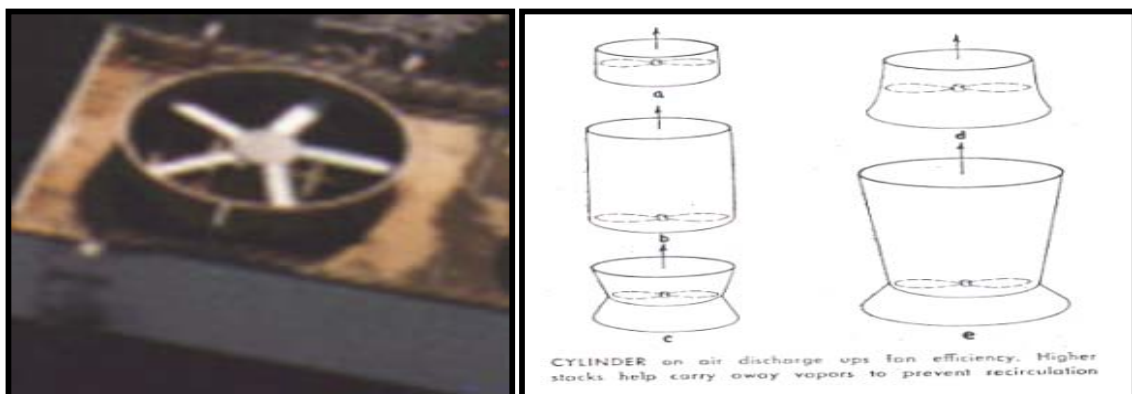


Fig. N° 7.7 Estructura soportante del Ventilador tipo hélice y tipos característicos de salida de aire chimeneas

El ducto de salida (chimenea) de los ventiladores está hecho de madera de Secoya, y su altura ha sido determinada con el fin de dirigir la descarga de aire hacia fuera de la entrada de la torre con el fin de minimizar la recirculación, además de la protección del personal que trabaja sobre la torre. El reductor del ventilador está montado dentro del ducto de salida del ventilador. Dicho ducto está provisto de entradas ensanchadas con el fin de asegurar que las condiciones de entrada de aire sean las correctas.

#### **7.2.1.7- ESTANQUE DE ALMACENAMIENTO DEL AGUA.**

Los Estanques de agua fría pueden estar ubicados debajo de la torre, formando la fundación de algunos proyectos, o en otros, el estanque puede estar separado, pero todos tienen la función de recoger y filtrar el agua fría antes que sea bombeada de vuelta al sistema.

Los estanques más grandes pueden estar hechos de concreto, o algunas veces, de madera. La piscina de la torre de enfriamiento de la planta, está hecha de concreto reforzado, y es común a las cuatro celdas (Fig. N° 7.8).



Fig. N° 7.8 Estanque de Almacenamiento del Agua.

### **7.2.1.8- AGUA DE REPOSICIÓN DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO**

Una línea de Reposición de Agua de Enfriamiento suministra agua de reposición a la piscina de la torre de enfriamiento desde el colector de descarga de las bombas de agua clarificada. El flujo de agua de reposición a la piscina de la Torre es controlado por un transmisor de nivel y por una válvula de control de nivel. Además, se suministra agua hacia la torre mediante otra línea.

Existen tres interruptores de nivel bajo en la piscina de la torre, y que están interconectados con las lógicas de operación de las bombas de agua de enfriamiento.

### **7.2.2- BOMBAS DE AGUA DE ENFRIAMIENTO.**

Existen tres Bombas de Agua de Enfriamiento centrífugas e impulsadas por motor que suministran agua fría desde la piscina de la torre. Cada bomba está diseñada para suministrar 5.000 m<sup>3</sup>/h de agua, a un incremento de altura de 35 m. La presión de descarga de diseño desde las bombas es de 3,5 kg/cm<sup>2</sup> manométrico. Existen indicadores de presión individuales instalados en la descarga de cada bomba para así monitorear la presión en este punto. Cada bomba tiene una válvula de retención (check) para la prevención de la devolución de flujo. Una válvula de mariposa de descarga y manejo manual también se encuentra dispuesta para permitir el que cada bomba pueda ser aislada para su mantención.

Las bombas de agua de enfriamiento son impulsadas por motores de inducción trifásicos de 6.300 VAC, con una inducción de 50 Hz. Los motores están provistos con calentadores de 220 V que se prenden en todo momento para prevenir la condensación de la humedad dentro de la carcasa del motor y se desactivan cuando se desalojan los fusibles de control. Bajo condiciones normales de operación, una bomba estará en servicio, mientras que las dos restantes estarán stand by.

El interruptor de nivel bajo de la piscina de la torre de enfriamiento, proporciona una alarma y advierte al operador para que tome acciones inmediatas



para recuperar el nivel cuando el nivel de la piscina cae bajo los 700 mm del nivel superior de la piscina.



Fig. N° 7.9 Bombas de Agua de Enfriamiento.

### **7.2.3- SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO.**

Bombas succionan productos químicos, que se suministran al agua de enfriamiento, desde los siguientes tanques de almacenamiento: Tanques de Hipoclorito de Sodio, Tanque Inhibidor de corrosión, Tanque anti-incrustante, Tanque Dispersante, Tanque de Biocida

El control de la composición química del agua de enfriamiento resulta de vital importancia para asegurarse de que la torre no se encuentra expuesta a altas concentraciones de químicos que podrían ocasionarle un deterioro estructural y asegurar una transferencia de calor eficaz en el condensador y otros intercambiadores de calor, lo cual, beneficia la capacidad y rendimiento de la Planta de Cogeneración.

Los productos usados en el control químico son:

#### **a)- N23289, Dispersante.**

Es una mezcla de polímeros que tienen como objetivo primordial dispersar y estabilizar el fosfato de calcio, además de dispersar el lodo, arena, hierro y varias sales de calcio. Por otra parte, permite su control automático de dosificación de acuerdo a los ppm presentes en el sistema.



**b)- N8575, Inhibidor de Corrosión.**

Este producto otorga fosfato y zinc al sistema con el propósito de crear una fina película que previene la formación de corrosión como consecuencia de los altos niveles de oxigenación en la torre de enfriamiento.

**c)- N7330, Biocida.**

Este producto actúa para prevenir la formación de algas y lodo dentro del sistema. Éstos se eliminan ya que retardan la transferencia de calor. Es un producto no-oxidante.

**d)- N71D5, Antiespumante.**

Este producto se adiciona para eliminar la espuma que es el resultado de la muerte de materia orgánica.

**e)- Hipoclorito de Sodio (NaClO)**

Es un biocida oxidante que se adiciona en forma constante para eliminar la materia orgánica.

**7.2.4 - CALIDAD DEL AGUA DE ENFRIAMIENTO**

La Calidad del Agua de Enfriamiento depende en alta medida de la calidad del aire que esta siendo suministrado a la Torre de Enfriamiento. A medida que el agua se evapora, los sólidos disueltos se precipitan. Más aún, los sólidos son introducidos en el sistema mediante el agua de reposición. El principal problema con los sólidos disueltos en el agua es la formación de incrustaciones en las superficies de transferencia de calor en el condensador u otros intercambiadores de calor, lo cual podrá afectar seriamente el funcionamiento de la Planta.

- **Purga:** El agua de evaporación sale de la torre en un estado de vapor puro, dejando atrás todos los sólidos disueltos (TDS) para concentrarse en la masa de circulación del agua. El método aceptado para controlar dichos sólidos disueltos es el “blowdown” o purga, en donde una parte del flujo de agua de circulación (junto con el contenido de sólidos disueltos totales) es continuamente desechada y vuelta a rellenar con agua de reposición relativamente pura. La calidad del agua de enfriamiento deberá ser monitoreada continuamente.

- **Prevención de la formación de incrustaciones:** El control de incrustaciones es normalmente efectuado mediante la adición de agentes (tales como ácido sulfúrico) que convierte una parte del bicarbonato de calcio en sulfato de calcio. La concentración del sulfato de calcio deberá ser mantenida o de lo contrario se podrían formar incrustaciones de sulfato, las cuales son muy densas y difíciles de eliminar.

- **Control de corrosión:** Los metales utilizados en los sistemas de agua de enfriamiento se encuentran susceptibles a la corrosión en grados variables. El agua de enfriamiento que contenga características de corrosión que vayan más allá de aquellas anticipadas en el diseño de la torre requiere tratamiento. Lo anterior podrá ser debido al alto contenido de oxígeno, dióxido de carbono, bajo pH o por el contacto de metales de diferentes características. En aquellos casos en los que la corrección de la fuente de corrosión no es posible, existen varios componentes químicos que podrán ser agregados al agua con el fin de que actúen como inhibidores, que crearán y mantendrán una película protectora en las partes metálicas.

- **Control de formación de materias biológicas:** El lodo (una materia orgánica gelatinosa) y las algas (un musgo verde) podrá crecer o desarrollarse en la torre de enfriamiento, y su presencia podrá interferir en el proceso de enfriamiento. A nivel comercial se encuentran disponibles diversos biocida para el control del crecimiento de lodo y/o algas. El cloro y los compuestos que contengan cloro constituyen excelentes eliminadores de algas y/o lodo, sin embargo el exceso de cloro podrá dañar la madera u otros materiales de construcción.

El cloro y los compuestos que contengan cloro deberán ser agregados al sistema en forma intermitente y cuidadosa, debido a que niveles muy altos de cloro se darán en o muy cerca del punto de entrada al sistema de agua de circulación, provocando una reducción localizada del pH, y provocando corrosión.

- **Formación de espuma y decoloración:** La espuma que persista aún después de un periodo razonable podrá ser ocasionada por las concentraciones de ciertas combinaciones de sólidos disueltos, o por la contaminación del agua de enfriamiento por compuestos formadores de espuma. El tipo de espuma recién descrito podrá ser eliminado mediante el aumento del flujo de purga. En casos extremos, productos químicos eliminadores de espuma deberán ser agregados al sistema.

La combinación de espuma con agua decolorada, en una torre nueva, podrá resultar en el manchado de estructuras adyacentes cuando la espuma es arrastrada en la corriente de aire y descargada fuera del ducto de salida del ventilador. En dichos casos, la operación de los ventiladores deberá evitarse hasta que la formación de espuma haya sido controlada.

- **Deterioro de la madera de la torre de enfriamiento:** Si el proceso de descomposición natural de la madera es detectado en su comienzo y arreglado, se podrá entonces prevenir un daño severo en la madera. Se deberán efectuar inspecciones de rutina con el fin de asegurarse que éste sea descubierto antes de que haya avanzado demasiado.

La descomposición es de dos tipos en general: una descomposición externa y una interna. La primera hace que la superficie de la madera se ponga blanda y quebradiza, y en grados más avanzados, incluso la madera descompuesta podrá ser sacada fácilmente.

La segunda resulta más difícil el detectar. Uno de los mejores métodos para inspeccionar la madera es mediante el “sondeo” con golpes de martillo. Aquellas partes que estén descompuestas internamente sonarán como “Huecas” mientras que las que no lo estén sonarán como con sonido lleno. Aquellas áreas en las que el sonido sea hueco podrán ser probadas insertando un desatornillador u otra herramienta con punta para verificar si se trata efectivamente de descomposición interna de la madera.

**CAPITULO VIII GENERALIDADES Y PRINCIPIOS TEORICOS****8.1- DEFINICIONES GENERALES.**

- **Calor:** Es la energía entre dos sistemas o cuerpos, debido a la existencia de una diferencia de temperatura. El calor siempre es transferido en forma espontánea desde el sistema que posee mayor temperatura, al de menor temperatura. Aquellos procesos que se realizan sin transferencia de calor con el medio externo, se denominan procesos adiabáticos.
- **Calor específico:** Esta definido por la cantidad de calor que entra o sale de una unidad de masa cuando ésta varía en un grado su temperatura.

$$C = (dQ / m*dT) \quad J/(kg K)$$

El calor específico es una cantidad que depende de la *sustancia* considerada, del tipo de *proceso* mediante el cual se transfirió el calor y rigurosamente, depende de la *presión* y de la *temperatura* de la sustancia.

Para pequeñas variaciones de temperatura, el calor específico puede considerarse que se mantiene constante en un cierto valor medio, para un proceso en particular. Los procesos más comunes son a volumen y a presión constante usándose en estos casos los subíndices  $C_v$  y  $C_p$  respectivamente.

Se acepta que el calor en positivo si entra al sistema y negativo si sale del sistema.

- **Calor sensible:** Es todo aquel calor que hace variar la temperatura de un cuerpo o sistema. Se cuantifica a partir de la definición de calor específico de una sustancia.
- **Calor latente:** Es todo aquel calor necesario para provocar el cambio de fase de una sustancia.
- **Aire Húmedo:** El aire húmedo se define por la mezcla binaria de *aire seco* y *vapor de agua*. El aire húmedo puede tener cantidades variables de vapor de agua, desde cero (aire seco), hasta el aire húmedo saturado. Se define la saturación del aire húmedo cuando éste, puede coexistir en equilibrio con agua condensada.

- **Temperatura de bulbo seco:** Es la temperatura de la mezcla de aire-vapor determinada por un termómetro normal.
- **Temperatura Punto de rocío:** El punto de rocío es la temperatura bajo la cual el vapor de agua en el aire comenzará a condensarse cuando se enfría a presión parcial ( $P_v$ ) constante. Corresponde además al 100% del punto de humedad relativa. El punto de rocío de cualquier mezcla de aire y vapor de agua dependerá completamente de la cantidad de humedad presente.
- **Temperatura de bulbo húmedo:** Temperatura que se registra con un termómetro cuyo bulbo está rodeado por una gasa humedecida con agua y se posiciona en una corriente de aire en movimiento. Parte del agua contenida en esta gasa se evaporará. Debido a que el proceso de evaporación toma calor, éste provendrá del agua restante y su temperatura entonces descenderá. Cuánto descienda, dependerá de cuán seco se encuentre el aire y de su temperatura. Una vez que ésta se estabiliza, entonces el termómetro dará la lectura de temperatura de bulbo húmedo.

La temperatura de bulbo húmedo es un parámetro de gran importancia en el diseño de la torre de enfriamiento y su rendimiento, podrá afectar su costo en forma considerable. La temperatura del agua de descarga de la torre aumentará con la temperatura de bulbo húmedo.

- **Humedad específica:** Indica la masa de vapor de agua que se encuentra mezclado con la masa de aire seco.

$$\omega = (m_v / m_{as}) = 0,622 * (P_v / P_{as}) = 0,622 * (P_v / (P_{atm} - P_v)) \quad , \text{kg v/kg as}$$

- **Humedad relativa:** La humedad relativa es la cantidad de humedad absorbida en una muestra de aire, comparada con la cantidad total que puede ser absorbida a una presión y temperatura determinadas y dependerá de la temperatura del aire, mientras más alta, mayor será su capacidad de absorber humedad. La humedad relativa es expresada en porcentaje.

Matemáticamente, es la relación entre la presión parcial de vapor de agua en el aire y la presión de saturación a la temperatura ambiente.

$$HR = (P_v / P_{vSat}) * 100 \quad , \%$$

- **Entalpía del aire húmedo:** Se expresa como energía por unidad de masa de aire seco. La entalpía es una propiedad del aire húmedo que depende de las cantidades de aire seco y de vapor de agua presente en el aire.

La cantidad de agua en el aire atmosférico está reflejada en la humedad específica del aire ( $\omega$ ), se tiene que:

$$\text{Entalpía}_{ah} = (\text{Entalpía}_{as} + (\text{Humedad Específica} * \text{Entalpía}_v))$$

$$h_{ah} = (h_{as} + (\omega * h_v)) \quad , \text{ kJ/kg as}$$

, donde los valores de  $h_{as}$  y  $h_v$  se obtienen de tablas, gráficos o software según referencias particulares.

- **Sicrómetro:** El termómetro de bulbo húmedo es uno de los instrumentos disponibles para caracterizar el aire húmedo, es un instrumento confiable si se aplica adecuadamente. Cuando en el mismo instrumento hay un termómetro de bulbo seco y uno de bulbo húmedo, se le denomina “Sicrómetro” (Fig. N° 8.1).

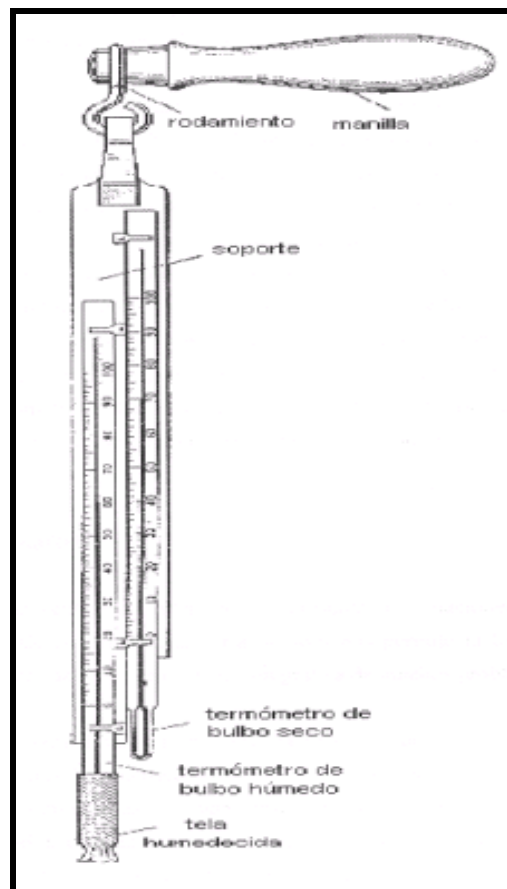


Fig. N° 8.1 Sicrómetro.

## **8.2- CARTA SICROMETRICA**

Se logra una ventaja considerable al representar las propiedades del aire húmedo en un gráfico denominado carta sicrométrica. Esta carta no sólo nos permite la lectura gráfica de las distintas propiedades, sino también la solución gráfica de muchos problemas.

Un estado termodinámico del aire húmedo se determina inequívocamente si conocemos su presión barométrica y otras dos propiedades independientes. Se puede construir una carta sicrométrica para una presión barométrica única. Tradicionalmente, se ha utilizado la presión estándar a nivel del mar, pero se pueden construir para distintas presiones o alturas sobre el nivel del mar. La elección de las coordenadas es, por supuesto, arbitraria. La mayoría de las cartas sicrométricas usadas en los Estados Unidos emplean la temperatura de bulbo seco y la relación de humedad como coordenadas básicas.



**Carta Sicrométrica**

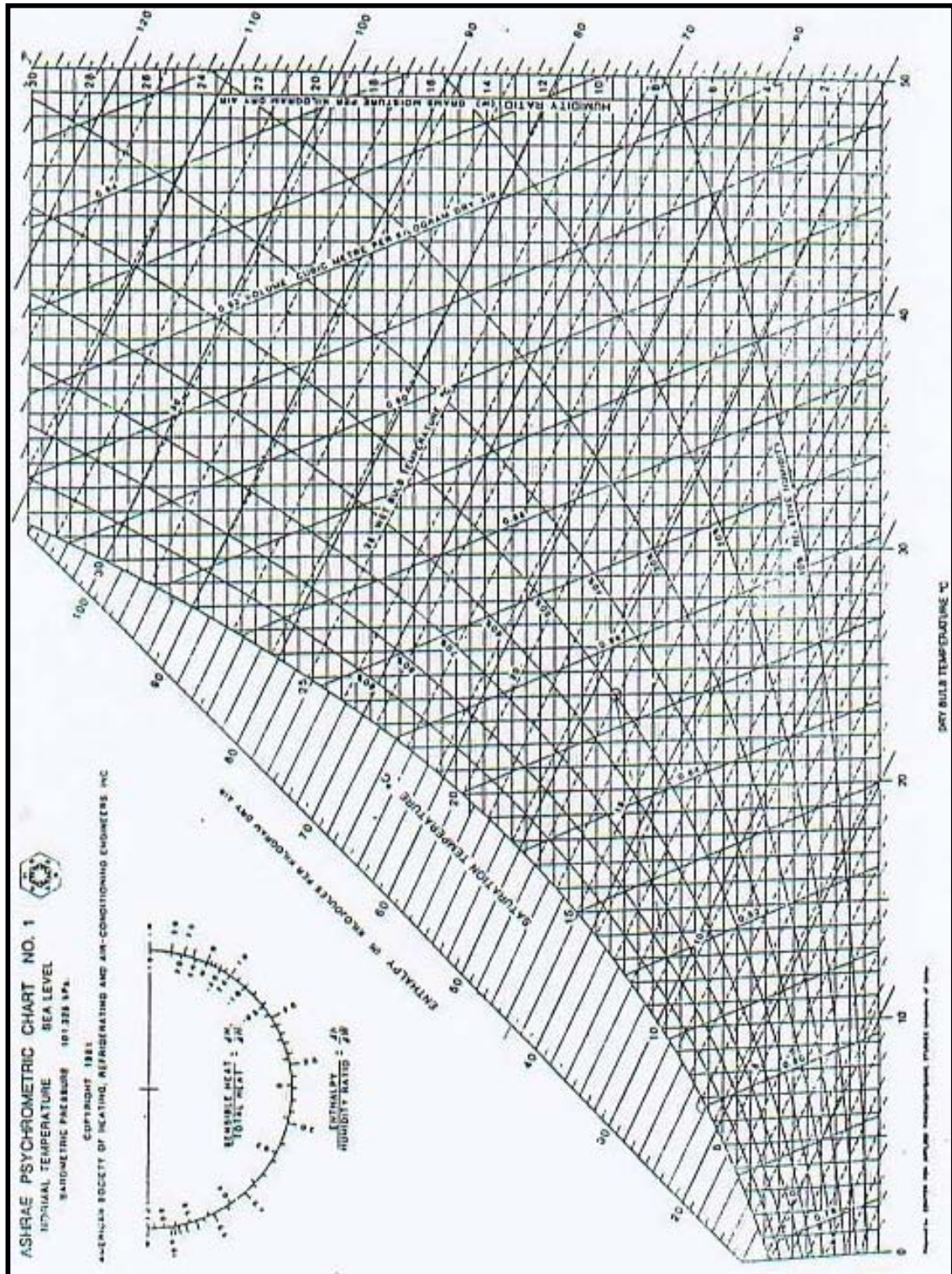


Fig. N° 8.2 Carta Sicrométrica.



