

Trabajo de
Diploma

Instituto Superior Minero Metalúrgico
Facultad Metalúrgica Electromecánica

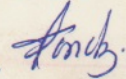
Foja
No. —

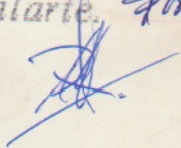
MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO
MOA - HOLGUIN

TRABAJO DE DIPLOMA

*TITULO : Evaluación de las torres de enfriamiento
del ciclo II de la Fábrica de Níquel*

"Comandante Ernesto Che Guevara".

DIPLOMANTE : Freddy Sanchez Guilarte. 

TUTORES: Ing. Pedro Rodríguez E. 

Ing. Walter Quesada F.

MOA 1990

Año XXXII de la Revolución.

**Trabajo de
Diploma**

**Instituto Superior Minero Metalúrgico
Facultad Metalúrgica Electromecánica**

**Hoja
No. —**

DEDICATORIA.

Sirvanos de placer dar merecido reconocimiento, mediante estas pequeñas líneas, a la Revolución que nos ha tornado como fieles seguidores de la causa del socialismo y el internacionalismo.

A todos aquellos que de una forma u otra han ayudado a alcanzar nuestro principal objetivo, para de esta forma contribuir al desarrollo de nuestro país.

Reciban de esta forma nuestros padres, esposa e hijo, familiares y amigos esta pequeña dedicatoria que nos llena de gran orgullo y satisfacción.

Trabajo de
Diploma

Instituto Superior Minero Metalúrgico
Facultad Metalúrgica Electromecánica

Hoja
No. —

AGRADECIMIENTO

Llegar a la cima de una meta trazada debe ser el punto de partida para nuevos empeños. Pero cuando llegamos a ésta debemos reconocer el trabajo de aquellos que de una forma u otra nos han brindado sus conocimientos, experiencias y apoyo.

Se desea dejar constancia de nuestro agradecimiento a los trabajadores de la fábrica Comandante Ernesto Che Guevara y en especial al Ing. Pedro Rodríguez Echemendía que nos mostró en todo momento su disposición, contribución y el mayor volumen de literatura para la confección del presente trabajo de diploma.

Trabajo de
Diploma

Instituto Superior Minero Metalúrgico
Facultad Metalúrgica Electromecánica

Hoja
No. —

	Pág.
CAPITULO IV. Recomendaciones.	48
Segunda Parte:	
Bibliografía y referencia.	49
Simbología adoptada y unidades.	50
Anexos.	
Tablas.	
Gráficos.	

RESUMEN

El presente trabajo estuvo encaminado a realizar un análisis comparativo entre los datos suministrados por proyecto y los datos obtenidos mediante mediciones, además de lograr una metodología que permitirá evaluar el trabajo de las torres de enfriamiento cada vez que se desee.

El período comprendido para la toma de datos fue de un mes, del 1ero al 31 de Agosto, tomando en consideración que es el mes más caluroso del año. Para esto fue necesario el montaje de una pequeña cabina climatológica en la parte nordeste, aproximadamente a 100 metros de la torre, en la cual se montaron los siguientes instrumentos:

Un cicrómetro para medir la humedad relativa, un anemómetro para medir la velocidad del viento, un manómetro para la presión atmosférica y un termómetro climatológico de vidrio para medir la temperatura del bulbo húmedo y del bulbo seco tanto en la cabina como en el interior de la torre (en la zona de rociado). Además la temperatura de entrada y de salida del agua a la torre, debiendo señalar que estas medidas eran tomadas cada una hora.

Mediante este trabajo logramos confeccionar una metodología que permite evaluar el comportamiento de las torres de enfriamiento de esta industria y de cualquier otra instalación de este tipo.

INTRODUCCION

Uno de los más importantes procesos de transferencia de calor que se encuentran en ingeniería es el intercambio de calor entre fluidos diferentes, que pueden ser por contacto directo o por contacto indirecto, dentro de los intercambiadores por contacto directo tenemos las torres de enfriamiento, las que a su vez pueden ser de tiro mecánico o de circulación natural.

En este equipo el aire llega al interior en contacto directo con el agua y se mezcla con el vapor formado en la torre por vaporización parcial del agua. Se trata de un proceso combinado de transferencia de calor y de masa.

Existen varios procesos de flujo estacionarios durante los cuales se rocía o pulveriza agua relativamente caliente dentro de una corriente de aire, siendo generalmente el objetivo enfriar el agua (como es en la torre de enfriamiento). Como en muchas plantas industriales el agua fría cruda es muy escasa, de manera que no se permite su uso ilimitado como medio de enfriamiento. Se utilizan torres de enfriamiento con este propósito para poder usarla de nuevo en el proceso.

Generalmente se utilizan torres de tiro mecánico, que son aquellas en las cuales el aire se le suministra a través de un ventilador, ya que garantizan un enfriamiento de agua más estable, puesto que permiten regular la temperatura mediante la variación del número de revoluciones o la

desconexión de algunos ventiladores.

Las torres de enfriamiento con ventiladores, gracias a sus ventajas ante estos tipos de enfriadores, en los últimos 30 años se difunden cada vez más. La elevada economía de los ventiladores axiales modernos y también el perfeccionamiento de la construcción (del diseño) de las torres enfriadoras con ventiladores condicionan su uso, inclusive en aquellas industrias donde casi no se usaban, por ejemplo en las centrales eléctricas y otras esferas.

Con este trabajo se ha logrado obtener un algoritmo que permite llegar a través de una corrida de datos, a los valores o parámetros teóricos con los que debe trabajar una torre por diseño y realmente y poder comparar en la práctica el estado de comportamiento y aprovechamiento de las posibilidades con que se diseñan y trabajan las torres de enfriamiento que serán sometidas a este tipo de evaluación. Nuestra aspiración es que el presente trabajo sirva como una herramienta práctica y de estudio en la evaluación del comportamiento de las torres de enfriamiento de la fábrica de Níquel Comandante Ernesto Che Guevara y de su utilización como consulta o aplicación en las demás empresas de la Unión del Níquel y/o de cualquier otra empresa del país que desee su utilización.