### 8.3- TRANSFERENCIA DE CALOR Y DE MASA POR DIFUSION.

En el estudio de transferencia de calor se suelen considerar tres formas distintas de transferencia: **Conducción, Radiación y Convección**. En realidad, la distribución de la temperatura en un medio se controla por los efectos combinados de estas tres formas de transferencia de calor; por lo tanto, no es realmente posible aislar por completo una forma de las interacciones de las otras dos. Sin embargo, para simplificar el análisis se puede considerar sólo una forma de transferencia.

- **Conducción:** La conducción es la forma de transferencia de calor en la cual el intercambio de energía ocurre de la región de mayor a la de menor temperatura, como en el caso de los fluidos en reposo o por el arrastre de los electrones, como en el caso de los metales. En los sólidos, que son buenos conductores eléctricos, son generalmente buenos conductores de calor.
- **Radiación:** Cuando dos cuerpos de temperaturas diferentes están separados por un vacío perfecto, no es posible la transferencia de calor entre ellos por conducción o convección; en tal caso, la transferencia de calor ocurre mediante radiación térmica, es decir, la energía radiante emitida por un cuerpo, debido a su temperatura, es transmitida en el espacio en forma de ondas electromagnéticas o en forma de fotones discretos. La emisión o absorción de energía radiante por un cuerpo, es un proceso global, es decir, la radiación que se origina en el interior del cuerpo se emite a través de la superficie.
- **Convección:** La transferencia de calor por convección ocurre cuando un fluido en movimiento pasa sobre un cuerpo sólido o fluye dentro de un canal y si las temperaturas del fluido y del sólido o del canal son diferentes habrá transferencia de calor entre el fluido y la superficie sólida debido al movimiento relativo entre el fluido y la superficie. Los cálculos de transferencia de calor por convección se evalúan mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \alpha * A * (t_1 - t_2) \quad ,W$$

, donde  $Q$  es la transferencia de calor en Watt (W);  $\alpha$  es el coeficiente de transferencia de calor convectivo en  $W/(m^2 K)$ ;  $A$  es el área de la superficie del sólido en  $m^2$ ,  $t_1$  y  $t_2$  son respectivamente, la temperatura superficial de la pared y la temperatura del fluido en  $^{\circ}C$ .

El coeficiente de transferencia  $\alpha$  depende de un sin número de variables entre las que se citan:

1. Tipo de convección (natural o forzada).
2. Tipo de escurrimiento entre fluido-superficie (régimen turbulento o laminar).
3. Naturaleza de la superficie (horizontal, vertical, plana, cilíndrica, etc.).

Basándose en la ecuación, se puede decir que a mayor velocidad del fluido, mayor es el coeficiente  $\alpha$  y mayor es la cantidad de calor transferido. Por otra parte, el coeficiente  $\alpha$  de los líquidos es mayor que el de los gases, por lo tanto los líquidos son mejores agentes transferentes del calor convectivo que los gases.

Se dice que la transferencia de calor es por convección forzada si el movimiento es inducido artificialmente, digamos con una bomba o un ventilador que impulse el fluido sobre la superficie.

Se dice que la transferencia de calor es por convección libre (o natural) si el movimiento del fluido es ocasionado por fuerzas de empuje debidas a diferencias de densidad causadas por diferencias de temperaturas del fluido.

Cuando se promueve un movimiento de material entre dos fases mediante una diferencia de presión de vapor (o concentración), esto es *difusión* y se caracteriza por el hecho de que el material se transfiere de una fase a la otra o entre dos fases. Esta conducta se llama *transferencia de masa*, para diferenciarla de los conceptos ordinarios de transferencia de calor. La cantidad total de material que abandona la fase líquida es la misma que entra en la fase gaseosa.

## 8.4- TEORIA DE LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

### 8.4.1- DEFINICIONES

- **Celda:** Subdivisión más pequeña de la torre, podrá funcionar como una unidad independiente con respecto a los flujos de aire y de agua. Se encuentra rodeada de paredes exteriores o paredes de separación. Cada celda podrá tiene un ventilador o ducto de salida y un sistemas de distribución.
- **Carga térmica o capacidad del equipo:** Cantidad de calor que se le debe extraer al agua que sale en la torre, expresada en kcal/h o bien en kW.
- **Temperatura acercamiento o Aproximación (Cooling Tower Approach):** Es la diferencia entre la temperatura del agua que sale de la torre y la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra. En teoría el agua con más baja temperatura que podrá ser producida por una torre será la temperatura de bulbo húmedo. En tal caso la T° de acercamiento será igual a cero. En la práctica la temperatura de acercamiento se encuentra entre los 6 y los 10 grados centígrados.
- **Temperatura de agua fría:** Temperatura de agua de circulación que sale de la torre, en °C.
- **Rango de enfriamiento:** Es la diferencia entre la temperatura del agua caliente que entra en la torre y el agua fría que sale de la misma

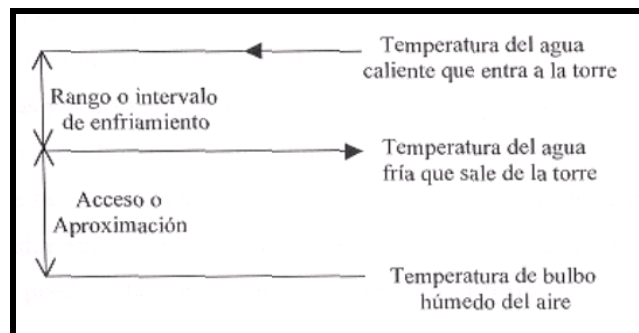


Fig. Nº 8.3 Rango de enfriamiento

- **TDS:** Cantidad total de sólidos disueltos contenidos en una solución en el agua del sistema de enfriamiento.
- **Rocío o Arrastre:** Corresponde al agua perdida desde la torre de enfriamiento a medida que las gotas de líquido son arrastradas por el aire de escape. No guarda relación con el agua perdida por evaporación. Los eliminadores niebla o de pérdida de agua por rocío controlan dicho proceso en las torres.

- **Temperatura agua caliente:** Temperatura de agua de circulación que entra al sistema de distribución, expresada en °C.
- **Agua de Reposición o Reemplazo:** Agua requerida para compensar las pérdidas totales por evaporación, arrastre, purga o pequeñas fugas.
- **pH:** Corresponde al número entre 0 y 14, que indicará el grado de acidez (bajo 7) o alcalinidad (sobre 7); el 7 indicará que una solución es neutra.
- **Purga (blowdown):** Corresponde a aquel volumen de agua que es intencionalmente arrojado fuera del sistema con el fin de controlar la concentración de sales u otras impurezas existentes en el agua de circulación. Será expresado como un porcentaje del flujo volumétrico de agua de enfriamiento total.
- **Recirculación:** Corresponde a ese porcentaje del aire de escape que vuelve a entrar a la torre de enfriamiento. Unidad: porcentaje de la entrada total-cantidad de aire de entrada que proviene del aire de escape.

#### **8.4.2- TRANSFERENCIA DE CALOR EN LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO**

El principio de la transferencia de calor por *convección* es la base de la operación de las torres de enfriamiento.

El aire es el medio de enfriamiento por medio de la convección y evaporación. Aproximadamente, el 80% del calor se elimina por evaporación y el 20% restante por convección.

Para efecto de análisis se considerará una torre de tiro inducido a contracorriente dividida en dos porciones. En la porción superior el agua caliente se pone en contacto con el aire más frío que el agua y la temperatura del agua bajará, por evaporación y por enfriamiento sensible al aire, aumentando por lo tanto, la entalpía del aire. Dependiendo de la cantidad de aire y del monto de la evaporación, es posible que la temperatura del agua descienda por debajo de la temperatura de bulbo seco del aire de entrada antes de alcanzar el fondo de la torre. En la última porción de la torre, el agua puede poseer una temperatura igual o menor de bulbo seco del aire con que se pone en contacto, y la transferencia de calor sensible y de masa están en direcciones opuestas.

La magnitud del acercamiento a la temperatura de bulbo húmedo depende del

diseño de la torre, siendo otros factores importantes, el tiempo de contacto aire-agua, la cantidad de superficie de llenado y la separación de agua en gotas.

### 8.4.3- EVAPORACION EN LAS TORRES DE ENFRIAMIENTO

El proceso de transferencia de calor y en forma específica el enfriamiento por evaporación en las torres de enfriamiento compromete:

- La transferencia de calor latente debido a la evaporación de una porción pequeña de agua.
- La transferencia de calor sensible debido a la diferencia de temperatura entre el agua y el aire.

### 8.4.4- DIAGRAMA DE OPERACION DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO

En la Fig. N° 8.4, se ilustran las relaciones del agua y el aire y el **potencial que existe en una torre de contraflujo**. Este diagrama constituye una base importante para entender el proceso de una torre de enfriamiento.

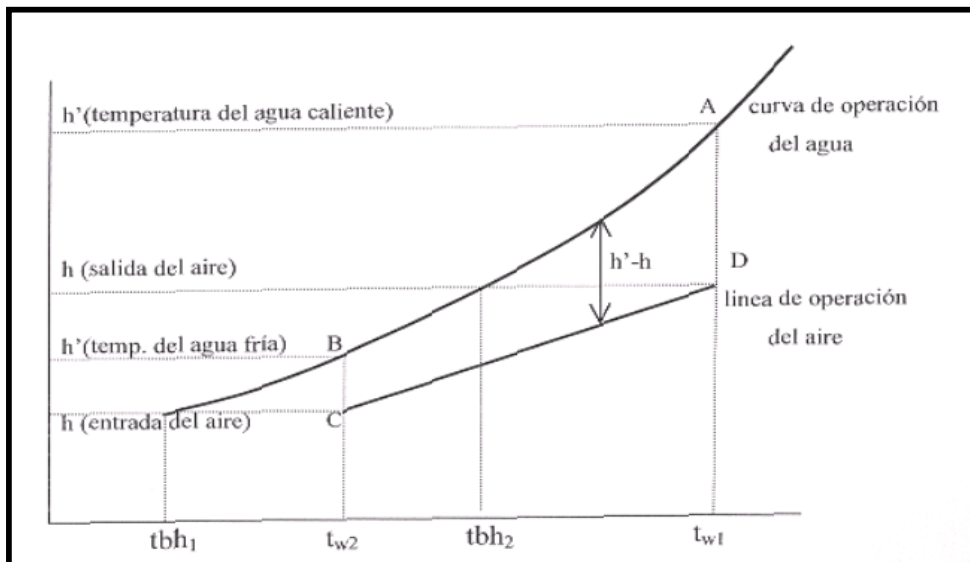


Fig. N° 8.4 Diagrama de operación de una torre de enfriamiento.

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

salida. La línea de operación del aire comienza en C, verticalmente por debajo de B, y en un punto que tiene una entalpía correspondiente a la temperatura de entrada de bulbo húmedo. La línea BC representa la fuerza impulsora inicial ( $h' - h$ ). La relación líquido/gas (L/G) es la pendiente de la línea de operación del agua. 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. La diferencia útil de temperaturas en la torre de enfriamiento se ilustra en el diagrama, como la diferencia entre la temperatura del agua fría que sale de la torre y la temperatura de bulbo húmedo del ambiente.

Las coordenadas se refieren directamente a la temperatura y la entalpía de cualquier punto en la línea de operación del agua; pero, en la línea de operación del aire, la referencia se hace tan sólo a la entalpía de un punto. La temperatura de bulbo húmedo correspondiente a cualquier punto de CD se encuentra proyectando dicho punto en sentido horizontal a la curva de saturación y luego en sentido vertical a la coordenada de temperaturas.

## **CAPITULO IX VERIFICACION OPERACIONAL DE LA TORRE.**

### **9.1- HIPOTESIS Y CONDICIONES DE CALCULO.**

Cabe mencionar que los balances de energía y de masa se harán bajo ciertas hipótesis:

- La Torre de Enfriamiento se considerará como un equipo adiabático. Sólo se considerarán las pérdidas de masa como lo son la cantidad de agua evaporada, la cantidad de agua que se pierde por arrastre de gotas y la cantidad de agua de purga.
- Se despreciarán las masas de aire que se infiltran a la torre.
- La superficie de transferencia no se puede determinar. En los intercambiadores tubulares la superficie de transferencia de calor usualmente se conoce o se puede calcular fácilmente. En las Torres de Enfriamiento de agua el valor del área de transferencia de calor no puede determinarse directamente, ya que está compuesto de disposiciones al azar de gotas y superficie de película.
- Las capacidades de los ventiladores y de las bombas se consideran como nominales (s.i.c.) de manera que se analizan en su máxima eficiencia y capacidad.

(s.i.c.): Salvo indicación contraria.

## 9.2- MODELO TERMODINAMICO DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.

En la Figura N° 9.1, se muestra el modelo de la torre en estudio. En éste, se incluye el aire y el agua, las cuales son las representativas del proceso de enfriamiento.

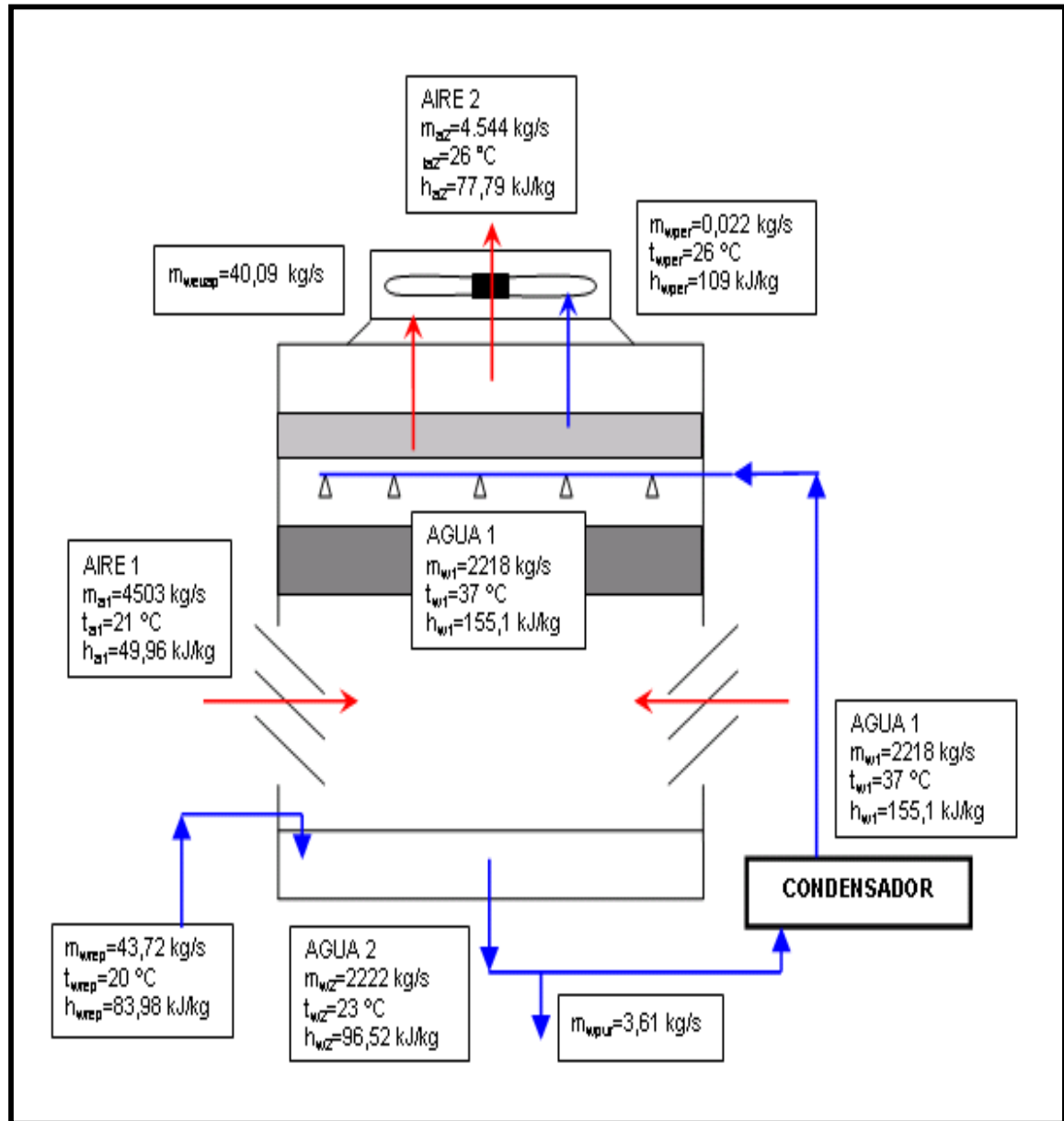


Fig. N° 9.1 Modelo Termodinámico de la Torre de Enfriamiento



### 9.3- MEDICIONES.

- *TEMPERATURAS DEL AGUA:* Se obtuvieron por medio de sensores de temperaturas, cuyos valores fueron consultados en la sala de control de la Planta.
- *TEMPERATURA DEL AIRE HÚMEDO:* Estas mediciones se realizaron mediante un sicrómetro.
- *ÁREAS:* Las áreas de entrada y salida del aire que circula por la torre, se obtuvieron de los planos de diseño de la torre.
- *PRESION ATMOSFERICA:* Presión atmosférica normal; P1= 101325 Pa.
- *VELOCIDAD DEL AIRE:* Se empleó en esta medición un anemómetro. Se tomaron ocho muestras de velocidades del aire por día, durante dos días. Obteniéndose distintos valores de velocidades para los cuales se obtuvieron los siguientes valores promedios de velocidad del aire.

Entrada del Aire									
Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	Promedio General
Veloc. Prom. m/s	5,5	5,9	5,5	6,0	5,2	6,1	5,9	6,2	5,8
Salida del Aire									
Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	Promedio General
Veloc. Prom. m/s	12,9	12,6	11,3	12,2	12,1	12,2	11,3	11,9	12

#### 9.4- BALANCES DE ENERGÍA.

Una forma de cuantificar la energía asociada en el proceso de enfriamiento es proceder con un balance de energía, para el contacto entre el agua y el aire:

#### CALOR RECHAZADO POR EL AGUA = CALOR ABSORBIDO POR EL AIRE

$$m_w \cdot C_w \cdot \Delta t_w = m_a \cdot \Delta h_a \quad (1)$$

$$m_w \cdot \Delta h_w = m_a \cdot \Delta h_a \quad (2)$$

Por lo tanto, la ecuación ( 2 ) aplicada al balance de energía de la torre del modelo termodinámico (sección 9.1.), queda de la siguiente manera:

$$m_{w1} \cdot h_{w1} + m_{a1} \cdot h_{a1} = m_{w2} \cdot h_{w2} + m_{a2} \cdot h_{a2} \quad (3)$$

Como sabe que la masa de aire que entra en la torre es la misma que la masa de aire que sale ( $m_{a1} = m_{a2}$ ), la ecuación anterior se reduce a lo siguiente:

$$m_{w1} \cdot h_{w1} + m_a \cdot h_{a1} = m_{w2} \cdot h_{w2} + m_a \cdot h_{a2} \quad (4)$$

Puesto que la transferencia total de calor del aire disipado en la torre de enfriamiento, incluye el calor sensible ( $Q_{\text{sensible}_a}$ ) y el calor latente ( $Q_{\text{latente}_a}$ ) de evaporación, se tiene que:

$$Q_{\text{total}_a} = Q_{\text{sensible}_a} + Q_{\text{latente}_a} = m_a \cdot ( h_{a2} - h_{a1} ) \quad (5)$$

El punto determinado por  $h_{am}$  se puede resolver en forma gráfica en la carta sicrométrica (Fig. N° 9.2).

$$Q_{\text{sensible}_a} = m_a \cdot C_{p_a} \cdot ( t_{a2} - t_{a1} ) = m_a \cdot ( h_{am} - h_{a1} ) \quad (6)$$

$$Q_{\text{latente}_a} = m_a \cdot ( h_{a2} - h_{am} ) \quad (7)$$

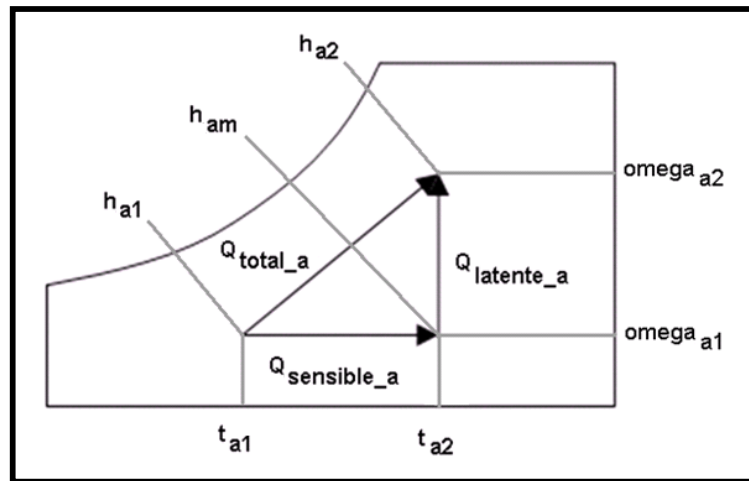


Fig. N° 9.2 Carta Sicrométrica

Las entalpías de la ecuación (7), evalúan la variación de humedad específica del aire húmedo.

#### Enfriamiento sensible

$$Q_{\text{enfensens}_w} = m_{w1} \cdot (h_{w1} - h_{w2}) = Q_{\text{equipo}} \quad (8)$$

Donde  $Q_{\text{enfensens}_w}$  representa también la *Capacidad del Equipo*, en función del enfriamiento del agua que entra en contacto con el aire.

### 9.5- BALANCES DE MASA.

#### 9.5.1- CAUDALES DE AGUA.

La Fig. N° 9.1, muestra también, los Flujos másicos de agua asociados al proceso y se tiene lo siguiente:

- **Agua que se debe enfriar:**

$$m_{w2} = (m_{w1} + m_{w\text{pur}}) \quad (9)$$

$$m_{w1} = (m_{w2} - m_{w\text{pur}}) \quad (10)$$

- **Agua de reposición:** Se sabe que el agua de reposición es el caudal que compensa las pérdidas por la evaporación, por el arrastre de finas gotas (neblina) y de la purga.

$$m_{wrep} = m_{wevap} + m_{wper} + m_{wpur} \quad ( 11 )$$

- **Agua evaporada:** La pérdida por evaporación de diseño de la torre de enfriamiento es de 1,7% del flujo de agua de enfriamiento. La cantidad de agua que se evapora queda reflejada en el aumento de la humedad específica del aire.

$$m_{wevap} = m_a \cdot ( \omega_{a2} - \omega_{a1} ) \quad ( 12 )$$

- **Agua perdida:** Las pérdidas de agua por rocío, la cual es el resultado de gotas de agua que son arrastradas en el vapor de aire de escape de la torre de enfriamiento. Los eliminadores se encuentran dispuestos para reducir la pérdida de agua por rocío desde la torre. Por diseño dicha pérdida en la torre es inferior al 0,001% del flujo de agua.

$$m_{wper} = 0,001\% \cdot m_{w1} \quad ( 13 )$$

- **Agua purga:** Cantidad de agua que se hace salir en forma intencional. Una válvula de control de purga de la torre de enfriamiento dirige el flujo de purga desde el colector de suministro de agua de enfriamiento al colector de retorno de agua de enfriamiento de Enap para su desecho. El valor del agua de purga se obtuvo de la sala de control de la Planta

$$m_{wpur} = 13 \text{ ton/h} = 3,61 \text{ kg/s} \quad ( 14 )$$

### 9.5.2- MASA DE AIRE QUE CIRCULA POR LA TORRE.

La masa de aire ingresa por el contorno de la torre. Se sabe del movimiento de los fluidos por conductos que:

$$m_{a1} = ( \rho_{a1} * A_1 * \text{veloc}_{a1} ) ; \text{ a la entrada de la torre.}$$

Además:

$$m_{a2} = ( m_{a1} + m_{\text{wevap}} ) ; \text{ a la salida de los ventiladores.}$$

(\*) La densidad del aire  $\rho$ , en  $\text{kg/m}^3$  para un estado en particular, se obtiene de la Carta Psicrométrica, ecuaciones o mediante software (EES).

#### *Balance*

Otra forma de conocer la masa de aire que circula por la torre, es hacer un balance de energías global, con la finalidad de dejar expresada la ecuación final en función de la masa de aire.

Reemplazando la ecuación ( 9 ) en la ecuación ( 4 ), se tiene que:

$$m_{w1} \cdot h_{w1} + m_a \cdot h_{a1} + m_{\text{wrep}} \cdot h_{\text{wrep}} = (m_{w1} + m_{\text{wpur}}) \cdot h_{w2} + m_a \cdot h_{a2} + m_{\text{wper}} \cdot h_{\text{wper}}$$

ordenando los términos se tiene;

$$m_a \cdot (h_{a2} - h_{a1}) = m_{w1} \cdot (h_{w1} - h_{a2}) + m_{\text{wrep}} \cdot h_{\text{wrep}} - m_{\text{wpur}} \cdot h_{w2} - m_{\text{wper}} \cdot h_{\text{wper}} \quad ( 15 )$$

El término  $m_{w1} \cdot (h_{w1} - h_{a2})$ , de la ecuación anterior determina la carga térmica del equipo en operación, en función de la capacidad de absorción del calor por parte del agua.

Finalmente la ecuación ( 15 ) queda reducida a lo siguiente:

$$m_a = ( Q_{\text{equipo}} + m_{\text{wrep}} \cdot h_{\text{wrep}} - m_{\text{wpur}} \cdot h_{w2} - m_{\text{wper}} \cdot h_{\text{wper}} ) / ( h_{a2} - h_{a1} ) \quad ( 16 )$$

De esta manera se evalúa la masa de aire (  $m_a$  ) que circula en la torre de enfriamiento.

## 9.6- CALCULOS

### Evaluación experimental del comportamiento sicrométrico de la torre de enfriamiento de PETROPOWER S.A,

Nota: a=Aire, w=Agua, 1=Entrada, 2=Salida

#### DATOS

$P_1=101.325 \text{ Pa}$  (=1,033 bar) Presión atmosférica

$P_w=(1,5 \cdot P_1) \text{ Pa}$  Presión del agua, Supuesto.

$P_w=(1,5 \cdot 101.325)=151.987,5 \text{ Pa}$

$t_{wd1}=36 \text{ °C}$  Temperatura de diseño del agua de Entrada

$t_{wd2}=24 \text{ °C}$  Temperatura de diseño del agua de Salida

$t_{bh_{ad}}=18 \text{ °C}$  Temperatura de diseño de bulbo húmedo del aire de Entrada

Nota: Flujo másico del agua, 2 bombas=10.000 ton/h lo que equivale a 2.778 kg/s, sin embargo el Flujo másico de operación es de 8.000 ton/h=2.222 kg/s

$m_{wd}=2.778 \text{ kg/s}$  (=10.000 ton/h) Flujo másico de diseño del Agua

$m_{w2}=2.222 \text{ kg/s}$  (=8.000 ton/h) Flujo másico del Agua de Salida. Obtenido en la sala de control de la Planta, a través de datos de operación de la bomba.

#### ENTRADA

$t_{a1}=21 \text{ °C}$  Temperatura del Aire de Entrada

$t_{bh_{a1}}=18 \text{ °C}$  Temperatura de bulbo húmedo del Aire de Entrada

Con estos datos obtenidos experimentalmente, se tiene lo siguiente:

$HR_{a1}=0,73$  Humedad Relativa del Aire de Entrada

$\omega_{a1}=0,01135 \text{ kgw/kgas}$  Humedad Específica del Aire de Entrada

$C_{p_{a1}}=1,027 \text{ kJ/(kg °C)}$  Calor específico del aire húmedo

$t_{pr_{a1}}=15,98 \text{ °C}$  Temperatura punto de rocío del Aire de Entrada

$h_{a1}=49,96 \text{ kJ/kg}$  (=h<sub>C</sub>) Entalpía del Aire de Entrada

$\rho_{a1}=1,179 \text{ kg/m}^3$  Densidad del Aire de Entrada

También tenemos:

$veloc_{a1}=5,8 \text{ m/s}$  Velocidad del Aire de Entrada

$altura_1=4,5 \text{ m}$  Altura de Entrada del Aire

$longitud_a=14,64 \text{ m}$  Dimensión menor de Entrada del Aire a la Torre

longitud<sub>b</sub>=58,56 m Dimensión mayor de Entrada del Aire a la Torre

Calculamos:

$A_1 = ((\text{altura}_1 * \text{longitud}_a * 2) + (\text{altura}_1 * \text{longitud}_b * 2)) \text{ m}^2$  Sección de Entrada del Aire

$$A_1 = ((4,5 * 16,64 * 2) + (4,5 * 58,56 * 2)) = 658,8 \text{ m}^2$$

### **SALIDA**

t<sub>a2</sub>=26 °C Temperatura del aire de Salida

t<sub>bh<sub>a2</sub></sub>=25 °C Temperatura de bulbo húmedo del aire de Salida

Con estos datos obtenidos experimentalmente, se tiene lo siguientes:

HR<sub>a2</sub>=0,95 Humedad Relativa del aire de Salida

omega<sub>a2</sub>=0,02025 kgw/kgas Humedad Específica del aire de Salida

t<sub>pr<sub>a2</sub></sub>=25,14 °C Temperatura punto de rocío del aire de Salida

h<sub>a2</sub>=77,79 kJ/kg (=h<sub>D</sub>) Entalpía del aire de Salida

rho<sub>a2</sub>=1,143 kg/m<sup>3</sup> Densidad del aire de Salida

También tenemos:

veloc<sub>a2</sub>=12 m/s Velocidad del aire de Salida

diam<sub>2</sub>= 9,834 m Dimensión de Salida del Aire la Torre

Calculamos:

$A_2 = ((\pi * \text{diam}_2^2 / 4) * 4) \text{ m}^2$  Sección de Salida del Aire

$$A_2 = ((\pi * 9,834^2 / 4) * 4) = 303,8 \text{ m}^2$$

### **FLUJO MASICO DE AGUA**

Se conocen los siguientes datos:

P<sub>w</sub>=151.987,5 Pa

t<sub>w1</sub>=37 °C Temperatura del agua de Entrada

C<sub>p<sub>w1</sub></sub>=4,182 kJ/(kg °C) Calor específico del agua

h<sub>w1</sub>=155,1 (=h<sub>A</sub>) kJ/kg Entalpía del agua de Entrada

t<sub>w2</sub>=23 °C Temperatura del agua de Salida

h<sub>w2</sub>=96,52 (=h<sub>B</sub>) kJ/kg Entalpía del agua de Salida

m<sub>w2</sub>=2.222 kg/s (=8.000 ton/h) Flujo másico del Agua de Salida

m<sub>wpur</sub>= 3,61 kg/s (=13 ton/h) Flujo másico del Agua de purga

Calculamos:

De la ecuación ( 10 )

$$m_{w1}=(m_{w2}-m_{w\text{pur}}) \text{ kg/s} \quad \text{Flujo másico del Agua de Entrada}$$

$$m_{w1}=(2222-3,61)=2.218 \text{ kg/s}$$

De la ecuación ( 12 )

$$m_{w\text{evap}}=(m_{a1}*(\omega_{a2}-\omega_{a1})) \text{ kg/s} \quad \text{Flujo másico del Agua evaporada}$$

$$m_{w\text{evap}}=(2.218*(0,02025-0,01135))=40,09 \text{ kg/s}$$

$$\text{(Teóricamente: } m_{w\text{evap}}=(1,7\%*m_{w1}) \text{ kg/s)}$$

De la ecuación ( 13 )

$$m_{w\text{per}}=(0,001\%*m_{w1})=0,022 \text{ kg/s} \quad \text{Flujo másico del Agua perdida}$$

$$m_{w\text{per}}=(0,00001*2.218)=0,022 \text{ kg/s}$$

$$t_{w\text{per}}=26 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura del agua perdida, Supuesto.}$$

$$h_{w\text{per}}=109 \text{ kJ/kg} \quad \text{Entalpía agua perdida}$$

De la ecuación (11)

$$m_{w\text{rep}}=(m_{w\text{evap}}+m_{w\text{per}}+m_{w\text{pur}}) \text{ kg/s} \quad \text{Flujo másico del Agua de reposición}$$

$$m_{w\text{rep}}=(40,09+0,022+3,61)=43,72 \text{ kg/s}$$

$$t_{w\text{rep}}=20 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura del agua de reposición}$$

$$h_{w\text{rep}}=83,98 \text{ kJ/kg} \quad \text{Entalpía agua de reposición}$$

## **FLUJO MASICO DE AIRE QUE CIRCULA POR LA TORRE, Forma 1**

### **Balance de Energía Global,.**

$$Q_{\text{equipo}}=(m_{w1} * (h_{w1} - h_{w2}))=129.908 \text{ kW} \quad \text{Capacidad del Equipo}$$

De la ecuación ( 16 )

$$m_a = (Q_{\text{equipo}} + m_{w\text{rep}}*h_{w\text{rep}} - m_{w\text{pur}}*h_{w2} - m_{w\text{per}}*h_{w\text{per}}) / (h_{a2} - h_{a1}) \text{ kg/s} \quad \text{Flujo másico del aire de Entrada, calculado por Balance de Energías}$$

$$m_a=(129908- 43,72*83,98- 3,61* 96,52- 0,022*109)/( 77,79 -49,96)=4.789 \text{ kg/s}$$



**FLUJO MASICO DE AIRE QUE CIRCULA POR LA TORRE, Forma 2**

De las siguientes ecuaciones se pueden calcular los flujos másicos del aire:

$m_{a1} = (\rho_{a1} \cdot A_1 \cdot \text{veloc}_{a1}) \text{ kg/s}$  Flujo másico del aire de Entrada

$m_{a1} = (1,179 \cdot 658,8 \cdot 5,8) = 4.503 \text{ kg/s}$

$m_{a2} = (m_{a1} + m_{\text{wevap}}) \text{ kg/s}$  Flujo másico del aire de Salida

$m_{a2} = (4.503 + 40,09) = 4.544 \text{ kg/s}$

La diferencia en el entre  $m_{a1}$  y  $m_a$  se debe a la medición de los datos. Sin embargo, para efectos de cálculos **consideraremos  $m_{a1}$** , por ser la masa más desfavorable.

**9.7- CÁLCULOS EN EL DIAGRAMA DE OPERACIÓN DE UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO.**

Para el diagrama de operación, teniendo los datos de las condiciones de entrada y de salida para el agua y el aire, se puede hacer el cálculo relacionando las masas de los fluidos en estudio.

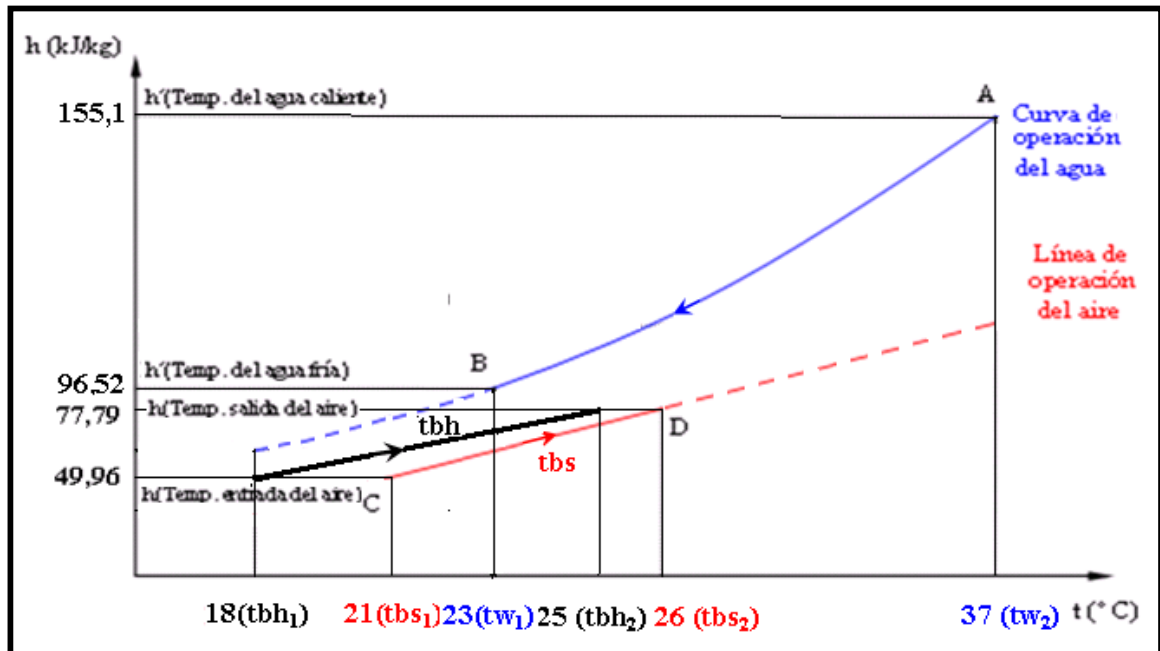


Fig. N° 9.3 Diagrama de Operación de la Torre de Enfriamiento.

Basándose en que:

**Q rechazado por el agua = Q absorbido por el aire**

$$m_w \cdot C_w \cdot \Delta t_w = m_a \cdot \Delta h_a$$

y dejando expresada la relación entre el agua y el aire:

$$m_w / m_a = [ \Delta h_a / (C_{p_w} \cdot \Delta t_w) ]$$

$$m_w / m_a = [ (77,79 - 49,96) / (4,183 \cdot 14) ] = 0,475$$

Este valor se puede calcular a través de la pendiente de la línea de operación del agua en el diagrama.

Por otro lado podemos efectuar una comprobación de la relación L/G, en base a los caudales de dos fluidos calculados anteriormente.

$$m_{w1} / m_a = 2218 / 4503 = 0,492$$

### **CALCULO DE ENERGÍAS INVOLUCRADAS**

Con los siguientes datos tenemos  $h_{am}$ :

$$t_{a2} = 26 \text{ °C}$$

$$P_1 = 101.325 \text{ Pa}$$

$$\omega_{a1} = 0,01135 \text{ kgw/kgas}$$

$$h_{am} = 55,10 \text{ kJ/kg}$$

**Calor absorbido por el aire**

De la ecuación ( 6 )

$$Q_{\text{sensible}_a} = (m_{a1} \cdot (h_{am} - h_{a1})) \text{ kW Calor sensible}$$

$$Q_{\text{sensible}_a} = (4.503 \cdot (55,10 - 49,96)) = 23.132 \text{ kW, (18,5\% de } Q_{\text{total}_a})$$

De la ecuación ( 7 )

$$Q_{\text{latente}_a} = (m_{a1} \cdot (h_{a2} - h_{am})) \text{ kW Calor latente}$$

$$Q_{\text{latente}_a} = (4.503 \cdot (77,79 - 55,10)) = 102.161 \text{ kW, (81,5\% de } Q_{\text{total}_a})$$

De la ecuación ( 5 )

$$Q_{\text{total}_a} = (m_{a1} \cdot (h_{a2} - h_{a1})) \text{ kW Calor Total}$$

$$Q_{\text{total}_a} = (4.503 \cdot (77,79 - 49,96)) = 125.293 \text{ kW}$$

**Calor rechazado por el agua**

De la ecuación ( 8 )

$$Q_{\text{enfensens}_w} = (m_{w1} \cdot (h_{w1} - h_{w2})) \text{ kW Calor por enfriamiento sensible, Capacidad del Equipo}$$

$$Q_{\text{enf}} = (2.218 * (155,1 - 96,52)) = 129.908 \text{ kW}$$

La diferencia entre  $Q_{\text{total}_a}$  y  $Q_{\text{enf}} = 129.908 \text{ kW}$ , indica que no todo el calor que rechaza el agua lo absorbe el aire, se producen pérdidas al ambiente.