Ha sido nuestro interés acometer esta tarea ya que tiene una gran importancia el haber llegado a la confección de esta metodología de evaluación o comportamiento de las torres de enfriamiento para que sea utilizada como método e

Trabajo de
Diploma

Instituto Superior Minero Metalúrgico
Facultad Metalúrgica Electromecánica

Foja
No. ⁴_____

implantación en la planta de servicio energético de nuestra empresa, ya que hasta el momento no existía una norma de procedimiento para poder evaluar el rendimiento y aprovechamiento de la capacidad y/o trabajo de las torres de enfriamiento.

CAPITULO I

I. Generalidades sobre torres de enfriamiento.—

Los intercambiadores de calor son aparatos en los que el calor se transporta desde un flujo a otro. Uno de los más importantes procesos de transmisión de calor que se encuentran en ingeniería es el intercambio de calor entre fluidos diferentes, por ejemplo, la generación de vapor de características dadas en un generador de vapor moderno se basa en el proceso de transmisión de calor entre los fluidos. El proceso fundamental, entre condensadores y torres de enfriamiento de las centrales de energía térmica, en los calentadores de aire de los altos hornos y en muchos aparatos de la industria química, es el intercambio de calor entre los fluidos. Según la forma de trabajo, los intercambiadores de calor pueden clasificarse en recuperadores (intercambiadores con almacenamientos) y aparatos de contacto directo. Existen además intercambiadores de calor en los que el fluido es calentado o enfriado por medio de manantiales o sumideros de calor internos.

En los intercambiadores de calor de contacto, el calor es transmitido por contacto directo entre los fluidos caliente y frío y su mezcla. Intercambiadores de calor de esta clase son las torres de enfriamiento en la que el agua es enfriada por el aire atmosférico, en las que el aire llega al interior en contacto directo con el agua y se mezcla con el vapor formado en la torre por vaporización parcial del agua. Se trata de un proceso combinado de transferencia de

masa y de calor.

Hay varios procesos de fujos estacionarios durante los cuales se rocía o pulveriza agua relativamente caliente o fría dentro de una corriente de aire, siendo generalmente el objetivo enfriar el agua como en las torres de enfriamiento. Como en muchas plantas industriales el agua cruda fría es muy escasa, de manera que no se permite su uso ilimitado. Como medio de enfriamiento se utilizan las torres de enfriamiento, con el propósito de enfriar el agua y poder recircularla.

La temperatura disponible en el agua de enfriamiento se ha visto que es un importante factor económico en el diseño de las modernas plantas químicas y de fuerza. En las plantas químicas fija la presión de operación en los condensadores de los procesos de destilación y vaporización y consecuentemente en el equipo que lo produce. En las plantas de fuerza; fija la descarga de la turbina, la presión y la recuperación de calor óptimo. Por estas razones vitales el estudio de las torres de enfriamiento y la temperatura del agua que se puede obtener en ellas, es de gran importancia al implantar un proceso. Las torres de enfriamiento son también el miembro más simple de una clase de aparatos cuyas potencialidades han sido poco explotadas.

1.1.- Introducción.

Las torres de enfriamiento con ventiladores son construcciones para enfriar el agua en sistemas de retorno de

suministro de agua con entrega obligatoria del aire al espacio rociador mediante los ventiladores. En comparación con las torres de tiro natural y las rociadoras, las torres con ventiladores garantizan un enfriamiento del agua más estable, puesto que permiten regular la temperatura del agua enfriada mediante la variación del número de revoluciones o la desconexión de algunos ventiladores.

La temperatura del agua enfriada en las torres con ventiladores es inferior a la existente en las torres de tiro natural con idénticas condiciones (de 3 - 5 °C).

Las torres de enfriamiento con ventiladores, gracias a sus ventajas ante otros tipos de enfriadores, en los últimos 30 años se difunden cada vez más, la elevada economía de los ventiladores axiales modernos y también el perfeccionamiento de la construcción (del diseño) de las torres enfriadoras con ventiladores condicionaron su uso, inclusive en aquellas esferas de la industria donde antes casi no se usaban, por ejemplo en las centrales eléctricas.

1.2- Funcionamiento de la torre de enfriamiento.

El proceso de enfriamiento del agua, en la torre, ocurre a partir de un principio muy simple. La temperatura de bulbo húmedo representa la temperatura mínima a la cual es posible enfriar agua por vaporización; esta temperatura varía según la hora del día, el tiempo y la estación del año. En una torre de enfriamiento el agua desciende continuamente en forma de lluvia y la corriente de aire asciende. Donde

la temperatura del bulbo húmedo es más baja que la temperatura del agua. Cuanto menor sea la humedad del aire que entra, mayor será su efecto enfriador, si el aire está saturado no se consigue enfriamiento. El agua que ha de enfriarse se rocía dentro de la torre cerca de su parte superior y salpica al descender y caer sobre bandejas y placas desviadoras que hacen que la superficie del agua expuesta al aire sea tan grande como sea posible.

El aire no saturado que pasa a través de esta agua pulverizada se lleva el calor latente de una parte de ella, enfriándose en consecuencia. El desempeño de una torre de enfriamiento es independiente de la temperatura del bulbo seco del aire y depende solamente de la temperatura del bulbo húmedo del aire que está en contacto con el agua, esta indiferencia en la torre de enfriamiento (descuidarse de la temperatura del bulbo seco), es similar a la que se le da a la del bulbo húmedo si se tiene en cuenta la humedad relativa conque entra el aire por lo que es imposible que la temperatura del bulbo húmedo que tiene el aire haga extraer la misma que tiene el agua caliente. Como quiera que sea, al final del enfriamiento, esta condición puede acercarse si el aire incluido o forzado en la torre de enfriamiento se realiza a contraflujo en una forma óptima. Para que se logre la mayor economía en las torres es necesario que se mantenga un determinado rango de enfriamiento y cantidad de agua. Ahora bien, ocurre que el rango de enfriamiento es mayor si la cantidad de agua se

reduce y el rango es menor si la cantidad de agua aumenta. Tenemos que señalar que el desempeño de la torre de enfriamiento no varía si el rango de enfriamiento aumenta o disminuye la cantidad de agua. Es importante enfatizar que el aumento de agua que corre por la torre no da como resultado la disminución de la temperatura del agua enfriada. Hay que agregar que como el aire seco a temperatura constante se satura con agua a la misma temperatura en un aparato de contacto directo, el vapor de agua que sale con el aire lleva consigo su calor latente de vaporización. La humedad de la mezcla aire_agua_vapor aumenta durante la saturación, debido a que la presión del vapor de agua que sale del líquido es mayor que aquella en el aire no saturado, dando por resultado una vaporización cuando la presión del vapor de agua en el aire se iguala a la del líquido, el aire se satura y la vaporización cesa.