## 9.8- RESULTADOS.

### 9.8.1- CAPACIDAD O CARGA TÉRMICA DEL EQUIPO.

La capacidad está calculada en función del calor rechazado por el agua.

#### CAPACIDADES IDEALES

Si una torre de enfriamiento está operando en forma ideal, significa que la mínima temperatura que puede alcanzar el agua fría es la de bulbo húmedo del ambiente.

#### CAPACIDAD O CARGA TERMICA DEL EQUIPO

$m_{\text{wd}} = 2.778 \text{ kg/s}$  (=10.000 ton/h) Flujo másico de diseño del Agua

$Q_{\text{in}} = (m_{\text{wd}} * C_{p_{\text{w1}}} * (t_{\text{wd1}} - t_{\text{bh}_{\text{ad}}})) \text{ kW}$  Capacidad Ideal Nominal

$$Q_{\text{in}} = (2.778 * 4,182 * (36 - 18)) = 209.138 \text{ kW}$$

$Q_{\text{io}} = (m_{\text{w1}} * C_{p_{\text{w1}}} * (t_{\text{w1}} - t_{\text{bh}_{\text{ad}}})) \text{ kW}$  Capacidad Ideal de Operación

$$Q_{\text{io}} = (2.218 * 4,182 * (37 - 18)) = 176.287 \text{ kW}$$

$Q_{\text{no}} = (m_{\text{wd}} * C_{p_{\text{w1}}} * (t_{\text{wd1}} - t_{\text{wd2}})) \text{ kW}$  Capacidad Nominal

$$Q_{\text{no}} = (2.778 * 4,182 * (36 - 24)) = 139.425 \text{ kW}$$

$Q_{\text{op}} = (m_{\text{w1}} * C_{p_{\text{w1}}} * (t_{\text{w1}} - t_{\text{w2}})) \text{ kW}$  Capacidad de Operación

$$Q_{\text{op}} = (2.218 * 4,182 * (37 - 23)) = 129.896 \text{ kW}$$

### 9.8.2- RENDIMIENTO DEL EQUIPO.

Comparando la *capacidad de operación* y la *capacidad nominal* tenemos:

$\text{Rend} = ((Q_{\text{op}} / Q_{\text{no}}) * 100) \%$  Rendimiento del Equipo

$$\text{Rend} = ((Q_{\text{op}} / Q_{\text{no}}) * 100) = 93,2 \%$$

Por lo anterior se puede decir que la torre de enfriamiento en estudio está operando a un 93% de su capacidad, lo cual refleja un buen rendimiento, ya que estos equipos poseen altos niveles de eficiencia ( 80 - 90% ).

A continuación se presenta, en la Carta Sicrométrica (Fig. N° 9.5), los estados de entrada, salida y el proceso del aire húmedo.

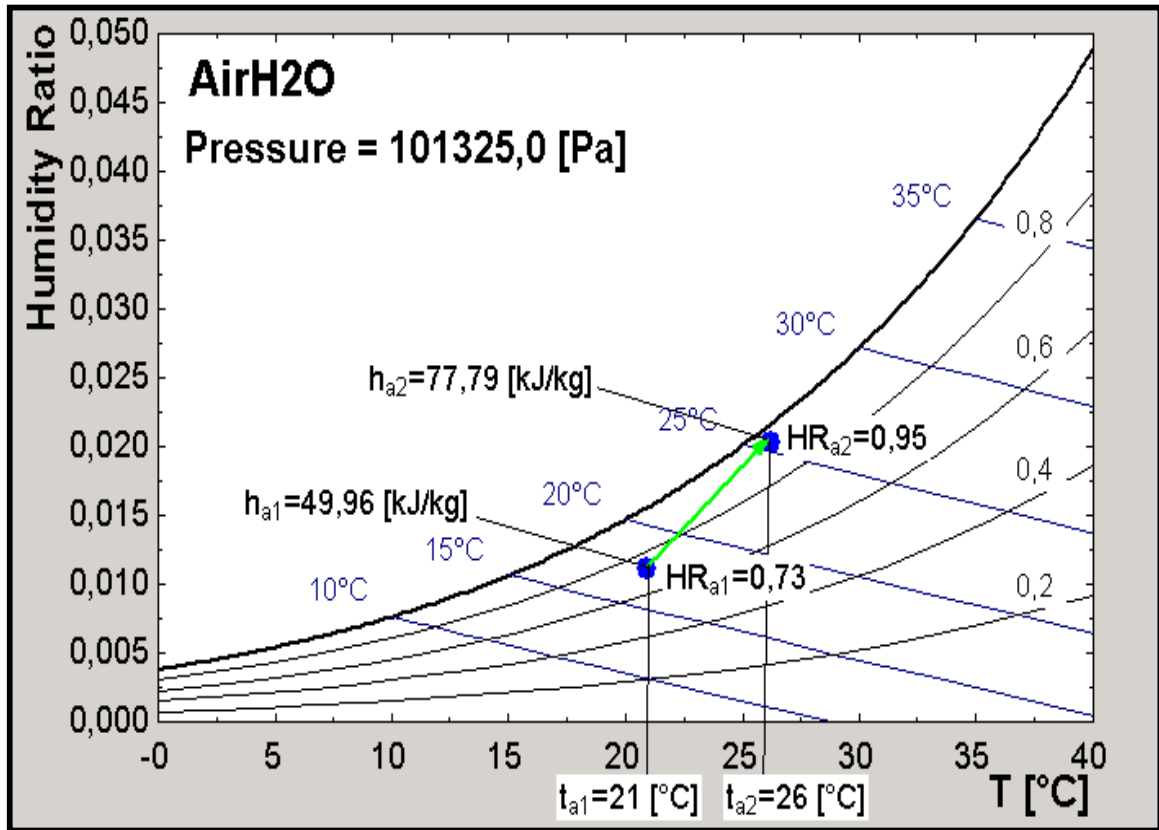


Fig. N° 9.4 Carta Sicrométrica con el proceso del aire húmedo.

**9.9- COMENTARIOS.**

Generalmente los usuarios compran las torres de enfriamiento en lugar de construirlas ellos mismos. Esto es, sin duda, la política más acertada, ya que hace posible aprovechar la experiencia práctica que el fabricante dispone en este campo y que es de gran valor. El usuario especificará la cantidad de agua y el rango de temperatura que se requiere para su proceso. El fabricante propondrá la torre que cumpla con las condiciones impuestas por el usuario para el 5% de bulbo húmedo en la localidad de la planta y se garantizará la potencia del ventilador que se suministra.

El tamaño de una torre de tiro inducido está en función de:

1. Intervalo de enfriamiento (  $t_{w1} - t_{w2}$  ).
2. Diferencia útil de temperatura (  $t_{w2} - t_{bh_{a1}}$  ).
3. Cantidad de agua que se quiere enfriar.
4. Temperatura de bulbo húmedo.
5. Velocidad del aire a la entrada de la torre.
6. Altura del orificio de entrada del aire a la torre.

La velocidad de transferencia de calor y la eficiencia en un enfriamiento evaporativo dependen de:

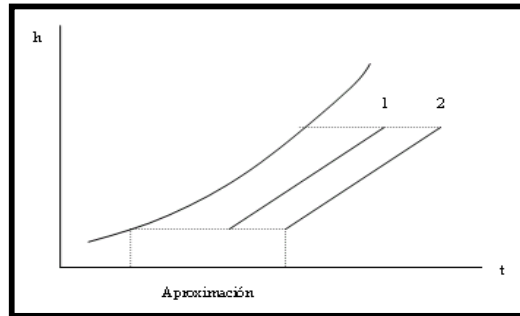
1. El área de superficie de contacto entre el agua y el aire.
2. La velocidad relativa entre el aire y el agua durante el tiempo de contacto.
3. El tiempo de contacto entre los fluidos.
4. Diferencia entre la temperatura de bulbo húmedo y la temperatura del agua de salida de la torre.

NOTA: Los comentarios siguientes, están basados en el diagrama de operación de una torre de enfriamiento, por lo que se fundamentarán en forma gráfica.

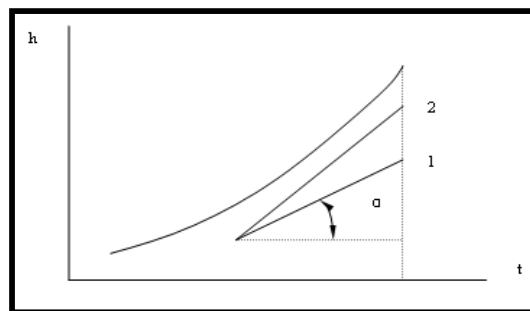
**FACTORES QUE INFLUYEN EN UNA TORRE.****INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN.**

**Aproximación.** La aproximación es la diferencia entre la temperatura del agua fría y la de bulbo húmedo del aire que entra en la torre y que la mínima temperatura

que puede alcanzar el agua, en forma ideal, es la de bulbo húmedo. Por lo tanto, a menor aproximación, mayores deben ser las dimensiones de la torre para aumentar la misma capacidad de enfriamiento.



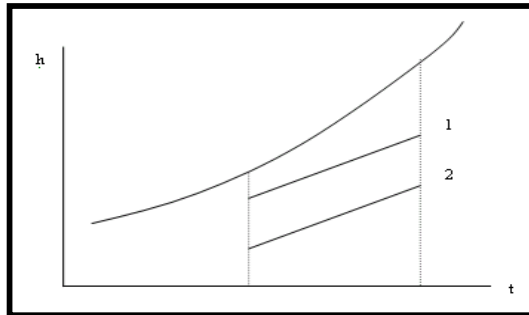
**Relación agua / aire.** Un aumento del flujo de agua o una disminución del aire, se refleja en un aumento del cociente entre ambos, con esto se disminuye la diferencia de entalpía entre el líquido y el aire, lo que implica una disminución en el potencial y en consecuencia una mayor dimensión de la torre.



Si el tiempo de contacto es insuficiente, ningún incremento en la relación agua/aire, generará el enfriamiento deseado. Por lo tanto es necesario mantener cierta altura y espesor en el relleno de las torres de enfriamiento.

### **INFLUENCIA DE LAS VARIABLES ATMOSFÉRICAS.**

**Humedad relativa del aire.** Al disminuir la humedad relativa del aire sobre las mismas condiciones de enfriamiento, esto se manifiesta en una disminución de la entalpía del aire, aumentando la diferencia de entalpía entre el líquido y el aire, disminuyendo así las dimensiones de la torre.



Una influencia importante en el descenso de la humedad relativa del aire, es que aumenta el tiraje dentro de las torres. Esto se debe a un aumento en el peso específico del aire produciendo una diferencia de peso específico mayor. Por lo tanto, climas húmedos y fríos hacen que se tengan propiedades óptimas para el tiraje en las torres de tiro natural, donde su eficiencia está condicionada por estas dos variables.

**Temperatura de bulbo húmedo.** Mientras mayor sea la diferencia entre las temperaturas de bulbo seco y húmedo del ambiente, mayor será la capacidad de absorción del aire. Como en determinadas localidades la temperatura de bulbo húmedo varía durante el año, alcanzando su máximo valor sólo en contadas ocasiones, resultaría antieconómico diseñar la torre para las temperaturas de bulbo húmedo máximas, es por ello, que se debiera tomar un valor medio representativo.

### **INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN.**

**Ubicación.** La ubicación de la torre y la orientación queda determinada por las siguientes condiciones:

- Situar la torre para que el aire no tenga posibilidad de recirculación.
- La ubicación de la torre, lejos de las fuentes de calor o de aire contaminado.
- Los vientos no sean agentes removedores de tierra y polvo.

**Interferencia.** La interferencia de las torres de enfriamiento hace aumentar la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra en al torre, haciendo disminuir a su vez la temperatura del agua fría que sale de la misma.

## **CAPITULO X MODIFICACION Y CALCULOS ESTIMATIVOS DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE PETROPOWER Energía Ltda.**



ESINDUS, S.A. ha sido solicitada por FOSTER WHEELER IBERIA S.A. para reformar la torre de enfriamiento del complejo PETROPOWER S.A. en Thno, Chile y reducir el impacto visual del penacho existente.

### **10.1- DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE REFORMA**

La reforma consiste en introducir en las caras de entrada de aire de la torre de enfriamiento existente, encima de la parte húmeda (relleno, distribución de agua, separadores de gotas), un intercambiador seco y mezcladores de aire. De esta forma, una parte del aire ambiente entrando en de la torre se calentará sin humidificarse. La mezcla de este aire seco y del aire húmedo, encima de los separadores de gotas, permitirá eliminar el penacho en salida de la torre.



Fig N° 10.1 Operación con y sin Penacho.



Esta reforma necesita:

- **Aumentar la altura de la plataforma:**

Ampliación de la estructura de la torre así como de las paredes interiores, cortavientos y cerramiento exterior, y modificación de la escalera de acceso a la plataforma. La nueva altura de plataforma será de 12,90 m, aumentando, entonces, 2,30 m.

- **Instalar el intercambiador seco:**

Montaje de un castillete adicional en las caras de entrada de aire para el soporte del intercambiador, modificación de los colectores de agua caliente, instalación y conexión de bombas booster, instalación de los haces tubulares e instalación de persianas motorizadas para cerrar la entrada de aire seco.

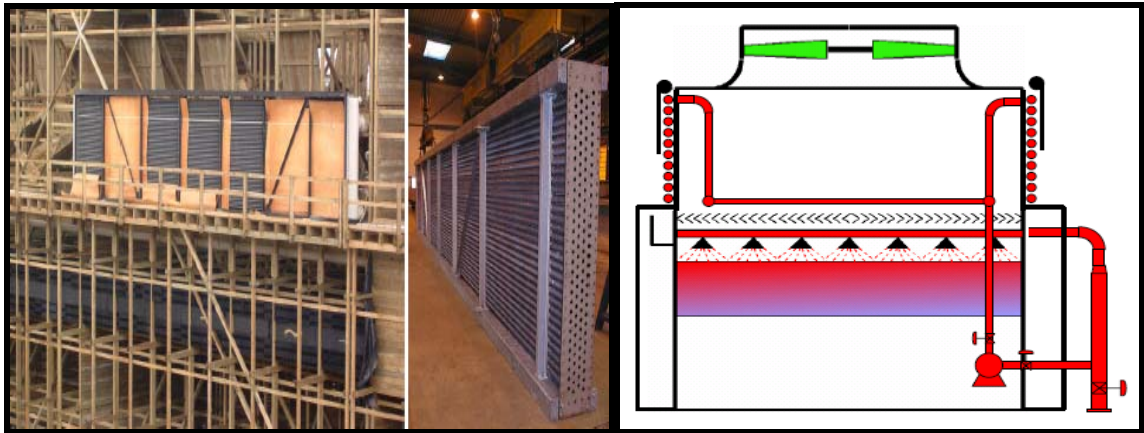


Fig N° 10.2 Torre de Enfriamiento con intercambiadores

- **Instalar mezcladores de aire:**

Entre los separadores de gotas y los ventiladores. Se conservarán los equipos existentes siguientes: planchas de la plataforma, barandillas, chimeneas, equipos mecánicos. Su desmontaje deberá ser no destructivo.

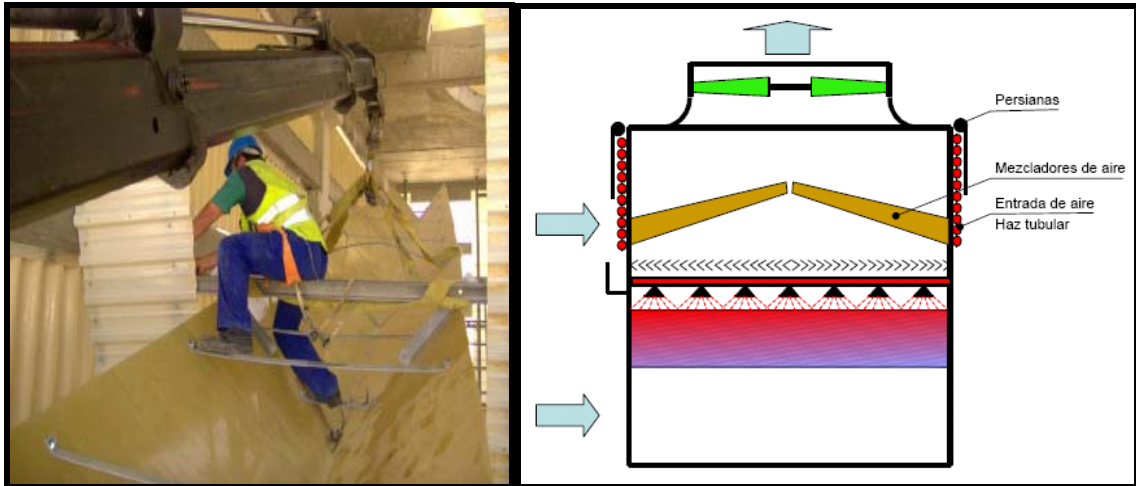


Fig N° 10.3 Mezcladores de Aire

## 10.2- DESMONTAJE NO DESTRUCTIVO

**a). chimeneas:** Para asegurar una operación eficiente de los ventiladores, cada celda incorpora una chimenea en la plataforma. Las chimeneas son de madera.

Alcance:

- Desmontaje no destructivo de las chimeneas.
- Comprobación de estado de materiales.
- Limpieza de las chimeneas.
- Movimientos y almacenamientos de materiales.

**b). Grupos mecánicos:** El equipo mecánico consta de un reductor de ejes perpendiculares conectado a un motor eléctrico con un eje motriz y, en el eje de salida, a un ventilador axial. Guardas, tuberías de lubricación de aceite e interruptores de vibración forman parte del paquete mecánico.

Para alinear adecuadamente el reductor y el motor en la estructura de madera, ambos van montados sobre un único bastidor en acero galvanizado.

Todas las tuberías de lubricación y venteo están tiradas desde el reductor a través de la chimenea hasta la plataforma, de modo que el servicio de inspección y llenado se pueda hacer desde el exterior de la torre.

Alcance:

- Desmontaje no destructivo de las guardas de los motores.
- Desmontaje no destructivo de las cajas de conexión y del cableado del interruptor de vibración, nivel de aceite e interruptor de temperatura.
- Desmontaje no destructivo de las palas de los ventiladores.
- Desmontaje no destructivo del bastidor de acero.
- Desmontaje no destructivo de las tapas y pasarelas de acceso.
- Comprobación de estado de materiales.
- Limpieza de materiales.
- Movimientos y almacenamientos de materiales.

**c). Plataforma y barandilla:** La plataforma está cubierta con planchas de madera. La barandilla es de madera. Está fijada a los postes de madera de la estructura de la torre.

Alcance:

- Desmontaje no destructivo de las barandillas,
- Desmontaje no destructivo de la planchas de madera,
- Comprobación de estado de materiales,
- Limpieza de materiales,
- Movimientos y almacenamientos de materiales.

### **10.3- MONTAJE**

#### **a). Estructura, particiones y cortavientos adicionales, acceso modificado, plataforma y barandillas existentes**

Alcance:

- Descarga y movimiento de materiales.
- Comprobación de materiales (estado, cantidad y registro).
- Montaje de los pórticos adicionales en el suelo.
- Elevación de los pórticos del castillete para el soporte del intercambiador seco.
- Levantamiento de la estructura prolongada y acoplamiento a la existente.
- Montaje de las particiones y cortavientos adicionales.
- Modificación de la escalera de madera.
- Montaje de la plataforma del castillete de la sección híbrida.
- Montaje de la plataforma de cubierta.
- Instalación de las barandillas de plataforma.

Especificación de montaje:

Todos los elementos de madera son prefabricados, es decir que son cortados y taladrados antes que de ser tratados. La madera empleada será de tipo Baltic Redwood.

Las columnas de elevación de la plataforma se apoyarán sobre las columnas existentes mediante casquillos de acero galvanizado. El castillete de soporte del intercambiador seco será anclado en fundaciones de hormigón. Las diagonales estarán unidas a las columnas mediante conectores.