El volumen de la torre de enfriamiento (efectivo) es el producto del área efectiva (corte transversal) por la altura efectiva. La altura efectiva de la torre no es más que la distancia desde la base de la barbada hasta el centro de la línea de la plancha, en los que el sistema de distribución sea una especie de boquilla. La altura efectiva se toma desde la base de la barbada hasta el centro de la línea del sistema más ocho (8) pies.

El tiempo de contacto entre el aire y el agua está determinado por el tiempo que requiere el agua en pasar de la boquilla al depósito de agua que está debajo de la torre (

piscina). El tiempo de contacto puede no ser suficiente si la cantidad de aire que se necesita para el enfriamiento no es la necesaria para que la altura mínima de la torre sea mantenida. La superficie húmeda o mojada es el área total de la bandeja o deflectores y travesaños que están expuestos a mojarse dentro de la torre. La mayor superficie húmeda va a traer como consecuencia un mayor enfriamiento. El área de salpicadura es el área más efectiva para la superficie húmeda, está dada por el curso que el agua tenga para entrar en contacto íntimo con el aire cuando este hace salpicar el agua. Se denomina aproximación a la diferencia entre la temperatura del agua enfriada y la temperatura del bulbo húmedo.

1.3 - Principios del enfriamiento del agua en la torres.

Durante el enfriamiento del agua en las torres una parte del calor se transmite al aire atmosférico por cuenta de la evaporación superficial del agua (convertimiento de una parte del agua en vapor con transmisión de esta mediante la convección y la difusión, al aire) la otra parte: por cuenta de la diferencia de temperatura entre el agua y el aire, o sea, la termo-entrega por contacto (conductividad térmica y convección). Además cierta cantidad de calor se extrae del agua por cuenta de la radiación. Sin embargo, el calor transmitido por la radiación es tan pequeño, en comparación con otros tipos de entrega de calor, que este puede no tomarse en consideración al conformar el balance

térmico de las torres.

De acuerdo a la teoría cinética de los gases el mecanismo del proceso de evaporización del agua desde la superficie de contacto con el aire puede ser representado de la forma siguiente: Las moléculas de agua se hallan en un desordenado movimiento, sus velocidades oscilan en un amplio rango. Aquella moléculas que poseen mayor velocidad (precisemos, mayor energía cinética) se separan en el espacio situado sobre la superficie del agua (evaporización), pudiéndose separar del agua solo las moléculas más cercanas a la superficie del líquido, en la cual la componente de la velocidad normal a esta superficie es lo suficientemente grande y capaz de superar la fuerza de cohesión molecular. Las moléculas de agua se separan de la superficie, durante los choques con las moléculas de aire, varían la magnitud y la orientación de su movimiento. Cierta parte de las moléculas que se separan al chocar con las moléculas de aire pueden ser lanzadas de vuelta a la superficie del agua, condensándose. Una parte de las moléculas que se separan de la superficie del agua penetran en el aire como resultado de la difusión y la convección y ya sin remedio se pierde en forma de vapor de agua. Esta es la esencia del proceso de evaporación que se acompaña con una transferencia de masa. Existe el concepto de velocidad de evaporación, la cual se determina como una norma de cantidad de agua en unidad de tiempo. Cuando son iguales las presiones parciales del agua y el vapor, la velocidad de evaporación se considera igual

a cero, aunque el proceso de paso de las moléculas de la fase líquida a la de vapor no concluye, sino que se compensa por completo con el proceso inverso de condensación o sea con el proceso de paso de las moléculas de vapor a la fase líquida.

De tal forma que la cantidad de moléculas que se evaporan representa la diferencia entre la cantidad de moléculas que se separan de la superficie del agua y la cantidad de moléculas de vapor que se condensaron en esta superficie por unidad de tiempo.

La temperatura del agua se determina por la energía cinética de las moléculas que están en movimiento térmico; a la temperatura más alta le corresponde la mayor energía cinética media de las moléculas. La energía media de las moléculas que abandonan el agua es mayor que la de las que se quedan, por esto la temperatura del agua que se queda, como resultado de la evaporación, va a disminuir.

La parte de la energía de las moléculas que salen del agua, que se gasta en superar la fuerza de atracción, y también la energía gastada en incrementar el volumen durante la evaporación, determinan el calor de evaporación.

Las moléculas que se separan de la superficie del agua con mucha lentitud pasan al grosor del aire. La velocidad de su difusión se mide en decenas y centenas de partes. Esta velocidad es infinitamente pequeña en comparación con aquellas que usan las moléculas para abandonar la superficie del agua. Como resultado ocurre una acumulación bastante

rápida (casi instantanea) de las moléculas de vapor en la capa de aire que está en contacto directo con la superficie de evaporación. La presión parcial en esta capa crece tanto que la velocidad de difusión de las moléculas de vapor en el grosor del flujo de aire es igual a la diferencia entre la velocidad máxima de evaporación y la velocidad de condensación inversa, o sea, la velocidad de evaporación del agua. De esta manera se puede llegar a la conclusión de que la velocidad de evaporación en el aire se determina no por la velocidad del proceso de formación de vapor, que ocurre en la superficie de separación de la fase, sino, por la velocidad de difusión de las moléculas de vapor en la fase gaseosa.

La cantidad de moléculas que regresan de nuevo al agua durante la evaporación con la presión atmosférica es menor que la cantidad de moléculas que se separan al mismo tiempo de la superficie de evaporación. Ante una gran cantidad de moléculas que se separen de la superficie, directamente sobre la superficie del agua se formará una capa de vapor casi saturado. Esta situación fue descrita por primera vez por "Steyan", el cual señaló que la diferencia entre la presión del vapor saturado y la presión parcial del vapor es muy pequeña.

Para calcular los procesos de enfriamiento con evaporación en la torre de enfriamiento con un grado bastante exacto se toma por "Steyan" que es la capa de aire situada directamente en la superficie del agua, donde se acumula tal

cantidad de moléculas de vapor que le corresponde el estado de saturación, la temperatura del vapor en este caso es igual a la temperatura media del agua. La diferencia entre las temperaturas en las superficies de las gotas y las capas de agua en su grosor, puede desestimarse puesto que en la torre las dimensiones de las gotas y el grosor de las capas son pequeñas y ocurre una mezcla intensiva del agua. Por consiguiente la presión parcial de los vapores de agua en la capa de aire adyacente directamente a la superficie del agua es igual a la presión del vapor saturado ante la temperatura media del agua.