#### **b). Sección híbrida**

En modo de operación sin penacho (invierno), aire ambiente entra en la parte alta de la torre a través de un intercambiador seco. Persianas motorizadas permiten cerrar esta entrada de aire en modo de operación húmedo (verano).

Los haces tubulares son de acero inoxidable con aletas de aluminio.

Dentro de la torre, se disponen mezcladores de aire en madera y poliéster, que permiten optimizar la mezcla del aire seco y del aire húmedo.

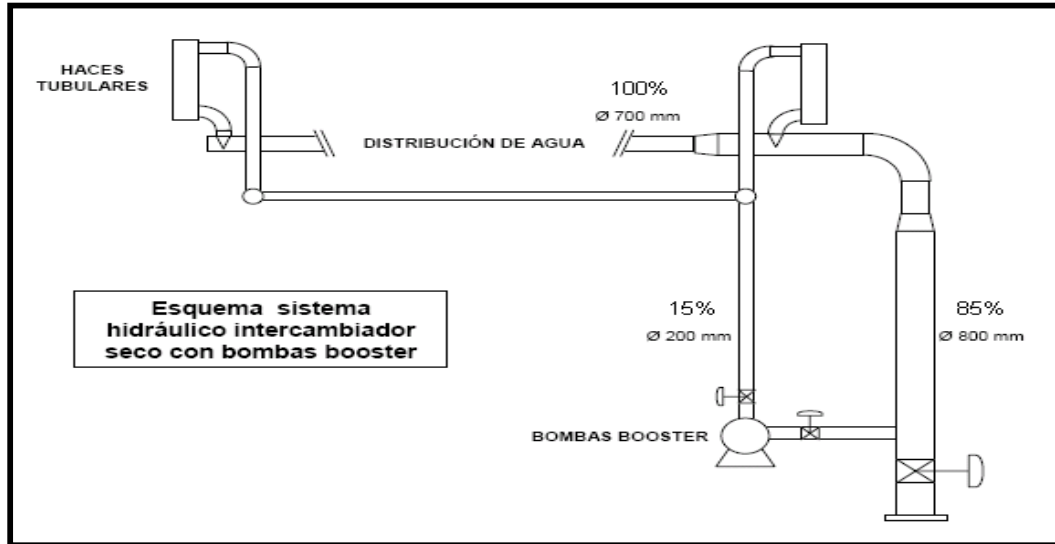


Fig N° 10.4 Esquema sistema hidráulico intercambiador.

La alimentación en agua caliente es derivada del colector principal mediante bombas booster. En salida del intercambiador, se devuelve el agua al sistema de distribución de agua de la sección húmeda.

Alcance:

- Descarga y movimiento de materiales,
- Comprobación de materiales (estado, cantidad y registro),
- Modificación de los colectores,
- Ensamblaje y instalación de los mezcladores de aire,
- Instalación de los haces tubulares y de las cajas de agua,
- Instalación, alineamiento y conexión de las bombas booster.

Especificación de montaje:

Los mezcladores de aire y las persianas motorizadas se reciben desmontados y en cajas cerradas. Durante la recepción, se limitará a la comprobación visual de la carga. Durante el montaje se verificará que las piezas más delicadas no han sufrido daños. En caso de que haya sido así se anotarán y repondrán o repararán las piezas dañadas.



Fig N° 10.5 Sección Híbrida

Se empleará un camión grúa jet que permite introducir los mezcladores en V con mayor facilidad que una grúa normal. Los mezcladores planos serán fijados con tornillos auto-taladrantes en obra. Las uniones de los mezcladores en V con los mezcladores planos se realizarán dentro de la torre.

Los haces se almacenarán en una superficie plana, compactada, horizontal y seca para evitar cualquier deformación de las estructuras. Su instalación requiere dos grúas y una viga de elevación especial (IPE 400).

Para el montaje del sistema de bombas booster, se montará primero el tramo de tubería que se encuentra entre el riser y la bomba booster, con su válvula y su junta de dilatación. El anclaje de la bomba se hará con pernos de expansión y se proseguirá el montaje de la tubería hasta alcanzar los haces tubulares, comprobando que las bridas de entrada y de salida quedan totalmente paralelas y concéntricas. Se colocarán todos los soportes de las tuberías. El alineamiento correcto del conjunto bomba-motor será verificado después de su instalación y antes de su puesta en marcha.

### **c). Cerramiento exterior adicional**

Alcance:

- Descarga y movimiento de materiales,
- Comprobación de materiales (estado, cantidad y registro),
- Montaje de esquinas, soportes de cerramiento, recorte y sellado con silicona, espuma de poliuretano o similar de las zonas recortadas para sujeción de la escalera, paso de colectores, colocación de soportes varios y ménsulas.

Especificación de montaje:

Las láminas de cerramiento en poliéster instaladas estarán solapadas de modo que el agua quede retenida dentro de la torre.

Se utilizarán las remachadoras adecuadas. Los remaches instalados incorrectamente serán extraídos y reinstalados asegurándose del correcto sellado del cerramiento.

El taladro sobre la plancha de cerramiento será el menor posible. No obstante se reemplazarán las brocas con la suficiente frecuencia como para evitar que el taladro sea demasiado pequeño debido al desgaste de la broca y sea necesario golpear demasiado fuerte los tacos para introducirlos en el taladro.

Se tomarán todas las precauciones posibles para evitar contaminaciones de los materiales inoxidable.

### **d). Grupos mecánicos**

Alcance

- Descarga y comprobación de materiales (si se precisa),
- Movimiento de materiales,
- Montaje de los bastidores con el motor, el eje, el reductor y el ventilador,
- Comprobación del alineamiento,
- Colocación de guardas de los motores,
- Colocación de las tapas y pasarelas de acceso.

Especificación de montaje:

Las palas podrán ser montadas en los ventiladores en el suelo o una por una en la torre, según las condiciones de trabajo en el sitio.

Se colocarán motor, eje y reductor calzándolos y alineándolos adecuadamente.

El reductor llevará calado el ventilador con el ángulo de palas inicial.

### e). Chimeneas

#### Alcance

- Descarga y comprobación de materiales (si se precisa),
- Movimiento de materiales,
- Montaje, centrado, sellado de los gajos con espuma, silicona o similar,
- Colocación de arandelas de seguridad,
- Colocación de los anclajes de las chimeneas,
- Limpieza de las chimeneas.

#### Especificación de montaje

La chimenea se centrará evitando diferencias de más de dos centímetros entre dos puntos diferentes de la circunferencia total. Se recomienda instalar las chimeneas después el montaje de los ventiladores.

Una vez centrada se fijará lo antes posible para impedir que el viento excesivo pueda provocar un incidente que ponga en peligro la integridad de las personas y de las cosas.

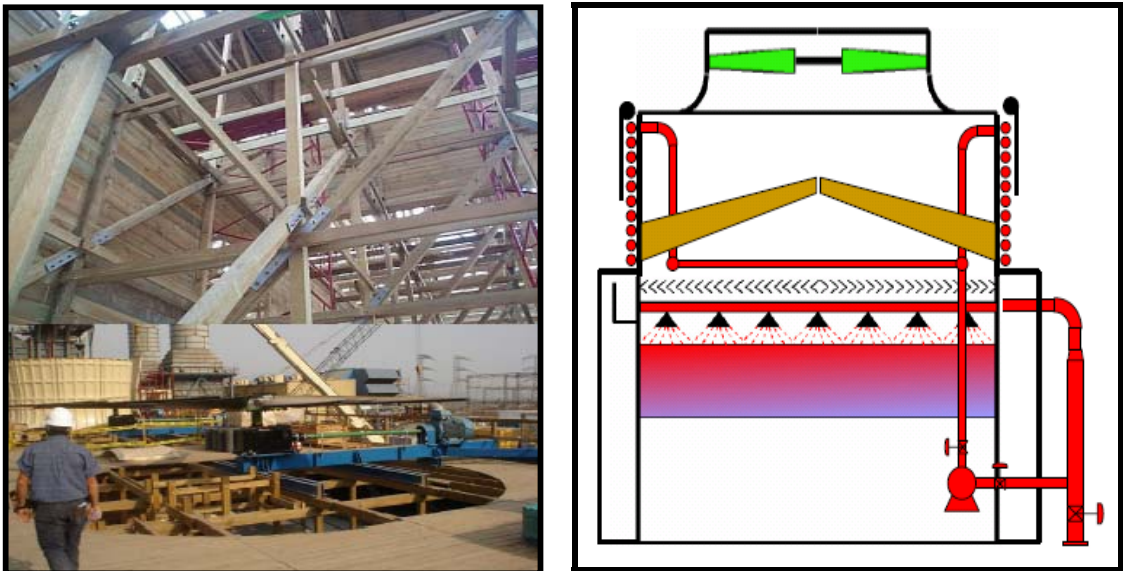


Fig Nº 10.6 Chimenea y Estructura.

La puesta en marcha se realizará inmediatamente después de terminar el montaje. Durante la puesta en marcha se requerirá medios auxiliares necesarios tales como andamios o cestas para la revisión de los elementos de la torre.



#### **10.4- EVALUACION TEORICA DEL COMPORTAMIENTO SICROMETRICO, DE LA REFORMA A LA TORRE DE ENFRIAMIENTO DE PETROPOWER S.A,**

ESINDUS S.A. determinó los siguientes datos para la reforma de la torre:

<b>ESPECIFICACION TORRE SIN PENACHO</b>	<b>DATOS</b>
Flujo agua de diseño circulación	10.000 ton/h
Temperatura agua diseño entrada	36 °C
Temperatura agua diseño salida	24 °C
Temperatura bulbo húmedo diseño aire entrada	18 °C
Presión barométrica aire	1,033 mbar
Masa de agua evaporada	1,4% agua entrada
Masa de agua perdida	< 0,001 % agua entrada
Total bombas booster	1 por celda (4)
Aumento altura torre	2,3 m
Altura hasta plataforma	12,9 m
Altura total torre	14,9 m
Estructura adicional	Redwood Baltic
Nº Intercambiadores secos	2 por celda (8)
Tubos intercambiador	Acero Inoxidable
Cajas de agua	FVRP (Fibra de vidrio reforzada con poliéster)
Mezcladores de aire	Madera, FVRP

NOTA: Además, todos los datos, dimensiones del intercambiador y de los tubos de éste, están bajo suposiciones, ya que no existe la información detallada en planos para este estudio. La información utilizada para los cálculos, se obtuvo de los planos de torres similares reformadas por Esindus para otras empresas.

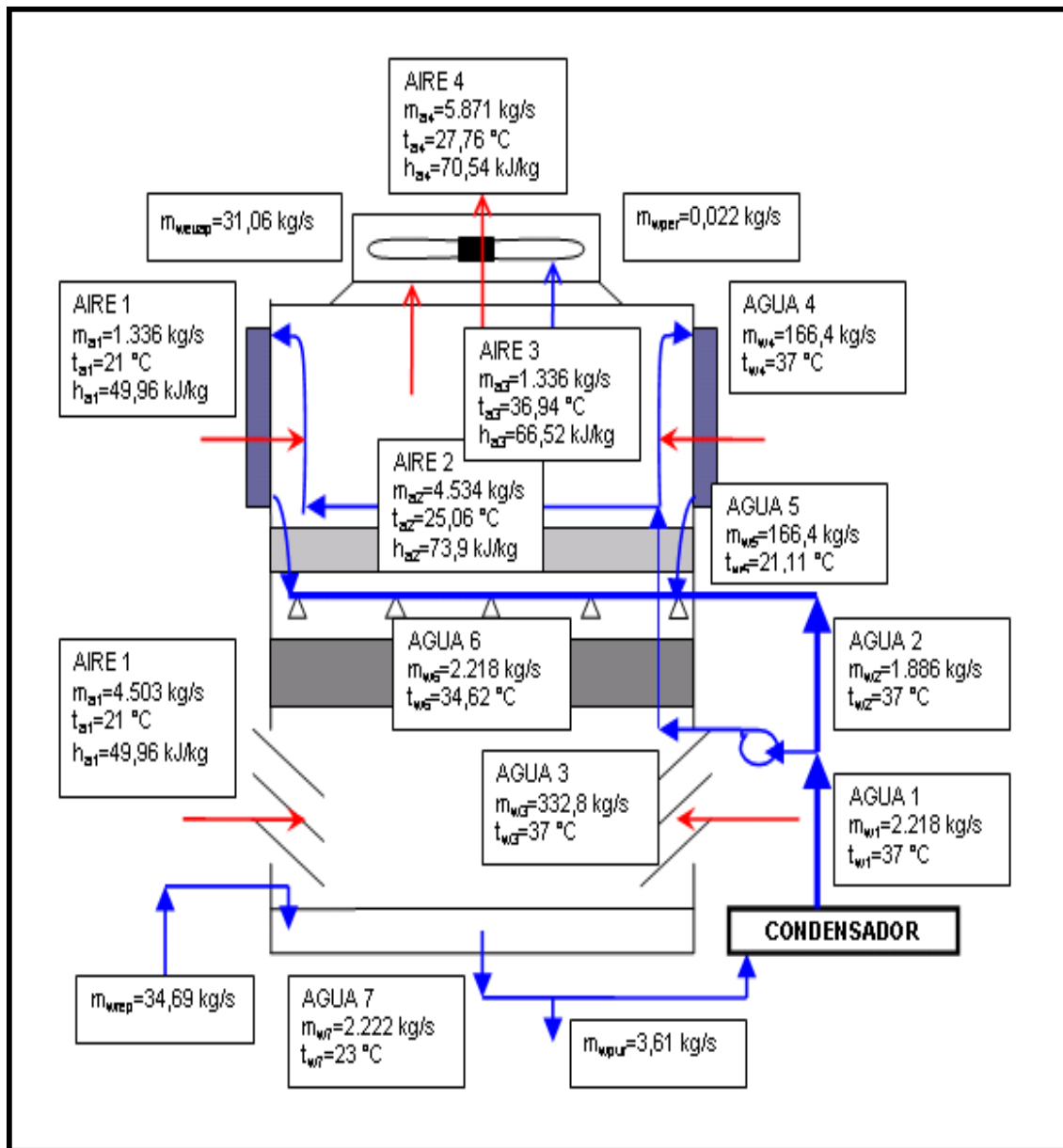


Fig N° 10.7 Esquema de Reforma de la Torre de Enfriamiento.

**DATOS PARTE INFERIOR**

$P_1=101.325 \text{ Pa}$  (=1,033 bar) Presión Atmosférica

$t_{a1}=21 \text{ °C}$  Temperatura del Aire de Entrada

$HR_{a1}=0,73$  Humedad Relativa del Aire de Entrada

$t_{bh_{a1}}=18 \text{ °C}$  Temperatura bulbo Húmedo del Aire de Entrada

En base a los datos proporcionados anteriormente, se tienen las siguientes propiedades:

$\omega_{a1}=0,01135 \text{ kgw/kgas}$  Humedad Específica del Aire de Entrada

$C_{p_{a1}}=1,027 \text{ kJ/(kg °C)}$  Calor específico del Aire de Entrada

$t_{pr_{a1}}=15,98 \text{ °C}$  Temperatura punto de rocío del Aire de Entrada

$h_{a1}=49,96 \text{ kJ/kg}$  Entalpía del Aire de Entrada

$\rho_{a1}=1,179 \text{ kg/m}^3$  Densidad del Aire de Entrada

Además se tienen los siguientes datos:

$veloc_{a1}=5,8 \text{ m/s}$  Velocidad del Aire de Entrada

$altura_1=4,5 \text{ m}$  Altura de Entrada inferior del Aire

$longitud_a=14,64 \text{ m}$  Dimensión menor de Entrada inferior del Aire a la Torre

$longitud_b=58,56 \text{ m}$  Dimensión mayor de Entrada inferior del Aire a la Torre

Calculando, tenemos:

$A_{1inf}=( ( altura_1 * longitud_a * 2 ) + ( altura_1 * longitud_b * 2 ) ) \text{ m}^2$  Sección de Entrada del Aire inferior

$A_{1inf} = ( ( 4,5 * 14,64 * 2 ) + ( 4,5 * 58,56 * 2 ) ) = 658,8 \text{ m}^2$

$m_{a1\_inf} = ( \rho_{a1} * A_{1inf} * veloc_{a1} ) \text{ kg/s}$  Flujo másico del Aire de Entrada inferior

$m_{a1\_inf} = ( 1,179 * 658,8 * 5,8 ) = 4.503 \text{ kg/s}$

**DATOS Y CALCULOS DEL AGUA DE CIRCULACION**

$m_{wr7}=2.222 \text{ kg/s}$  (=8.000 ton/h) Flujo másico del Agua de Salida

$m_{wrpur}=3,61 \text{ (kg/s)}$  (=13 ton/h) Flujo másico del Agua de purga

$m_{wr1} = ( m_{wr7} - m_{wrpur} ) \text{ kg/s}$  Flujo másico del Agua de Entrada

$m_{wr1} = ( 2.222 * 3,61 ) = 2.218 \text{ kg/s}$

Según Fig. N° 10.4 y Fig. N° 10.7, se tiene:

$m_{wr2} = ( 0,85 * m_{wr1} ) \text{ kg/s}$  Flujo másico del Agua

$m_{wr2} = ( 0,85 * 2.218 ) = 1.886 \text{ kg/s}$

$m_{wr3} = ( 0,15 * m_{wr1} ) \text{ kg/s}$  Flujo másico del Agua a intercambiadores

$$m_{wr3}=(0,15*2.218)=332,8 \text{ kg/s}$$

$$m_{wr4}=(0,5* m_{wr3}) \text{ kg/s} \text{ Flujo másico del Agua a un intercambiador}$$

$$m_{wr4}=(0,5*332,8)=166,4 \text{ kg/s}$$

$$m_{wr5}= m_{wr4}=166,4 \text{ kg/s} \text{ Flujo másico del Agua}$$

$$m_{wr6}=(2* m_{wr5})+ m_{wr2} \text{ kg/s} \text{ Flujo másico del Agua}$$

$$m_{wr6}=(2*166,4)+1.886)=2.218 \text{ kg/s}$$

Según Esindus, se tiene:

$$m_{wrevap}=(0,014* m_{wr6}) \text{ kg/s} \text{ Flujo másico del Agua evaporada}$$

$$m_{wrevap} =(0,014*2.218)=31,06 \text{ kg/s}$$

$$m_{wrper}=(0,00001* m_{wr6}) \text{ kg/s} \text{ Flujo másico del Agua perdida}$$

$$m_{wrper} =(0,00001*2.218)=0,022 \text{ kg/s}$$

$$m_{wrrep}=( m_{wrevap} + m_{wrper} + m_{wrpur}) \text{ kg/s} \text{ Flujo másico del Agua de reposición}$$

$$m_{wrrep} =(31,06+0,022+3,61)=34,69 \text{ kg/s}$$

Se tiene:

$$t_{w1}=37 \text{ °C} \text{ Temperatura del Agua de Entrada}$$

$$t_{w7}=23 \text{ °C} \text{ Temperatura del Agua de Salida}$$

Y por lo tanto:

$$t_{w2}=37 \text{ °C} \text{ Temperatura del Agua}$$

$$t_{w3}=37 \text{ °C} \text{ Temperatura del Agua}$$

$$t_{w4}=37 \text{ °C} \text{ Temperatura del Agua}$$

La información utilizada para los cálculos del intercambiador de calor, se obtuvo de los planos de torres similares reformadas por Esindus S.A., para otras empresas, por no existir el plano de detalle respectivo.