En caso general la masa fundamental del flujo de aire que se mueve sobre la superficie del agua en las torres de enfriamiento no está saturado con vapores de agua. Ante los valores de temperatura y presión, en las condiciones de trabajo de las torres de enfriamiento, se puede tomar que el vapor de agua se subordina a las leyes de los gases ideales, y entonces la presión parcial del vapor en la masa fundamental del flujo de aire a una temperatura puede presentarse como la multiplicación de la humedad relativa del aire por la presión del vapor de agua saturado.

1.4 - Clasificación de las torres de enfriamiento.

Las torres de enfriamiento modernas se clasifican de acuerdo con los medios por los que se les suministra aire. Todas emplean hilera horizontales de empaque para suministrar gran superficie de contacto entre el agua y el aire. En la

torre de enfriamiento de tiro mecánico, el aire se suministra en dos formas; si el aire se succiona a través de la torre mediante un ventilador situado en la parte superior de la torre, a este se le llama tiro inducido. Si el aire se forza a través de un ventilador situado en el fondo de la torre y se descarga por la parte superior, es de tiro forzado. Las torres se dividen en dos tipos: Atmosféricas o de circulación natural y de tiro mecánico.

1.4.1 - Torres de tiro mecánico.

Actualmente las torres de esta clase son las más comunes y de esta la gran mayoría son torres de tiro inducido. La preferencia hacia las torres de tiro inducido ha sido muy pronunciada, puesto que en su uso hay ventajas que exceden a todas las otras, excepto en condiciones muy especiales. En el tipo de tiro forzado, el aire entra a través de una abertura circular mediante un ventilador y debido a esto se debe suministrar una altura y volumen a la torre correspondiente a la inestabilidad relativa que se usa como entrada de aire. La distribución de aire es relativamente pobre, puesto que el aire debe dar una vuelta a 90° a gran velocidad. En la torre de tiro inducido, por otra parte, el aire puede entrar a lo largo de una o más paredes de las torres y como resultado, la altura requerida de la torre para la entrada de aire es más pequeña.

En la torre de tiro forzado el aire se descarga a baja velocidad a través de una gran abertura en la parte supe-

rior de la torre. En estas condiciones el aire posee una carga de velocidad pequeña y tiende a asentarse en la trayectoria de entrada del ventilador. Esto significa que la succión de aire fresco se contamina con aire parcialmente saturado que ya ha pasado por la torre con anterioridad. Cuando esto ocurre se conoce como recirculación y reduce la capacidad de trabajo de la torre de enfriamiento. En la torre de tiro inducido el aire se descarga a través del ventilador a alta velocidad, de manera que se proyecta hacia arriba hacia la corriente natural de aire que evita su asentamiento posterior. Sin embargo, las torres de tiro inducido presentan caída de tensión en la toma del ventilador, lo que aumenta los requerimientos totales de energía. La alta velocidad de descarga de la torre de tiro inducido causa también algo más de arrastre o pérdida de agua por gotas que son arrastradas por la corriente de aire.

1.4.2 - Torres de circulación natural.

Las torres de circulación natural o atmosféricas aprovechan las corrientes de aire atmosférico. El aire penetra por los rompevientos en una sola dirección, cambiando con la estación del año y las condiciones atmosféricas. En lugares expuestos que tienen vientos con velocidades promedio de 5 a 6 millas por hora, es decir, de 8.045 a 9.654 Km / h, las torres atmosféricas pueden ser las más económicas y donde los costos de energía sean altos pueden ser preferibles a velocidades de aire tan baja como de 2.5 a 3 millas por

hora, lo que será igual a 900 m/seg a 1080 m/seg puesto que la corriente atmosférica penetra a todo en ancho de la torre. Las torres se hacen muy costosas en comparación con otros tipos.

Se han construido torres de este tipo que tienen más de 609.75 m de largo. Las pérdidas por arrastre se manifiestan a todo lo largo y son mayores que en otros tipos de torres. Este tipo usa los potenciales disponibles más ineficientemente, ya que opera un flujo cruzado y se sabe que el uso más efectivo de los potenciales es a contraflujo. Cuando se desea agua a una temperatura cercana a la de bulbo húmedo, este tipo es incapaz de producirla.

Las torres atmosféricas tienen consecuentemente un costo inicial alto debido a su tamaño y cuando hay calma deben dejar de operarse, sin embargo, tienen una gran ventaja, que eliminan el costo principal de operación de la torre de tipo mecánico, es decir, el costo de la energía para el ventilador.

El área con velocidad promedio de viento bajo, los cargos fijos y costo de operación contrarrestan sus ventajas. Un promedio de velocidad que exceda a los 8.045 a 9.654 Km/h no es indicación suficiente de que la torre atmosférica sea la mejor con un promedio de velocidad en el viento de 8.045 Km/h. La torre opera a menor capacidad que la de diseño parte del tiempo.

La localización de la torre en una localidad con vientos de 8.045 Km/h debe ser tal que no debe tener obstrucciones y

debe aprovechar completamente la corriente existente. Las torres de tiro natural operan de la misma manera que la chimenea de un horno. El aire se calienta en la torre por el agua caliente con la que entra en contacto, de manera que su densidad baja. La diferencia entre la densidad del aire en la torre y el exterior origina un flujo natural del aire frío en la parte inferior y una expulsión del aire caliente menos denso por la parte superior.

Las torres de tiro natural deben ser altas para promover este efecto y deben tener sección transversal grande debido a la baja velocidad con que el aire circula comparada con las torres de tiro mecánico. Las torres de tiro natural consumen más energía para el bombeo, sin embargo, eliminan el costo de la potencia del ventilador y puede ser más aconsejable en algunas localidades que las torres atmosféricas. En las torres atmosféricas debe enfatizarse la característica del viento. En las torres de tiro natural la consideración primordial debe darse a las características del aire. Si es costumbre que el aire alcance altas temperaturas durante el día, siendo menor con relación a la temperatura del agua caliente las torres de tiro natural cesarán de operar durante la parte caliente del día. Los costos iniciales y cargos fijos de estas torres son algo altos, por lo que han pasado de moda.

1.5 - Condiciones de proceso para torres de enfriamiento.

Desde el punto de vista de corrosión de tubos, 120 °F es la

máxima temperatura a la que el agua de enfriamiento emerge ordinariamente de los equipos tubulares. Algunos de los productos líquidos en una planta se enfrían por debajo de 120 °F para prevenir un cruce apreciable de temperatura dentro del equipo tubular. La temperatura del agua en una torre de enfriamiento raramente excede los 120 °F siendo usualmente menor. Cuando la temperatura del agua de un proceso está sobre 120 °F la evaporación adicional puede justificar el uso de un enfriador atmosférico que prevea el contacto directo entre el agua caliente y el aire.

La diferencia entre la temperatura del agua a la salida de la torre y la temperatura de bulbo húmedo se llama aproximación. Puesto que muchas torres de enfriamiento operan casi sobre el mismo rango de agua, la aproximación es el índice principal de qué tan difícil será la operación, así como una indicación del número de unidades de difusión que se requieran. En el estudio de las torres a veces se tiene la impresión de que la torre no puede operar cuando la temperatura del aire a la entrada esté a la altura del bulbo húmedo. Esto por supuesto no es así, cuando el aire a la temperatura del bulbo húmedo entra en la torre, recibe calor proveniente del agua caliente y su temperatura aumenta por lo que ya no se está saturando. Entonces el agua se evapora continuamente en el aire a medida que este se desplaza hacia arriba en la torre. Una de las características apreciables en la torre de enfriamiento se conoce como producción de niebla, cuando el aire caliente saturado

a la salida de la torre se descarga en la atmósfera fría, ocurre condensación. Esto puede causar una niebla densa que al descender sobre una porción de la planta incrementa los riesgos de seguridad. Si se toman precauciones durante el diseño inicial, la condensación puede producirse por medio de la disminución de la temperatura de salida del aire, si se desea mantener un rango fijo para el agua de enfriamiento en enfriadores y condensadores. La niebla puede reducirse mediante recirculación de parte del agua del depósito hacia la parte superior de la torre donde se combina con el agua caliente de los enfriadores y condensadores. Este reduce la temperatura del agua en la torre, mientras que la térmica permanece igual.

El principal gasto de la operación además de la inversión inicial, será el de bombeo para recircular el agua que no entra en los enfriadores y condensadores.

1.5.1 - Determinación del número de unidades de difusión.

El número de unidades de difusión está determinado únicamente por las condiciones del proceso impuesto a la torre y no por el comportamiento propio de la torre. Se deben poner en contacto con cantidad de agua a una temperatura de entrada determinada y una cantidad de aire a un bulbo húmedo dado. Se requiere en cualquier tipo de torre, ya sea empacada o vacía la altura de la torre, que es capaz de proveer un número predeterminado de unidades de difusión. Varía para cada tipo de empaque y con la carga de líquido

y gas.

Puesto que la temperatura del agua no es una función simple de H y H_1 es más conveniente efectuar la integración de la siguiente ecuación:

$$Nd = \frac{dT}{cH' - H}$$

$$Nd = Kx \times a \times \frac{V}{2}$$

por medios gráficos o numéricos. El medio gráfico es el más indicado, ya que el número es más aceptable cuando la aproximación sea pequeña. (diferencia de temperatura entre el bulbo húmedo y la temperatura de salida del agua), por eso es que explicamos como es que se realiza el método gráfico: La entalpía de saturación tabuladas H' para el aire, se grafica contra la temperatura del agua en el rango de la torre. Los valores de saturación de H' forman una curva que son los valores del aire saturado a la temperatura del agua, la que se puede considerar que pertenece a la película de aire saturado en la superficie del agua, ya que la entalpía de saturación también incluye las humedades de saturación. Esta línea equivale a la presión de vapor de agua fuera de esta. Como la entalpía del aire a la entrada H_1 se conoce o puede determinarse fácilmente, para determinar H_2 se calcula por la siguiente ecuación:

$$H_2 = H_1 + \frac{L}{G} (T_2 - T_1)$$

Como una ayuda deberá aclararse que el área en la gráfica entre la curva de saturación y la línea de operación es una indicación del potencial que promueve la transferencia total de calor. Un cambio en las condiciones del proceso, de tal manera que la línea de operación se mueva hacia abajo para incluir una mayor área entre ella misma y la línea de saturación, significa que menos unidades de difusión y menor altura se requieren para cualquier tipo de torre. A cualquier temperatura en la columna entre T_1 y T_2 , el potencial que expulsa el calor fuera de la película saturada en la superficie del agua hacia el aire saturado es la diferencia entre el valor de H' y H en ese punto. Tomados pequeños incrementos de T y dividiendo por la diferencia promedio de $H' - H$ para el incremento, se tiene el número de unidades de difusión requerido para el cambio en la temperatura del agua. Cuando los incrementos se suman, el cambio total de la temperatura del agua da el valor total de unidades de difusión. Como ya se mencionó el punto de la línea de operación H_1 se obtiene de la condición atmosférica que entra a la torre por la parte inferior.

Para la determinación del número de unidades de difusión se realizan los pasos que a continuación se exponen:

- 1.- Se toman los datos de garantía de la torre de enfriamiento dados por el fabricante, tales como:

- temperatura del bulbo húmedo.
- temperatura de salida del agua.
- temperatura de entrada del agua.
- flujo de agua que entra a la torre.
- capacidad del ventilador.
- área transversal de la torre.

2.- Se determina la entalpía del aire a la entrada con la temperatura de bulbo húmedo.

3.- Se halla la velocidad másica y la carga líquida, posteriormente la fracción L/G.

4.- Después se calcula la entalpía del aire a la salida según:

$$H_s = H_e + \frac{L}{G} (T_e - T_s).$$

5.- Se ponen los puntos H_e y H_s en la gráfica y se traza la pendiente entre ambos puntos. En dicha gráfica se construye también la curva de saturación del aire contra la temperatura del rango de la torre.

6.- Se determina el potencial para la transferencia de calor según:

$$N_d = K_x \times a \times \frac{V}{2}$$

por medio de una integración numérica.