#### INTERCAMBIADORES DE CALOR

Tubos de Acero inoxidable 36% Ni, Espesor Schedule 10=2,77 mm

$$d_{nom\_tubo}=38,1 \text{ mm} (=1 \frac{1}{2} \text{ pulg})$$

$$d_{ext\_tubo}=0,0483 \text{ m} (=48,3 \text{ mm}) \text{ Diámetro Exterior de los tubos del intercambiador}$$

$$e_{tubo}=0,00277 \text{ m} (=2,77 \text{ mm}) \text{ Espesor de los tubos del intercambiador}$$

$$d_{int\_tubo}=( d_{ext\_tubo} -(2* e_{tubo})) \text{ m} \text{ Diámetro Interior de los tubos del intercambiador}$$

$$d_{int\_tubo} =(0,0483-(2*0,00277))=0,04276 \text{ m}$$

$r_1=(d_{int\_tubo}/2)$  m Radio Interior de los tubos del intercambiador

$$r_1=(0,04276/2)=0,02138 \text{ m}$$

$r_2=(d_{ext\_tubo}/2)$  m Radio Exterior de los tubos del intercambiador

$$r_2=(0,0483/2)=0,02415 \text{ m}$$

$\lambda_{cañ}=16,3$  W/(m K) Conductividad del Acero Inoxidable 36% Ni

$N_{tubos}=122$  tubos Número de tubos

$L_{tubos}=12,7$  m Largo de los tubos

$N_{intercam}=8$  intercambiadores Número de intercambiadores

$L_{tubos\_eq}=(N_{intercam}*L_{tubos})$  m Largo de tubos equivalente

$$L_{tubos\_eq}=(8*12,7)=101,6 \text{ m}$$

Cálculo  $\alpha_w$ , Flujo por interior de cañería

Propiedades físicas:

$$t_f=(0,5*(t_{pw} + (0,5*(t_{ew} + t_{sw})))) \text{ } ^\circ\text{C} \text{ Temperatura film (Referencia)}$$

$$t_{ew} = t_{w4} = 37 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ Temperatura de Entrada del Agua}$$

$$t_{pw} = 28 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ Temperatura de la pared}$$

$$t_{sw} = 33 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ Temperatura de Salida del Agua}$$

$$t_f = (0,5*(28 + (0,5*(37 + 33)))) = 31,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$P_w = (1,5*P_1) \text{ (} P_{prueba_{max}} = 10 \text{ Pa, Presión del Agua, Supuesto)}$$

$$P_w = (5*101.325) = 151.987,5 \text{ Pa}$$

Con lo que se tienen las siguientes propiedades;

$$\rho_w = 995,2 \text{ kg/m}^3 \text{ Densidad del Agua}$$

$$C_{p_w} = 4,183 \text{ kJ/(kg } ^\circ\text{C)} \text{ Calor específico del agua}$$

$$\lambda_w = 0,6179 \text{ W/(m K)} \text{ Conductividad del Agua}$$

$$\mu_w = 0,000773 \text{ kg/ms} \text{ Viscosidad Dinámica del Agua}$$

$$\nu_w = (\mu_w / \rho_w) \text{ m}^2/\text{s} \text{ Viscosidad Cinemática del Agua}$$

$$\nu_w = (0,000773/995,2) = 7,766\text{E-}07 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr_w = 5,232 \text{ Prandtl del Agua}$$

Además:

$$m_{wr1} = 2.222 \text{ kg/s} \text{ (= 8.000 ton/h)} \text{ Flujo másico del Agua de Entrada a la Torre}$$

$$m_{winterc} = (0,15*m_{wr1}) \text{ kg/s} \text{ Flujo másico del Agua a intercambiadores}$$

$$m_{winterc} = (0,15*2.222) = 332,8 \text{ kg/s}$$

$$A_{tubo} = (\pi*d_{int\_tubo}^2 / 4) \text{ m}^2 \text{ Área interior tubos}$$

$$A_{\text{tubo}} = (\pi * 0,04276^2 / 4) = 0,001436 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{tubostotal}} = (N_{\text{tubos}} * A_{\text{tubo}}) \text{ m}^2 \quad \text{Área interior tubos total}$$

$$A_{\text{tubostotal}} = (122 * 0,001436) = 0,1752 \text{ m}^2$$

$$\text{veloc}_w = (m_{\text{winterc}} / (\rho_w * A_{\text{tubostotal}})) \text{ m/s} \quad \text{Velocidad del Agua}$$

$$\text{veloc}_w = (332,8 / (995,2 * 0,1752)) = 2 \text{ m/s}$$

$$Re_w = ((\text{veloc}_w * d_{\text{int\_tubo}}) / \nu_w) \quad \text{Reynolds del Agua}$$

$$Re_w = ((2 * 0,04276) / 7,766E-07) = 105.079$$

Como: Prandtl del Agua,  $1,5 < Pr_w < 500$

$$Nuss_w = (0,012 * (Re_w^{0,87} - 280) * Pr_w^{0,4} * (1 + (d_{\text{int\_tubo}} / L_{\text{tubos}})^{2/3}))$$

$$Nuss_w = (0,012 * (105.079^{0,87} - 280) * 5,232^{0,4} * (1 + (0,04276 / 12,7)^{2/3}))$$

$$Nuss_w = 549,3$$

$$\alpha_w = ((Nuss_w * \lambda_w) / d_{\text{int\_tubo}}) \text{ W/(m}^2 \text{ K)} \quad \text{Coeficiente de Convección del Agua}$$

$$\alpha_w = ((549,3 * 0,6179) / 0,04276) = 7.937 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$$

Cálculo  $\alpha_a$ , Flujo por exterior de banco de tubos alternados

Propiedades físicas:

$$t_b = (0,5 * (t_{ea} + t_{sa})) \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura bulk (Referencia)}$$

$$t_{ea} = t_{a1} = 21 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura de Entrada del Aire}$$

$$t_{sa} = 35 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura de Salida del Aire}$$

$$t_b = (0,5 * (21 + 35)) = 28 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Con lo que se tienen las siguientes propiedades;

$$\rho_a = 1,151 \text{ kg/m}^3 \quad \text{Densidad del Aire}$$

$$Cp_a = 1,038 \text{ kJ/(kg } ^\circ\text{C)} \quad \text{Calor Específico del Aire}$$

$$\lambda_a = 0,02578 \text{ W/(m K)} \quad \text{Conductividad del Aire}$$

$$\mu_a = 0,0000186 \text{ kg/ms} \quad \text{Viscosidad Dinámica del Aire}$$

$$\nu_a = (\mu_a / \rho_a) \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{Viscosidad Cinemática del Aire}$$

$$\nu_a = (0,0000186 / 1,151) = 0,0000162 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr_{\text{aireseco}} = 0,7287 \quad \text{Prandtl del Aire Seco}$$

$$Pr_{\text{vapor}} = 5,691 \quad \text{Prandtl del Vapor}$$

$$Pr_a = ((Pr_{\text{aireseco}} + \omega_{a1} * Pr_{\text{vapor}}) / (1 + \omega_{a1})) \quad \text{Prandtl del Aire}$$

$$Pr_a = ((0,7287 + 0,01135 * 5,691) / (1 + 0,01135)) = 0,7844$$

Además:

$s_1=0,06566$  m Espaciamiento Transversal, entre 2 centros de tubos de la misma corrida

$s_2=0,055$  m Espaciamiento Longitudinal, entre 2 centros de tubos de corridas adyacentes

$$a=(s_1 / d_{\text{ext\_tubo}}) \text{ m}$$

$$a=(0,06566 / 0,0483)=1,359 \text{ m}$$

$$b=(s_2 / d_{\text{ext\_tubo}}) \text{ m}$$

$$b=(0,055 / 0,0483)=1,139 \text{ m}$$

$$l=((\pi / 2) * d_{\text{ext\_tubo}}) \text{ m Largo de Escurrimiento}$$

$$l=((\pi / 2) * 0,0483)=0,07587 \text{ m}$$

$$\text{Psi}=(1-(\pi / (4*a))) \text{ Porosidad del Escurrimiento}$$

$$\text{Psi}=(1-(\pi / (4*1,359)))=0,4223$$

$f_a=(1+((2*b) / 3))$  Factor efecto mayor turbulencia por cercanía de tubos y disposición de éstos

$$f_a=(1+((2*1,139)/3))=1,759$$

$\text{veloc}_{a1}=5,8$  m/s Velocidad de Entrada del Aire

$$\text{Re}_a=((\text{veloc}_{a1} * l) / (\text{Psi} * \text{Nu}_a)) \text{ Reynolds del Aire}$$

$$\text{Re}_a=((5,8*0,07587) / (0,4223*0,0000162))=64494$$

$\text{Alto}_{\text{interc}}=1,97$  m Altura de entrada Superior del Aire

$L_{\text{tubos}}=12,7$  m Largo de los tubos

$N_{\text{intercam}}=8$  intercambiadores Número de intercambiadores

$L_{\text{tubos\_eq}}=(N_{\text{intercam}} * L_{\text{tubos}}) \text{ m}$  Largo de tubos equivalente

$$L_{\text{tubos\_eq}}=(8*12,7)=101,6 \text{ m}$$

$A_{\text{interc}}=(L_{\text{tubos\_eq}} * \text{Alto}_{\text{interc}}) \text{ m}^2$  Sección de Entrada Aire Superior

$$A_{\text{interc}}=(101,6*1,97)=200,2 \text{ m}^2$$

$m_{a1\_sup}=(\rho_a * A_{\text{interc}} * \text{veloc}_{a1}) \text{ kg/s}$  Flujo másico del Aire de Entrada Superior

$$m_{a1\_sup}=(1,151*200,2 * 5,8)=1336 \text{ kg/s}$$

$\text{Nuss}_{al}=(0,664 * \text{Re}_a^{0,5} * \text{Pr}_a^{0,33})$  Nusselt Laminar del Aire

$$\text{Nuss}_{al}=(0,664 * 64494^{0,5} * 0,7844^{0,33})=155,6$$

$\text{Nuss}_{at}(((0,037 * \text{Re}_a^{0,8} * \text{Pr}_a) / (1+2,443 * \text{Re}_a^{-0,1} * (\text{Pr}_a^{2/3} - 1))))$  Nusselt Turbulento del Aire

$$\text{Nuss}_{at} = ((0,037 * 64494^{0,8} * 0,7844) / (1 + 2,443 * 64494^{-0,1} * (0,7844^{2/3} - 1))) = 232,4$$

$$\text{Nuss}_{a1} = (f_a * (0,3 + (\text{Nuss}_{al}^2 + \text{Nuss}_{at}^2)^{0,5})) \quad \text{Nusselt del Aire, 1 Objeto}$$

$$\text{Nuss}_{a1} = (1,759 * (0,3 + (155,6^2 + 232,4^2)^{0,5})) = 492,5$$

$$\alpha_a = ((\text{Nuss}_{a1} * \lambda_a) / l) \quad \text{W/(m}^2 \text{ K)} \quad \text{Coeficiente de Convección del Aire}$$

$$\alpha_a = ((492,5 * 0,02578) / 0,07587) = 167,4 \quad \text{W/(m}^2 \text{ K)}$$

## Termodinámica

### Aire

$$Q_2 = (m_{a1\_sup} * C_{p_a} * (t_{a3} - t_{a1})) \quad \text{kW} \quad \text{Calor recibido por el Aire en el intercambiador}$$

$$Q_2 = (1,336 * 1,038 * (t_{a3} - 37))$$

### Agua

$$Q_2 = (m_{w\_interc} * C_{p_w} * (t_{w4} - t_{w5})) \quad \text{kW} \quad \text{Calor rechazado por el Agua en el intercambiador}$$

$$Q_2 = (332,8 * 4,183 * (37 - t_{w5}))$$

$$A_{transfcalor} = (\pi * d_{ext\_tubo} * L_{tubos\_eq} * N_{tubos}) \quad \text{m}^2 \quad \text{Área Transferencia de Calor}$$

$$A_{transfcalor} = (\pi * 0,0483 * 101,6 * 122) = 1881 \quad \text{m}^2$$

$$\text{Resis}_w = (1 / \alpha_w) \quad 1/(\text{W/(m}^2 \text{ K)}) \quad \text{Resistencia del Agua}$$

$$\text{Resis}_w = (1 / 7,937) = 0,000126 \quad 1/(\text{W/(m}^2 \text{ K)})$$

$$\text{Resis}_{cañ} = ((r_1 / \lambda_{cañ}) * \ln(r_2 / r_1)) \quad 1/(\text{W/(m}^2 \text{ K)}) \quad \text{Resistencia de la cañería}$$

$$\text{Resis}_{cañ} = ((0,02138 / 16,3) * \ln(0,02415 / 0,02138)) = 0,0001598 \quad 1/(\text{W/(m}^2 \text{ K)})$$

$$\text{Resis}_a = (r_1 / (r_2 * \alpha_a)) \quad 1/(\text{W/(m}^2 \text{ K)}) \quad \text{Resistencia del Aire}$$

$$\text{Resis}_a = (0,02138 / (0,02415 * 167,4)) = 0,005289 \quad 1/(\text{W/(m}^2 \text{ K)})$$

$$\text{Resis}_t = (\text{Resis}_w + \text{Resis}_{cañ} + \text{Resis}_a) \quad 1/(\text{W/(m}^2 \text{ K)}) \quad \text{Resistencia Total}$$

$$\text{Resis}_t = (0,000126 + 0,0001598 + 0,005289) = 0,005575 \quad 1/(\text{W/(m}^2 \text{ K)})$$

$$U = (1 / \text{Resis}_t) \quad \text{W/(m}^2 \text{ K)} \quad \text{Coeficiente Global de Transferencia de Calor}$$

$$U = (1 / 0,005575) = 179,4 \quad \text{W/(m}^2 \text{ K)}$$

$$\Delta t = (0,5 * ((t_{w4} + t_{w5}) - (t_{a1} + t_{a3}))) \quad \text{°C} \quad \text{Media Aritmética}$$

$$\Delta t = (0,5 * ((37 + t_{w5}) - (37 + 37))) \quad \text{°C}$$

### Transferencia de Calor

$$Q_2 = (U * A_{transfcalor} * \Delta t) \quad \text{kW} \quad \text{Calor de transferencia Agua-Aire}$$

$$Q_2 = (179,4 * 1881 * (0,5 * ((37 + t_{w5}) - (37 + 37))))$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones de la termodinámica del Aire, Agua y

Transferencia de Calor, se tiene:



$$t_{a3}=36,96 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_{w5}=21,09 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Q_2=22144 \text{ kw}$$

Calculando, conocemos:

$$\Delta t_i=(0,5*((37+ t_{w5}) - (37+37))) \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta t=(0,5*((3+21,09) - (37+37)))=0,066 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$t_{w5}=21,09 \text{ }^{\circ}\text{C}$  Temperatura del Agua, Obtenida de cálculo del intercambiador

$$t_{w6}(((0,85*t_{w2})+(0,15* t_{w5})) \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ Temperatura del Agua}$$

$$t_{w6}(((0,85*37)+(0,15*21,09))=34,61 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Además se tiene:

$$C_{p_{w6}}=4,183 \text{ kJ/(kg }^{\circ}\text{C)} \text{ Calor específico del Aire}$$

$$Q_1=(m_{wr6} * C_{p_{w6}} * ( t_{w6} - t_{w7})) \text{ kw Calor transferido por el agua pulverizada}$$

$$Q_1=(2.218*4,183 *(34,61 - 23))=107.764 \text{ kw}$$

$$Q_1=(m_{a1\_inf}*(h_{a2} - h_{a1})), \text{ Por lo que:}$$

$$h_{a2}((( Q_1 / m_{a1\_inf}) + h_{a1}) \text{ kJ/kg Entalpía del Aire}$$

$$h_{a2}(((107.764 / 4503)+ 49,96)=73,89 \text{ kJ/kg}$$

$HR_{a2}=0,95$  Humedad Relativa del Aire de Entrada, Condición supuesta: Aire saturado

$$P_1=101.325 \text{ Pa (=1,033 bar)} \text{ Presión Atmosférica}$$

Con los datos anteriores tenemos:

$$t_{a2}=25,05 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ Temperatura del Aire}$$

$$\omega_{a2}=0,01911 \text{ kgw/kgas} \text{ Humedad Específica del Aire}$$

$$C_{p_{a2}}=1,041 \text{ kJ/(kg }^{\circ}\text{C)} \text{ Calor específico del Aire}$$

MEZCLA DE AIRE, (Aire2+Aire3=Aire4)

Sabemos que:

$$m_{a1\_inf}=4.503 \text{ kg/s} \text{ Flujo másico de Aire de Entrada Inferior}$$

$$m_{a1\_sup}=1.336 \text{ kg/s} \text{ Flujo másico de Aire de Entrada Superior}$$

Y tenemos que:

$$m_{wrevap}= 31,06 \text{ kg/s}$$

$$m_{a2}=( m_{a1\_inf} + m_{wrevap}) \text{ kg/s} \text{ Flujo másico de Aire}$$

$$m_{a2}=(4.503 + 31,06)=4.534 \text{ kg/s}$$

$$m_{a3}= m_{a1\_sup} \text{ kg/s} \text{ Flujo másico de Aire de Entrada Superior}$$

$$m_{a3}=1.336 \text{ kg/s}$$

$$m_{a4}=(m_{a2}+m_{a3}) \text{ kg/s} \quad \text{Flujo másico de Aire Mezcla de Salida}$$

$$m_{a4}=(4.534+1.336)=5.871 \text{ kg/s}$$

$$Q_2=(m_{a1\_sup}*(h_{a3} - h_{a1})) \text{ kW} \quad \text{Calor recibido por el Aire en el intercambiador}$$

$$h_{a3}=\left(\frac{Q_2}{m_{a1\_sup}} + h_{a1}\right) \text{ kJ/kg} \quad \text{Entalpía del Aire}$$

$$h_{a3}=\left(\frac{22.144}{1336} + 49,96\right)=66,53 \text{ kJ/kg}$$

En la carta Psicrométrica, con los siguientes datos obtenidos, se tiene:

$$t_{a3}=36,96 \text{ °C} \quad \text{Temperatura de Aire}$$

$$h_{a3}=66,53 \text{ kJ/kg} \quad \text{Entalpía del Aire}$$

$$HR_{a3}=0,29 \quad \text{Humedad Relativa del Aire Mezcla de Salida}$$

$$m_{a2} / m_{a3}=\left(\frac{t_{a4} - t_{a3}}{t_{a2} - t_{a4}}\right) \quad \text{Razón entre masas de Aire 2 y 3}$$

$$t_{a4}=\left(\frac{m_{a2} * t_{a2} + (m_{a3} * t_{a3})}{m_{a2} + m_{a3}}\right) \quad \text{Temperatura del Aire}$$

$$t_{a4}=\left(\frac{(4534*25,05) + (1.336*36,96)}{4.534+1.336}\right)=27,76 \text{ °C}$$

De la carta Psicrométrica se puede extraer gráficamente  $h_{a4}$ , con los siguientes datos obtenidos anteriormente:

$$t_{a2}=25,05 \text{ °C} \quad \text{Temperatura de Aire}$$

$$h_{a2}=73,89 \text{ kJ/kg} \quad \text{Entalpía del Aire}$$

$$t_{a3}=36,96 \text{ °C} \quad \text{Temperatura de Aire}$$

$$h_{a3}=66,53 \text{ kJ/kg} \quad \text{Entalpía del Aire}$$

$$t_{a4}=27,76 \text{ °C} \quad \text{Temperatura de Aire}$$

Se obtendrá  $h_{a4}$ : intersectando la línea vertical  $t_{a4}$  con la línea que une los puntos  $(t_{a2}, h_{a2})$  y  $(t_{a3}, h_{a3})$ ,

Por lo que:

$$HR_{a4}=0,71 \quad \text{Humedad Relativa del Aire Mezcla de Salida}$$

Y podemos conocer gráficamente:

$$\omega_{a4}=0,0167 \text{ kgw/kgas} \quad \text{Humedad Específica del Aire Mezcla de Salida}$$

$$h_{a4}=70,55 \text{ kJ/kg} \quad \text{Entalpía del Aire Mezcla de Salida}$$

$$t_{bh_{a4}}=23,63 \text{ °C}$$

## CAPACIDAD O CARGA TERMICA DEL EQUIPO

Se sabe:

$m_{wd}=2.778$  kg/s (= 10.000 ton/h) Flujo másico de diseño del Agua

$C_{p_{w1}}=4,183$  kJ/(kg °C) Calor Específico del Agua de Entrada

$t_{wd1}=36$  °C Temperatura de diseño del Agua de Entrada

$t_{wd2}=24$  °C Temperatura de diseño del Agua de Salida

$t_{bh_{ad}}=18$  °C Temperatura bulbo húmedo de diseño del Aire de Entrada

$t_{w1}=37$  °C Temperatura del Agua de Entrada

$t_{w7}=23$  °C Temperatura del Agua de Salida

Calculando tenemos:

$Q_{in\text{om}}=(m_{wd} * C_{p_{w1}} * (t_{wd1} - t_{bh_{ad}}))$  kW Capacidad Ideal de Nominal

$Q_{in\text{om}}=(2.778 * 4,183 * (36 - 18))=209.144$  kW

$Q_{i\text{op}}=(m_{wr1} * C_{p_{w1}} * (t_{w6} - t_{bh_{ad}}))$  kW Capacidad Ideal de Operación

$Q_{i\text{op}}=(2.218 * 4,183 * (34,61 - 18))=154.150$  kW

$Q_{n\text{om}}=(m_{wd} * C_{p_{w1}} * (t_{wd1} - t_{wd2}))$  kW Capacidad Nominal

$Q_{n\text{om}}=(2.778 * 4,183 * (36 - 24))=139.430$  kW

$Q_{\text{op}}=(m_{wr1} * C_{p_{w1}} * (t_{w6} - t_{w7}))$  kW Capacidad de Operación

$Q_{\text{op}}=(2.218 * 4,183 * (34,61 - 23))=107.757$  kW

$R\text{end}=(Q_{\text{op}} / Q_{n\text{om}}) * 100$  % Rendimiento del Equipo

$R\text{end}=(107.757 / 139.430) * 100=77,3$  %

Se aprecia que la torre de enfriamiento con la reforma disminuye el rendimiento (concordando con lo que se esperaba) de un 93,2% a un 77,3%, estando fuera del rango de un buen rendimiento. El rendimiento disminuye, en un 17,06%.