Si se desea hallar las unidades de difusión para una torre que trabaja con parámetros diferentes a los de garantía y se desea saber si la torre es capaz de enfriar la misma cantidad de agua, en caso que se den estos parámetros, se realizarán los cálculos que a continuación relacionamos:

- Se toman los valores actuales de trabajo de la torre, T_{bh} , T_s , T_e y se realizan con estos parámetros los pasos 2, 4, 5, y 6 de la metodología dada anteriormemnte.

1.6 - Construcción de las torres de enfriamiento.

En la parte superior de la torre de enfriamiento va incluida una instalacin de lluvia a la que se conduce el agua caliente. La estructura superior de la torre tiene forma de chimenea, de modo que el aire aspirado lateralmente por debajo, atraviesa la lluvia de agua caliente, la enfría y el aira caliente sale por la chimenea. El agua enfriada se recoge en un depósito colector situado debajo de la torre. En este depósito de hormigón armado se apoya la instalación de lluvia. El andamiaje se construye de hormigón de gran compacidad pues el agua gotea constantemente sobre el mismo, y en consecuencia se encuentra en malas condiciones de soportar las influencias externa. La circulación del agua de servicio, en circuito cerrado, provoca generalmente el enriquecimiento de la misma en anhídridos sulfurosos, que acabarán destruyendo al hormigón. Las paredes interiores del depósito deben proyectarse en un buen impermeable. Las construcciones sobre el depósito colector, primeramente se hacen de madera, más tarde en las grandes torres de enfriamiento de acero con revestimiento de madera. Esta instalación dura poco, pues con el aire húmedo la madera se pudre y el acero se oxida, por ello hoy está generalizada la construcción con hormigón armado. La intensa exposición

al calor por los vapores ascendentes hace necesario el empleo de un hormigón compacto de telametálica de acero, de mallas estrechas. La superestructura en forma de torre de hormigón armado suele consistir en una chimenea cilíndrica o prismática, que descansa en la infraestructura, por tanto en la instalación de lluvia, para el enlace de la chimenea con la infraestructura, es necesario a veces un cuerpo intermedio cupoliforme. La construcción de la chimenea de la torre exige encofrado y andamiajes importantes. Para evitarlo se recurre a la construcción con bloques o ladrillos de hormigón de formas especiales y armadura longitudinal y transversal, incluidas en los huecos de los bloques y en la junta, además es conveniente forrar el interior de la torre con un bloque monier, para impedir el paso de la humedad.

Las grandes torres de enfriamiento se ~~construyen~~ actualmente en forma de hiperboloide. El diámetro interior de estas torres llega hasta 55 m, la altura sobre el depósito colector hasta 68 m, el espesor de las paredes de la torre hasta 13 cms. El hiperboloide se apoya sobre un sistema circular de soporte, dispuesto en diagonal, que llega a tener hasta 8 m de altura. Por esta torre entra una gran cantidad de aire que entra por los soportes diagonales de la zona inferior y abandona la torre por su boca superior. Todas las aristas de los soportes diagonales deben corresponderse, así como la de los dinteles del aro de apoyo para favorecer al circulación del aire. La instalación interior

de lluvia (de madera o de hormigón armado) tiene una altura sobre el depósito colector de 12 m.

1.6.1.- Ubicación de las torres de enfriamiento.

La elección de la ubicación de la torre de enfriamiento y la orientación, se deben determinar por las condiciones siguientes:

- 1.- Situar la torre de modo que el aire circule y se difunda libremente y rápidamente sin recirculación.
- 2.- Situar las torres lejos de fuentes de calor o aire contaminado; tales como; chimeneas de humo, de polvo y otros gases.
- 3.- Situar las torres lejos de áreas en que sea rechazada la humedad fácilmente con el tiro.
- 4.- Situar las torres distantes o a nivel más alto de los espacios ocupados a sus alrededores, cuando existan bajos niveles de sonidos ambientales.

CAPITULO II. Método de evaluación y comportamiento de las torres de enfriamiento del ciclo II de la Fábrica de níquel Cmdte Ernesto Che Guevara.

2.1- Comportamiento y evaluación para las condiciones de diseño.

Según los datos climatológicos suministrados por la parte cubana y los cálculos realizados por la parte soviética, se dan a continuación las características de proyecto de las torres de enfriamiento del ciclo II de la fábrica Cmdte Ernesto Che Guevara.

$$T_{bs} = 32 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$L = 6 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$$

$$T_{bh} = 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$A = 144 \text{ m}^2 \text{ por torre}$$

$$Q = 72 \%$$

$$\# \text{ torres} = 6$$

$$T_{sa} = 32 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$G_a = 11\,000\,000 \text{ m}^3/\text{h} \text{ por torre}$$

$$T_{ea} = 49 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$G_{elt} = 5\,357 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (pág 19 proyecto)}$$

$$q_1 = 5.3 \%$$

$$N = 75 \text{ KW cada ventilador}$$

$$q_2 = 2.55 \%$$

$$\text{Cada torre tiene 18 tubos}$$

$$q_3 = 0.5 \%$$

$$\text{Cada tubo tiene 18 rociadores}$$

$$P_b = 5.7 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$P_{b\,6.1} = 2 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$G_{s1b} = 3\,150 \text{ m}^3/\text{h} \text{ cada bomba según la curva característica de la bomba.}$$

$$G_{s1} = 6\,622 \text{ m}^3/\text{h}$$

El número de torres se calcula según la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{m}^3 \text{ de agua a enfriar}}{\text{L} \cdot \text{A}}$$
$$\frac{5\,357 \text{ m}^3/\text{h}}{}$$
$$(\,6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}\,) (\,144 \text{ m}^2\,)$$

Esto era según proyecto del año 1974, se proyectaron 7 torres y se construyeron posteriormente, no obstante teniendo en cuenta las modificaciones hechas hasta febrero del año 1988 (según plano AD-1835) la cantidad de agua a enfriar en el ciclo II aumentó a 6070 m³/h.

Entonces el número de torres necesarias serían:

$$\frac{6\,070 \text{ m}^3/\text{h}}{}$$
$$= 7.03 \text{ secciones o torres}$$
$$(\,6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}\,) (\,144 \text{ m}^2\,)$$

Según el proyecto cada rociador deberá trabajar con una presión de entrada del agua de 3 Kgf/cm² para alcanzar su máxima eficiencia según la cual pasaría 3.5 m³/h y lograría un radio de pulverización de 0.715 mm. (El radio de pulverización y el flujo a pasar se hallan con la presión con ayuda del gráfico dado por proyecto). Ver gráfico No. I.