A continuación se presenta, en la Carta Sicrométrica (Fig. N° 10.10), los estados de entrada y salida y el proceso del aire húmedo, para la reforma de la torre.

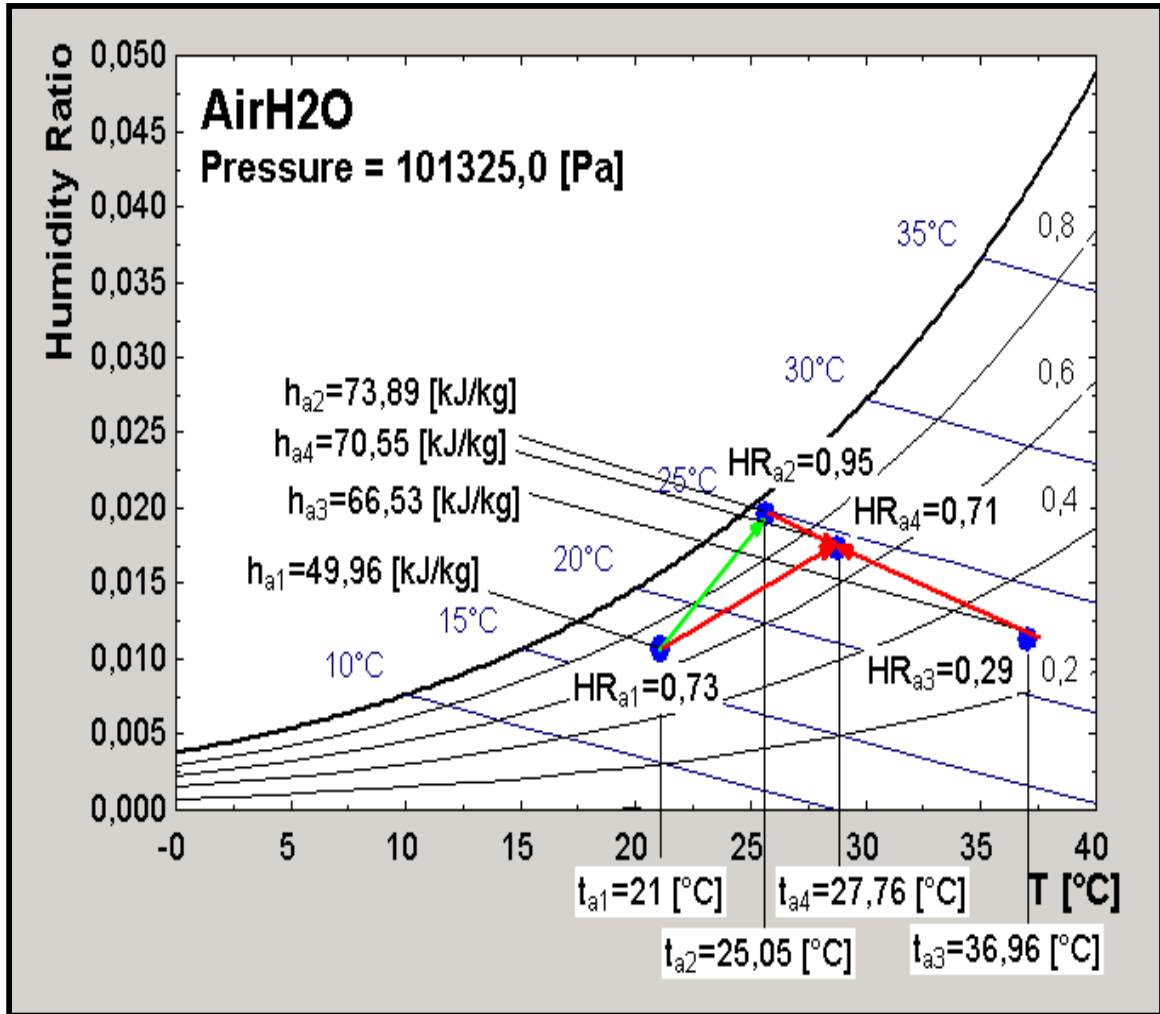


Fig. N° 10.8 Carta Sicrométrica

**CAPITULO XI VALORACION PARA LA REFORMA DE LA TORRE DE ENFRIAMIENTO.**

**11.1- PRESUPUESTO DE ESINDUS S.A.**



Esindus S.A. realizó un Presupuesto total para la reforma de la torre de enfriamiento de Petropower S.A. por **\$ 891.250.000.-** más IVA Desglosado así:

ITEM	Porcentaje.	Precio Total
Estructura Adicional	10%	\$ 89.125.000
Ingeniería	13%	\$ 115.862.500
Desmontaje / Montaje	19%	\$ 169.337.500
Transporte	2%	\$ 17.825.000
Parte Hibrida	56%	\$499.100.000
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>\$ 891.250.000</b>

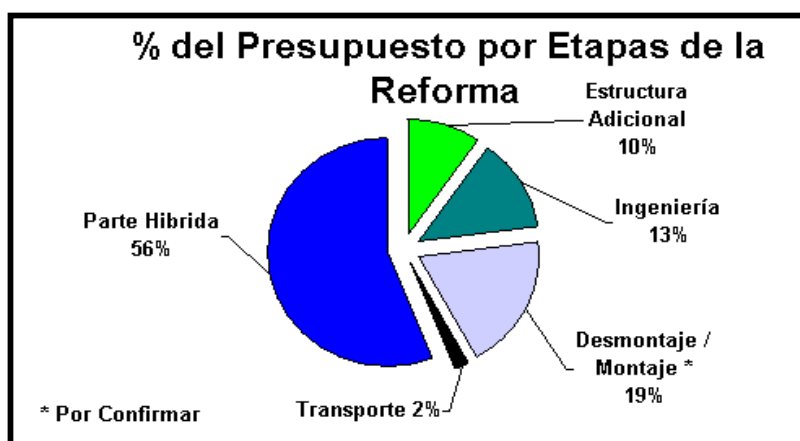


Fig. N° 11.1 Presupuesto de la reforma a la torre de enfriamiento.

**11.2- OFERTA ECONOMICA DE PROYECMETAL Ltda.**



**Proyecto para la Reforma de la Torre de Enfriamiento de Foster Wheeler Talcahuano Chile.**

La empresa Proyecmetal S.A., se compromete a ejecutar, a Suma Alzada en base a Precios Unitarios, los trabajos que se detallan en las Especificaciones Técnicas, planos y demás antecedentes para la obra del **Montaje y Desmontaje**. La suma total neta es de \$ 167.544.237.-, más IVA, conforme al presupuesto ítemizado adjunto, y en el plazo de 45 días hábiles corridos contados desde la entrega del terreno.

### 11.3- TABLAS.

A continuación se presenta un detalle de costos: Costos Directos, Costos Indirectos, Utilidades, Gastos Generales y costos totales asociados al proceso de reforma de la torre.

<b>Costos Directos a Suma Alzada</b>		
<b>ITEM</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>P. TOTAL \$</b>
1	Descarga, recepción y clasificación de nuevos materiales entregados en sitio	1.966.960
2	Desmontaje de equipos mecánicos	3.081.099
3	Desmontaje no destructivo de plataforma, barandillas y chimeneas	4.564.030
4	Montaje de la sección híbrida (Castillete adicional y equipos internos)	6.822.155
5	Montaje de la estructura prolongada y de las paredes adicionales	19.773.978
6	Montaje plataforma, barandillas y chimeneas	12.365.677
7	Montaje de los equipos mecánicos (4 Ventiladores, 4 bombas booster)	5.717.809
8	Modificación de los accesos	13.224.833
9	Montaje de los calentadores de aire y piping	31.002.507
10	Andamios para la torre	6.978.983
11	Personal para la puesta en marcha	2.163.063
12	Equipos mayores	3.089.535
<b>Total Costos Directos a Suma Alzada</b>		<b>\$ 110.750.629</b>

<b>Costos Indirectos a Suma Alzada</b>		
<b>ITEM</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>P. TOTAL \$</b>
1	Instalación de faena y su retiro	4.916.886
2	Supervisión y administración de terreno	28.364.336
3	Gastos financieros (Seguros, pólizas y boletas de garantía)	0
4	Imprevistos	829.738
<b>Total Costos Indirectos a Suma Alzada</b>		<b>\$ 34.110.960</b>

<b>Utilidades y Gastos Generales a Suma Alzada</b>		
<b>ITEM</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>P. TOTAL \$</b>
1	Utilidades	18.338.536
2	Gastos Generales	4.344.112
<b>Total Utilidades y Gastos Generales a Suma Alzada</b>		<b>\$ 22.682.648</b>

<b>PRECIO DEL CONTRATO NETO + IVA</b>	<b>\$167.544.237</b>
---------------------------------------	----------------------

**Valores Totales Netos más 19% IVA**

A continuación se presenta para cada Procesos-Recursos, un detalle de costos de los: Materiales, Equipos, Mano de Obra, G.G. y Utilidad que se necesitan y costos totales asociados al proceso de reforma de la torre.

ITEM	PROCESOS - RECURSOS	Materiales \$	Equipos \$	Mano de Obra \$	G.G. y Utilidad \$	P. Total \$
1	Descarga, recepción y clasificación de nuevos materiales entregados en sitio	12.566	309.050	1.645.344	271.479	2.238.439
2	Desmontaje de equipos mecánicos	182.368	555.220	2.343.517	386.681	3.467.780
3	Desmontaje no destructivo de plataforma, barandillas y chimeneas	327.710	821.622	3.414.693	563.426	5.127.455
4	Montaje de la sección híbrida (Castillete adicional y equipos internos)	419.483	1.168.829	5.233.848	863.583	7.685.744
5	Montaje de la estructura prolongada y de las paredes adicionales	565.951	3.506.482	15.701.555	2.590.756	22.364.734
6	Montaje plataforma, barandillas y chimeneas	419.483	2.259.666	9.686.528	1.598.279	13.963.950
7	Montaje de los equipos mecánicos (4 Ventiladores, 4 bombas booster)	320.243	1.491.713	3.905.859	644.468	6.362.277
8	Modificación de los accesos	419.483	2.337.653	10.467.696	1.727.172	14.952.005
9	Montaje de los calentadores de aire y piping	1.990.362	5.417.641	23.594.499	3.893.095	34.895.597
10	Andamios para la torre	146.468	6.832.515	0	523.424	7.502.407
11	Personal para la puesta en marcha	117.177	321.060	1.724.825	284.595	2.447.662
12	Equipos mayores	941.314	2.148.222	0	231.713	3.321.248
13	Instalación de faena y su retiro	3.749.817	234.354	932.720	368.765	5.285.656
14	Supervisión y administración de terreno	0	3.726.185	24.638.145	4.065.292	32.429.626
15	Gastos financieros (Seguros, pólizas y boletas de garantía)	0	0	0	0	0
16	Imprevistos	0	829.738	0	0	829.738
17	Gastos Generales	4.344.112	0	0	325.771	4.669.919
<b>Precios Totales</b>		<b>13.956.536</b>	<b>31.959.949</b>	<b>103.289.219</b>	<b>18.338.533</b>	<b>167.544.237</b>

11.4- GRAFICOS.

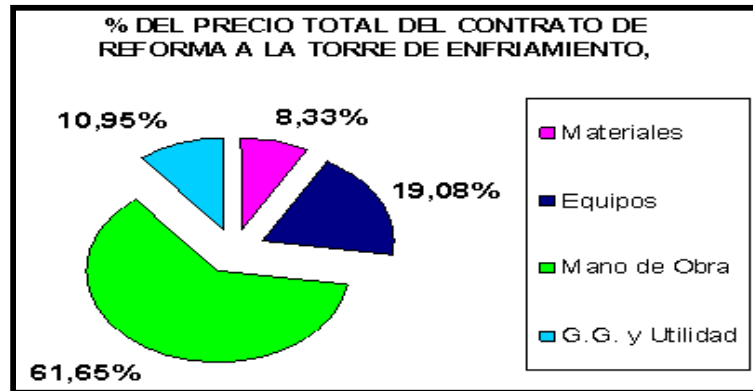


Fig. N° 11.2 Contrato de la reforma a la torre de enfriamiento.

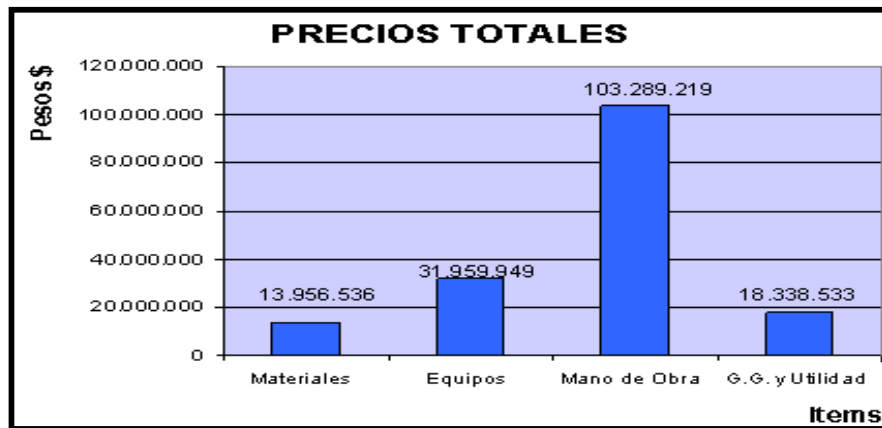


Fig. N° 11.3 Precios totales de la reforma.

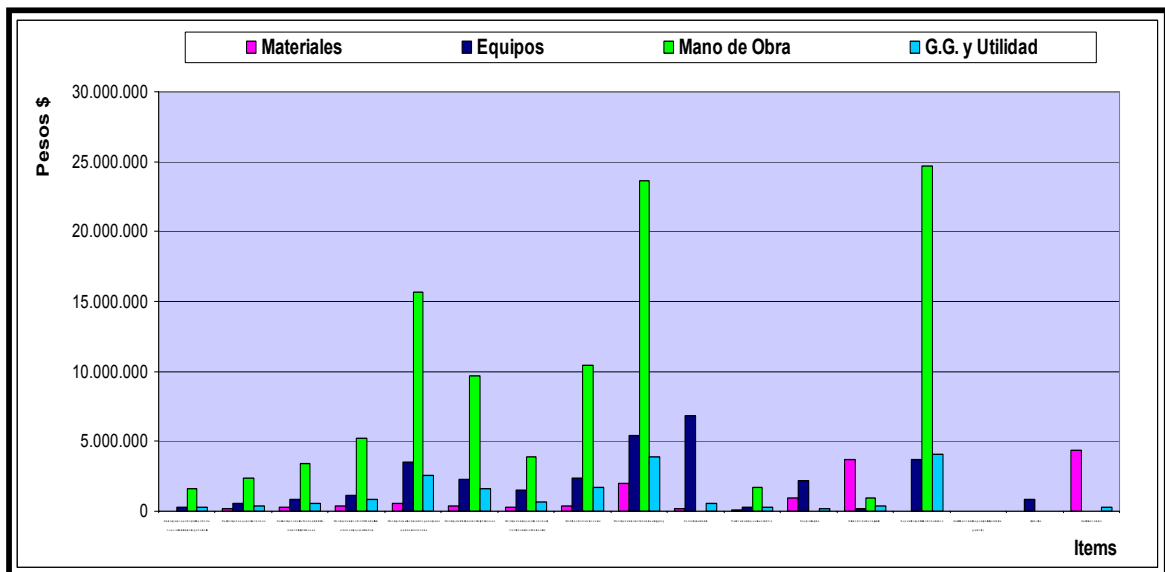


Fig. N° 11.3 Precios procesos - recursos para la reforma.



## **CONCLUSION**

Las Torres de Enfriamiento están consideradas dentro de los equipos que tienen un alto rendimiento. Su objetivo principal hacer descender la temperatura del agua caliente de uso industrial y para su posterior reutilización.

Las Torres de Enfriamiento más eficientes hoy en día son las de tiro mecánico o de convección forzada, porque no están sujetas a la condición de la velocidad del viento.

Para el caso particular de la torre en estudio, si se considera que la mayoría de estos equipos operan con un rendimiento alrededor del 90%, se puede afirmar que la Torre de Enfriamiento se encuentra operando en un buen nivel de eficiencia (93,2% para las condiciones medidas), además se obtuvo experimentalmente un rango de enfriamiento del agua de 14 °C (Rango de enfriamiento de diseño del agua de 12 °C), que es muy bueno, una temperatura de acercamiento del agua de 5 °C, lo que es menos de lo normal (Temperatura de acercamiento de diseño del agua de 6 °C).

Con respecto a la reforma de la torre, se espera eliminar el penacho que tiene una humedad relativa alrededor del 95%, lo cual se hará mezclando este aire húmedo con aire caliente y menos húmedo (29%). Lo que traerá como resultado que el aire de salida de la torre tendrá una humedad relativa del 71%, con lo cual se disminuye la humedad del aire de salida de la torre y se eliminaría el penacho.

Esindus S.A. plantea que con esta reforma se elimina el penacho, sin embargo, implica una disminución en el rendimiento de la torre, lo cual quedó demostrado, el rendimiento disminuyó de 93,2% a 77,3%, es decir, un 17,06%.

## **BIBLIOGRAFIA**

- <http://www.fwt.cl> (Foster Wheeler Talcahuano).
- Tríptico de PETROPOWER S.A.:“La Creación de una gran Industria para Chile”
- Revista de Ingeniería Universidad de Concepción: “Complejo Energético Petropower. Una Visión Técnica de un Proyecto Exitoso”; Gerónimo Cortés P. Gerente de Operaciones, Foster Wheeler Talcahuano.
- Material del curso “Termodinámica I” Ing. Civil Industrial Mención Mecánica; Prof.: Luis Cerda M.
- Material del curso “Termodinámica II” Ing. Civil Industrial Mención Mecánica; Prof.: Vicente Pita V.
- Material del curso “Transferencia de Calor” Ing. Civil Industrial Mención Mecánica; Prof.: Reinaldo Sánchez A.
- “Estudio sobre torre de enfriamiento”  
René Aquiles Burgos Osses, Prof. Luis A. Cerda Miskulini  
Memoria, Ingeniero de Ejecución en Mecánica  
Universidad del Bío-Bío, Dpto. de Ingeniería Mecánica, Concepción, 1982.  
M 621 B915E 1982
- “Análisis mecánico y estudio de transferencia de energía en torre de enfriamiento”  
César A. Llanos Ascencio, Prof. Reinaldo A. Sánchez Arriagada.  
Memoria, Ingeniero de Ejecución en Mecánica  
Universidad del Bío-Bío, Dpto. de Ingeniería Mecánica, Concepción, 2000  
M 621 L77 2000
- “Manual: Procedimientos de Operación, Agua de Enfriamiento, Rev.2005.”  
Planta de Cogeneración PETROPOWER S.A., Foster Wheeler Iberia S.A.  
Gerónimo Cortés, Gerente de Operaciones.  
Richard Torres, Ing. Supervisor de Operaciones.
- “Planos Torre de Enfriamiento” Planta de Cogeneración PETROPOWER S.A.,  
Marley Davenport.  
Gerónimo Cortés, Gerente de Operaciones.  
Richard Torres, Ing. Supervisor de Operaciones.