Si son siete secciones y cada sección tiene 18 tubos y cada tubo 18 rociadores, entonces la cantidad de rociadores es:

$$(\,18 \text{ tubos}\,) \cdot (\,18 \text{ rociadores}\,) \cdot (\,7 \text{ secciones}\,) = 2\,268 \text{ rociadores.}$$

La cantidad máxima de agua a pasar sería de :

$$(\,2\,268 \text{ rociadores}\,) \cdot (\,3.5 \text{ m}^3/\text{h}\,) = 7\,938 \text{ m}^3/\text{h.}$$

Según proyecto la presión de entrada del agua en la bomba B 6.1 a la entrada de la torre es de 2 Kg/cm^2 lo que corresponde a $3.06 \text{ m}^3/\text{h}$ por rociador y un radio de 0.615 mm , según gráfico del plano, lo cual da un flujo máximo de:

$$(2 \ 268 \text{ rociadores}) \cdot (3.006 \text{ m}^3/\text{h}) = 6 \ 940 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Según la curva característica de la bomba, para una presión de salida del agua de 5.7 Kg/cm^2 la bomba es capaz de entregar $3 \ 150 \text{ m}^3/\text{h}$, por lo tanto el número de bombas en operación a trabajar sería de:

$$\frac{6 \ 622 \text{ m}^3/\text{h}}{3 \ 150 \text{ m}^3/\text{h}} = 2.1 \text{ bombas}.$$

La eficiencia promedio de las torres del ciclo II sería:

$$N_p = \frac{T_{ea} - T_p}{T_{ea} - T_{bh}} \cdot 100$$

donde:

$$T_p = \frac{T_{bs} + 2 \cdot T_{bh} + T_{ea}}{4}$$

$$T_p = \frac{32 + 2 \cdot (28) + 49}{4}$$

$$T_p = 34.25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

entonces:

$$p = \frac{49 - 34.25}{49 - 28} \cdot 100$$

$$p = 70.24 \%$$

La eficiencia real de las torres sería de:

$$r = \frac{T_{ea} - T_{sa}}{T_{ea} - T_{bh}} \cdot 100$$

$$r = \frac{49 - 32}{49 - 28} \cdot 100$$

$$r = 80.95 \%$$

Vamos a calcular la carga de aire de una sección o torre, la que va a ser igual a la carga de todas las torres de este ciclo.

$$G_a = 1\,100\,000 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$A = 144 \text{ m}^2$$

$$G = \frac{G_a}{A}$$

$$G = \frac{1\,100\,000 \text{ m}^3/\text{h}}{144 \text{ m}^2}$$

$$G = 7\,638.89 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$$

Para llevar $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ a $\text{Kg}/\text{m}^2.\text{h}$ hay que multiplicar el número calculado por la densidad en Kg/m^3 . Para ello con T_{bs} se busca en la tabla 17.2 del "Kern" el volumen específico de la mezcla de aire + agua.

Entonces con $T_{bs} = 32^\circ\text{C}$ encontramos que el volumen específico de la mezcla de aire + agua es de 14.53 pies³/Lb, llevando esto al sistema internacional da 0.907 m^3/Kg que hallando su inverso da la densidad de la mezcla que no es mas que 1.10244 Kg/m^3 , entonces;

$$G = (7\,638.89 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}) \cdot (1.10244 \text{ Kg}/\text{m}^3)$$

$$G = 8\,421.4179 \text{ Kg}/\text{m}^2.\text{h}$$

Llevando $L = 6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ a Kg/m^2 debemos tener en cuenta que
 $1 \text{ ton} = 1 \text{ m}^3$ de agua por lo tanto $1 \text{ m}^3 = 1\,000 \text{ Kg}$ entonces:

$$L = (6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}) \cdot (1\,000 \text{ Kg}/\text{m}^3)$$

$$L = 6\,000 \text{ Kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$$

Calculando $\frac{L}{G}$ tenemos que;

$$\frac{L}{G} = \frac{6\,000 \text{ Kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}}{8421.4179 \text{ Kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

$$\frac{L}{G} = 0.71$$

Vamos a calcular la entalpía del aire que entra a la torre.
 Con $T_{bh} = 28^\circ\text{C}$ buscamos la presión de saturación del agua
 que tiene la mezcla de aire - agua con la ayuda de la tabla
 de vapor y hallamos que el valor de $P_w = 0.003853 \text{ Kg}/\text{cm}^2$.
 Ahora calcularemos la cantidad de agua que entra con el
 volumen de aire, según la siguiente ecuación:

$$X' = \frac{P_w}{P_t - P_w} \cdot \frac{M_w}{M_a}$$

$$M_w = 18$$

$$M_a = 29$$

$$P_t = 1.033 \text{ Kg}/\text{cm}^2$$

entonces;

$$X' = \frac{0.003853 \text{ Kg}/\text{cm}^2}{1.033 \text{ Kg}/\text{cm}^2 - 0.003853 \text{ Kg}/\text{cm}^2} \cdot \frac{18}{29}$$

$$X' = 0.024 \text{ Kg de agua} / \text{Kg de aire seco}$$

Calculamos la entalpía del aire a la entrada de la torre según la siguiente fórmula:

$$H_1 = X' \cdot T_{bs} + X' \cdot \lambda + C_{pa} \cdot T_{bs}$$

El calor específico del aire es de $C_{pa} = 0.24 \text{ KCal/Kg}^\circ\text{C}$.