- “Procesos de Transferencia de Calor”  
Donald Q. Kern.  
10ª ed. Español, México :CECSA, Septiembre 1976.
- “Ingeniería de ámbito térmico”  
James L. Threlkeld.
- “Requisición para la Reforma de una Torre de Refrigeración en Talcahuano;  
Especificación Técnica. Petición de Oferta N° 6418/500 Rev.1  
ESINDUS S.A., Planta de Cogeneración de Energía PETROPOWER S.A.,  
Foster Wheeler Talcahuano Ltda.
- ESINDUS S.A.  
<http://www.esindus.es/ES/index.html>
- Torre de Refrigeración  
<http://www.sc.ehu.es/nmwmigaj/Torre.htm>
- Centrales Termoeléctricas  
<http://72.14.253.104/search?q=cache:JgCSwljnmbwJ:thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99022601/capitulo7.html+condensador+en+una+planta+termica&hl=es&gl=cl&ct=clnk&cd=6>
- El Coque de Petróleo  
<http://www.oviedo.es/personales/carbon/coque/coque%20de%20petroleo.htm>
- Cañerías Acero Inoxidable ASTM A312 Tipo 304L y 316L, En Sch 10 y Sch 40  
Con Costura Tipo Erw, Extremos Biselados.  
<http://www.valvulasindustriales.com/www/pdfweb/canerias.pdf>
- Torre de Enfriamiento  
<http://www.monografias.com/trabajos10/toen/toen.shtml>
- Generalidades de Torres de Enfriamiento de Agua  
<http://depa.pquim.unam.mx/~luimary/generalidades.html>
- Proyecmetal Ltda.  
Información de Valoración de Trabajos, para el Proyecto de Reforma de la  
Torre de Enfriamiento de Foster Wheeler Talcahuano, Chile.

**ANEXOS.**

**ANEXO 1. CALCULO DE INCREMENTO DE POTENCIA, POR VENTILADOR DE LA TORRE.**

**CALCULO DE POTENCIA PARA CADA VENTILADOR DE LA T,E, ACTUAL.**

NOTA: El valor de la masa de aire inferior es un promedio que circula por cada ventilador.

Datos:

$m_{a1}=(4503/4)=1126$  kg/s Masa de aire promedio por celda

$\rho_{a1}=1,179$  m<sup>3</sup>/kg Densidad del aire de entrada

$\gamma_{a1}=(\rho_{a1}*g)=11,55$  kg/m<sup>3</sup> Peso específico del aire de entrada

$diam_2=9,834$  m Diametro salida del aire

$g=9,8$  m/s<sup>2</sup> Aceleración de gravedad

$veloc_{a1}=5,8$  m/s Velocidad de entrada del aire

$veloc_{a2}=12$  m/s Velocidad de salida del aire

$z_2=9,35$  Altura entre el nivel de referencia (entrada) y salida del aire

Se sabe que:

$m_{a1}=(\rho_{a1}*Q_a)$

$Q_a=(m_{a1}/\rho_{a1})=954,8$  m<sup>3</sup>/s Caudal de entrada de aire por celda

Realizando un Balance de Energia, se tiene:

$B_1+H=B_2+Perd$

$H=(B_2 - B_1 + Perd)$  m

Se tiene:

$B_1 = 0$  m Bernoulli al nivel de referencia

$B_2=(z_2+((veloc_{a2}^2)/(2*g)))$  Bernoulli a la salida del aire

$B_2=(9,35+((12^2)/(2*9,8)))=16,7$  m

Calcularemos:

$Perd=(Perd_r+Perd_s)$  Pérdidas entre puntos 1-2

$Perd_r=0$  m Pérdidas regulares entre puntos 1-2

$Perd_s=(Perd_{s\_codo90}+Perd_{s\_vent})$  Pérdidas singulares entre puntos 1-2

$K_{codo90}=1,3$  Coficiente por singularidad. Codo 90°

$Perd_{s\_codo90}=(K_{codo90}*((veloc_{a1}^2)/(2*g)))$  Pérdidas por singularidad. Codo 90°

$$\text{Perd}_{s\_codo90} = (1,3 * ((5,8^2) / (2 * 9,8))) = 2,23 \text{ m}$$

alfa=0,63 Coeficiente alfa por singularidad. Reducción seccion ventilador

a=14,64 m Dimensión celda

b=14,64 m Dimensión celda

$A_1 = (a * b)$  Area celda

$$A_1 = (14,64 * 14,64) = 214,3 \text{ m}^2$$

$A_2 = (\pi * (\text{diam}_{2^2}) / 4)$  m<sup>2</sup> Area salida aire

$$A_2 = (\pi * (9,834^2) / 4) = 75,95 \text{ m}^2$$

$K_{\text{vent}} = (((1/\text{alfa}) - 1)^2 * (1 - (A_2 / A_1)))$  Coeficiente por singularidad. Reducción seccion ventilador

$$K_{\text{vent}} = (((1/0,63) - 1)^2 * (1 - (75,95 / 214,3))) = 0,22$$

$\text{Perd}_{s\_vent} = (K_{\text{vent}} * ((\text{veloc}_{a2}^2) / (2 * g)))$  Pérdida por singularidad. Reducción seccion ventilador

$$\text{Perd}_{s\_vent} = (0,22 * ((12^2) / (2 * 9,8))) = 1,64 \text{ m}$$

$\text{Perd}_s = (\text{Perd}_{s\_codo90} + \text{Perd}_{s\_vent})$  Pérdida por singularidad

$$\text{Perd}_s = (2,23 + 1,64) = 3,87 \text{ m}$$

$\text{Perd} = (\text{Perd}_r + \text{Perd}_{sr})$  Pérdida total

$$\text{Perd} = (0 + 3,87) = 3,87 \text{ m}$$

Por lo que:

$$H = (B_2 - B_1 + \text{Perd})$$

$$H = (16,7 - 0 + 3,87) = 20,56 \text{ m}$$

$P = (\gamma_{a1} * H)$  Presión del ventilador

$$P = (11,55 * 20,56) = 237,6 \text{ Pa}$$

Finalmente:

$\text{Pot} = ((P * Q_a) / 1000)$  Potencia del ventilador actual

$$\text{Pot} = ((237,6 * 954,8) / 1000) = 226,9 \text{ kW}$$

## CALCULO DE POTENCIA PARA CADA VENTILADOR DE LA REFORMA A LA T,E,

Parte Inferior

Datos:

$m_{a1inferior}=(4503/4)=1126$  kg/s Masa de aire inferior promedio por celda

$\rho_{a1}=1,179$  m<sup>3</sup>/kg Densidad del aire de entrada

$\gamma_{a1}=(\rho_{a1}*g)=11,55$  kg/m<sup>3</sup> Peso especifico del aire de entrada

$diam_2=9,834$  m Diametro salida del aire

$g=9,8$  m/s<sup>2</sup> Aceleración de gravedad

$veloc_{a1}=5,8$  m/s Velocidad de entrada del aire

$veloc_{a2}=12$  m/s Velocidad de salida del aire

$z_{2inferior}=11$  Altura entre el nivel de referencia (entrada) y salida del aire

Se sabe que:

$m_{a1inferior}=(\rho_{a1}*Q_{ainferior})$

$Q_{ainferior}=(m_{a1inferior}/\rho_{a1})=954,8$  m<sup>3</sup>/s Caudal de entrada de aire por celd

Realizando un Balance de Energia, se tiene:

$B_{1inferior}+H_{1inferior}=B_{2inferior}+Perd_{inferior}$

$H_{inferior}=(B_{2inferior}-B_{1inferior}+Perd_{inferior})$  m

Se tiene:

$B_{1inferior}=0$  m Bernoulli al nivel de referencia

$B_{2inferior}=(z_{2inferior}+((veloc_{a2}^2)/(2*g)))$  Bernoulli a la salida del aire

$B_{2inferior}=(11+((12^2)/(2*9,8)))=18,35$  m

Calcularemos:

$Perd_{inferior}=(Perd_{rinferior}+Perd_{sinferior})$  Pérdidas entre puntos 1-2

$Perd_{rinferior}=0$  m Pérdidas regulares entre puntos 1-2

$Perd_{sinferior}=(Perd_{sinferior\_codo90}+Perd_{sinferior\_vent})$  Pérdidas singulares entre puntos 1-2

$K_{codo90}=1,3$  Coficiente por singularidad. Codo 90°

$Perd_{sinferior\_codo90}=(K_{codo90}*((veloc_{a1}^2)/(2*g)))$  Pérdidas por singularidad. Codo 90°

$Perd_{sinferior\_codo90}=(1,3*((5,8^2)/(2*9,8)))=2,23$  m

$\alpha=0,63$  Coficiente alfa por singularidad. Reducción seccion ventilador

$a=14,64$  m Dimensión celda

$b=14,64$  m Dimensión celda

$A_1=(a*b)$  Area celda

$$A_1=(14,64*14,64)=214,3 \text{ m}^2$$

$A_2=(\pi*(\text{diam}_2^2)/4)$  m<sup>2</sup> Area salida aire

$$A_2=(\pi*(9,834^2)/4)=75,95 \text{ m}^2$$

$K_{\text{vent}}=\left(\left(\frac{1}{\alpha}-1\right)^2\right)\left(1-\frac{A_2}{A_1}\right)$  Coficiente por singularidad. Reducción seccion ventilador

$$K_{\text{vent}}=\left(\left(\frac{1}{0,63}-1\right)^2\right)\left(1-\frac{75,95}{214,3}\right)=0,22$$

$\text{Perd}_{\text{inferior\_vent}}=(K_{\text{vent}} * ((\text{veloc}_{a2}^2)/(2*g)))$  Pérdida por singularidad. Reducción seccion ventilador

$$\text{Perd}_{\text{inferior\_vent}}=(0,22*((12^2)/(2*9,8)))=1,64 \text{ m}$$

$\text{Perd}_{\text{inferior}}=(\text{Perd}_{\text{inferior\_codo90}}+\text{Perd}_{\text{inferior\_vent}})$  Pérdida por singularidad

$$\text{Perd}_{\text{inferior}}=(2,23+1,64)=3,87 \text{ m}$$

$\text{Perd}_{\text{inferior}}=(\text{Perd}_{\text{inferior}}+\text{Perd}_{\text{inferior}})$  Pérdida total

$$\text{Perd}_{\text{inferior}}=(0+3,87)=3,87 \text{ m}$$

Por lo que:

$$H_{\text{inferior}}=(B_{2\text{inferior}}-B_{1\text{inferior}}+\text{Perd}_{\text{inferior}})$$

$$H_{\text{inferior}}=(18,35-0+3,87)=22,21 \text{ m}$$

$P_{\text{inferior}}=(\gamma_{a1} * H_{\text{inferior}})$  Presión del ventilador

$$P_{\text{inferior}}=(11,55*22,21)=256,7 \text{ Pa}$$

Finalmente:

$\text{Pot}_{\text{inferior}}=((P_{\text{inferior}} * Q_{\text{inferior}})/1000)$  Potencia del ventilador actual

$$\text{Pot}_{\text{inferior}}=((256,7*954,8)/1000)=245,1 \text{ kW}$$

## Parte Superior

Datos:

$m_{a1superior}=(1336/4)=334$  kg/s Masa de aire superior promedio por celda

$\rho_{a1}=1,179$  m<sup>3</sup>/kg Densidad del aire de entrada

$\gamma_{a1}=(\rho_{a1}*g)=11,55$  kg/m<sup>3</sup> Peso específico del aire de entrada

$diam_2=9,834$  m Diametro salida del aire

$g=9,8$  m/s<sup>2</sup> Aceleración de gravedad

$veloc_{a1}=5,8$  m/s Velocidad de entrada del aire

$veloc_{a2}=12$  m/s Velocidad de salida del aire

$z_{2superior}=11$  Altura entre el nivel de referencia (entrada) y salida del aire

Se sabe que:

$$m_{a1superior}=(\rho_{a1}*Q_{asuperior})$$

$$Q_{asuperior}=(m_{a1superior}/\rho_{a1})=283,3$$
 m<sup>3</sup>/s Caudal de entrada de aire por celda

Realizando un Balance de Energia, se tiene:

$$B_{1superior}+H_{superior}=B_{2superior}+Perd_{superior}$$

$$H_{superior}=(B_{2superior}-B_{1superior}+Perd_{superior})$$
 m

Se tiene:

$$B_{1superior}=8,1$$
 m Bernoulli al nivel de referencia

$$B_{2superior}=(z_{2superior}+((veloc_{a2}^2)/(2*g)))$$
 Bernoulli a la salida del aire

$$B_{2superior}=(11+((12^2)/(2*9,8)))=18,35$$
 m

Calcularemos:

$$Perd_{superior}=(Perd_{rsuperior}+Perd_{ssuperior})$$
 Pérdidas entre puntos 1-2

$$Perd_{rsuperior}=0$$
 m Pérdidas regulares entre puntos 1-2

$$Perd_{ssuperior}=(Perd_{ssuperior\_interc}+Perd_{ssuperior\_codo90}+Perd_{ssuperior\_vent})$$
 Pérdidas singulares entre puntos 1-2

$$K_{interc}=0,55$$
 Coficiente por singularidad. Intercambiador

$$Perd_{ssuperior\_interc}=(K_{interc}*((veloc_{a1}^2)/(2*g)))$$
 Pérdidas por singularidad.

Intercambiador

$$Perd_{ssuperior\_interc}=(0,55*((5,8^2)/(2*9,8)))=0,94$$
 m



$K_{\text{codo90}}=1,3$  Coficiente por singularidad. Codo 90°

$\text{Perd}_{\text{ssuperior\_codo90}}=(K_{\text{codo90}}*((\text{veloc}_{a1}^2)/(2*g)))$  Pérdidas por singularidad. Codo 90°

$$\text{Perd}_{\text{ssuperior\_codo90}}=(1,3*((5,8^2)/(2*9,8)))=2,23 \text{ m}$$

$\alpha=0,63$  Coficiente alfa por singularidad. Reducción seccion ventilador

$a=14,64$  m Dimensión celda

$b=14,64$  m Dimensión celda

$A_1=(a*b)$  Area celda

$$A_1=(14,64*14,64)=214,3 \text{ m}^2$$

$A_2=(\pi*(\text{diam}_2^2)/4)$  m<sup>2</sup> Area salida aire

$$A_2=(\pi*(9,834^2)/4)=75,95 \text{ m}^2$$

$K_{\text{vent}}=(((1/\alpha)-1)^2)*(1-(A_2/A_1))$  Coficiente por singularidad. Reducción seccion ventilador

$$K_{\text{vent}}=(((1/0,63)-1)^2)*(1-(75,95 / 214,3))=0,22$$

$\text{Perd}_{\text{ssuperior\_vent}}=(K_{\text{vent}}*((\text{veloc}_{a2}^2)/(2*g)))$  Pérdida por singularidad. Reducción seccion ventilador

$$\text{Perd}_{\text{ssuperior\_vent}}=(0,22*((12^2)/(2*9,8)))=1,64 \text{ m}$$

$\text{Perd}_{\text{ssuperior}}=(\text{Perd}_{\text{ssuperior\_interc}}+\text{Perd}_{\text{ssuperior\_codo90}}+\text{Perd}_{\text{ssuperior\_vent}})$  Pérdida por singularidad

$$\text{Perd}_{\text{ssuperior}}=(0,94+2,23+1,64)=4,81 \text{ m}$$

$\text{Perd}_{\text{superior}}=(\text{Perd}_{\text{rsuperior}}+\text{Perd}_{\text{ssuperior}})$  Pérdida total

$$\text{Perd}_{\text{superior}}=(0+4,81)=4,81 \text{ m}$$

Por lo que:

$$H_{\text{superior}}=(B_{2\text{superior}}-B_{1\text{superior}}+\text{Perd}_{\text{superior}})$$

$$H_{\text{superior}}=(18,35-8,1+4,81)=15,06 \text{ m}$$

$P_{\text{superior}}=(\gamma_{a1} * H_{\text{superior}})$  Presión del ventilador

$$P_{\text{superior}}=(11,55*15,06)=174 \text{ Pa}$$

Finalmente:

$\text{Pot}_{\text{superior}}=((P_{\text{superior}} * Q_{\text{asuperior}})/1000)$  Potencia del ventilador actual

$$\text{Pot}_{\text{superior}}=((174*283,3)/1000)=49,29 \text{ kW}$$

Por lo que:

$Pot_t = (Pot_i + Pot_s)$  Potencia total del ventilador

$Pot_t = (245,1 + 49,29) = 294,4 \text{ kW}$

Recordemos que:

$Pot = 226,9 \text{ kW}$  Potencia ventilador, torre actual

Por lo tanto:

$Porcentaje_{aum\_pot} = (((Pot_t - Pot) / Pot) * 100)$  Porcentaje aumento de la potencia al cambiar de la situación actual a la reforma

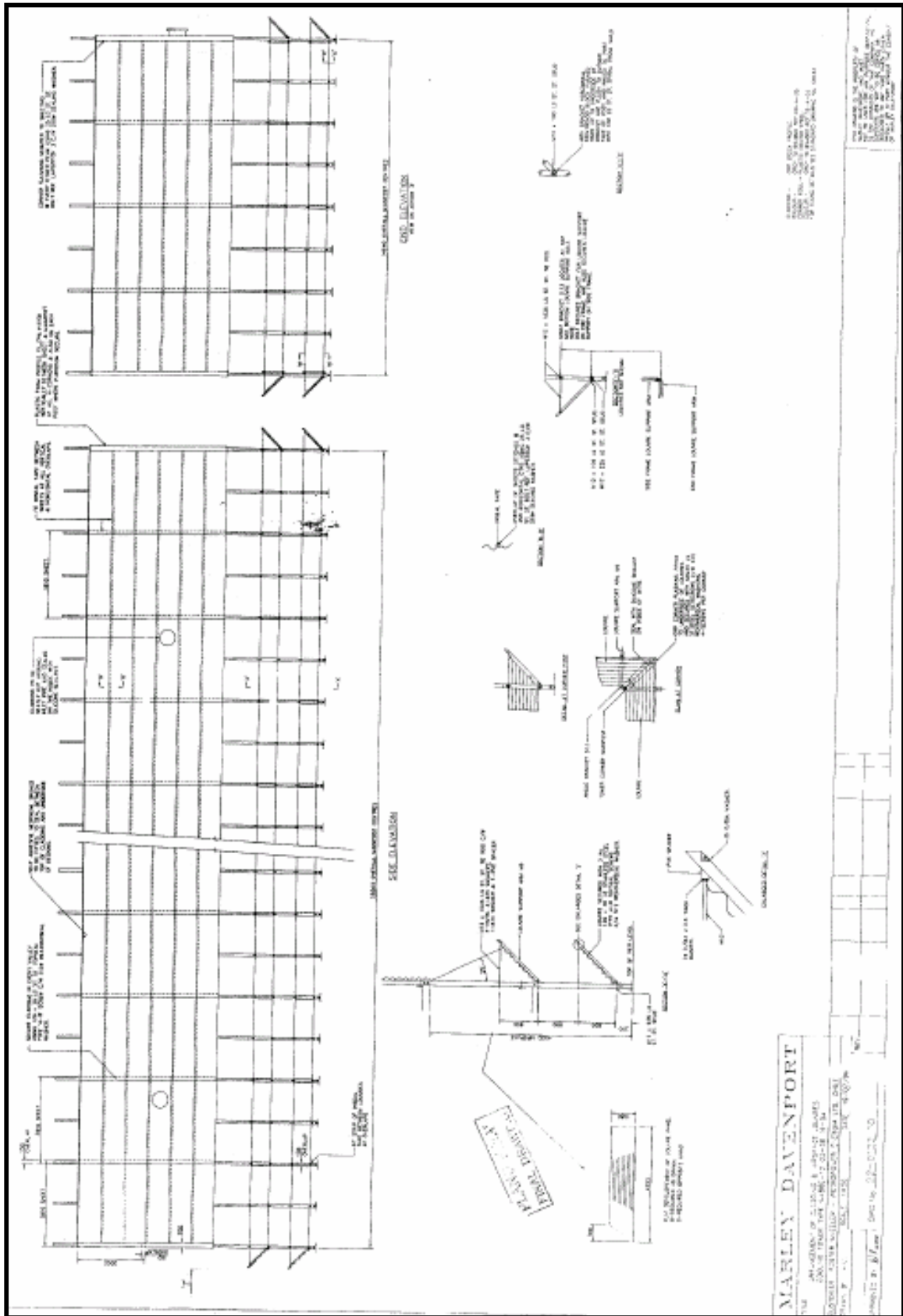
$Porcent\_aum\_pot = (((294,4 - 226,9) / 226,9) * 100) = 29,7 \%$

Con la reforma la potencia total del ventilador, aumenta cerca del 30%.





Estudio Termodinámico para el Abatimiento del Penacho de la Torre de Enfriamiento de Petropower S.A.









Estudio Termodinámico para el Abatimiento del Penacho de la Torre de Enfriamiento de Petropower S.A.