El valor del calor latente promedio de vaporización λ se halla para el vapor de agua que está en el aire a $T_{bh} = 28^\circ\text{C}$ y se busca en la tabla de vapor saturado del "Vukalovitch" en la página 98.

donde:

$$\lambda = 581.5 \text{ KCal/Kg.}$$

entonces:

$$\begin{aligned} H_1 = & (0.024 \text{ Kg de agua/Kg aire seco }) \cdot (28^\circ\text{C}) + \\ & (0.024 \text{ Kg de agua/Kg aire seco }) \cdot (581.5 \text{ KCal/Kg }) \\ & + (0.024 \text{ KCal/Kg}^\circ\text{C}) \cdot (28^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

$$H_1 = 21.34 \text{ KCal/Kg de aire seco}$$

Ahora estamos en condiciones de calcular la entalpía de salida del aire de la torre, según la siguiente ecuación:

$$H_2 = H_1 + \frac{L}{G} \cdot (T_{ea} - T_{sa})$$

$$H_2 = 21.34 \text{ KCal/Kg} + 0.71 (49^\circ\text{C} - 32^\circ\text{C})$$

$$H_2 = 33.41 \text{ KCal/Kg}$$

Pasamos a calcular la entalpía de la mezcla de aire + agua desde una temperatura de 25°C hasta 50°C que comprende el rango entre la temperatura de entrada del agua hasta la salida de esta de la torre con vista a obtener la línea de saturación.

donde:

$$H1 = X' \cdot Tbs + X' \cdot \lambda + Cpa \cdot Tbs$$

y Pw se busca en la tabla de vapor saturado del "M.P.Vukalovitch" página 98. según la temperatura.

$$Mw = 29$$

$$Ma = 18$$

$$Pt = 1.033 \text{ Kg/cm}^2$$

cuando $T = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\begin{aligned} H1 &= 0.02 \text{ Kg de agua / Kg de aire seco} \cdot 32 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ &+ 0.02 \text{ Kg de agua / Kg de aire seco} \cdot 583.2 \\ &+ 0.24 \text{ KCal/Kg de aire} \cdot 32 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

$$H1 = 18.16 \text{ KCal/Kg de aire.}$$

Ver tabla No 1.

Ahora podemos graficar la linea de saturación de las torres del ciclo II en una gráfica de H contra temperatura del agua. Ver gráfica No IIa

Después de graficar la linea de saturación de la torre del ciclo II, vamos a calcular el número de unidades de difusión de las torres. Para ello utilizaremos el método de integración numérica.

Los valores de H2 se calculan según la fórmula siguiente:

$$H2' = H' + \frac{L}{G} \cdot (T2 - T1) \text{ para cada valor de } Ta.$$

con $L/G = 0.71$

$$H2' = 21.34 + 0.71 \cdot (32 - 31)$$

$$H2' = 22.05 \text{ KCal/Kg}$$

Ver tabla No 2.

Luego de hacer todos los cálculos que aparecen en esta tabla podemos calcular nd mediante la siguiente fórmula.

$$nd = Kxa \frac{V}{L} = \int_{T_{ea}}^{T_{sa}} \frac{dt}{(H_1 - H_2) av} = 1.551$$

Cálculo de las pérdidas de agua de las torres del ciclo II.

Las pérdidas tecnológicas son por proyecto del 5.3 %.

Si el flujo de agua que entra en la torre es de 6070 m³/h, entonces el bombeo inicial debería ser de:

$$100 \% - 5.3 \% = 94.7 \%$$

entonces;

$$\frac{6070 \text{ m}^3/\text{h}}{94.7 \%} = 6409 \text{ m}^3/\text{h}$$

Si cada bomba bombea 3150 m³/h para mantener 5.7 Kg/cm², según la curva característica, entonces son necesarias:

$$\frac{6409 \text{ m}^3/\text{h}}{3150 \text{ m}^3/\text{h}} = 2.03 \text{ bombas.}$$

Las pérdidas por evaporación serán de:

Si T_{bh} a la salida de la torre es de 36.9 °C según el gráfico Hvs.t y consideramos que el aire sale saturado de la torre, entonces;

37 °C	0.06398	38	0.06755
38 °C	0.06755	36.9	0.003241
1 °C	0.00357	1.1	0.06430

$$X = 0.00324$$

$P_w = 0.06430$ Kg/cm² presión de saturación del vapor.

La humedad en el aire de salida de la torre X será de:

$$X = \frac{P_w}{P_t - P_w} \cdot \frac{M_w}{M_a}$$

$$X = \frac{0.06430}{1.033 - 0.06430} \cdot \frac{18}{29}$$

$$X = 0.04119 \text{ Kg de agua / Kg de aire seco}$$

$$\Delta X = G \frac{(X - X')}{1000} = 1100000 \frac{(0.04119 - 0.024)}{1000 \cdot (0.881)}$$

$$\Delta X = 21.463 \text{ m}^3/\text{h para la sección.}$$

35 °C	0.873 m ³ /Kg	40	0.887
40 °C	0.887 m ³ /Kg	37.9	0.00588
5	0.014	2.1	0.881

$$X = 0.00588$$

Como son siete secciones entonces;

$(21.463 \text{ m}^3/\text{h}) \cdot 7 = 150.241 \text{ m}^3/\text{h}$ de pérdidas por evaporación que equivale a:

$$\frac{150.241 \text{ m}^3/\text{h}}{6070 \text{ m}^3/\text{h}} = 2.47 \% \quad 2.55 \% \text{ por datos del proyecto}$$

Si las pérdidas por arrastre mecánicos por proyecto son del 0.5 % entonces;

$$6070 - 150.241 = 5919.759 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$(5919.759) \cdot (0.5 \%) = 29.59 \text{ m}^3/\text{h}$$

Las pérdidas totales serían de:

$$339 + 150.241 + 29.59 = 518.831 \text{ m}^3/\text{h}$$

En un día (24 horas) la cantidad de agua de reposición sería de:

$$(518.831) \cdot 24 = 12\,451.944 \text{ m}^3 \text{ diarios.}$$

2.2- Comportamiento y evaluación para las condiciones reales de trabajo de las torres.

Según los datos climatológicos obtenidos mediante una prueba realizada y los cálculos efectuados en base a estos datos, se dan a continuación las características reales del ciclo II de las torres de enfriamiento de la fábrica de níquel Cmdte Ernesto Che Guevara.

$$\text{Cantidad de m}^3 \text{ de agua a enfriar} = 6\,070 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$L = 6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$$

$$A = 144 \text{ m}^2$$

1. El número de torres se calcula:

$$\frac{\text{m}^3 \text{ de agua a enfriar}}{L \cdot A} = \frac{6\,070 \text{ m}^3/\text{h}}{6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot 144 \text{ m}^2} = 7.03 \text{ Secc}$$

2. La eficiencia promedio de las torres es igual a:

$$\eta_P = \frac{T_{ea} - T_p}{T_{ea} - T_{bh}} \cdot 100$$

donde:

$$T_p = \frac{T_{bs} + 2 \cdot T_{bh} + T_{ea}}{4}$$

2.1. Temperatura promedio para cada hora.

$$T_{p9} = \frac{29.24 + 2 (25.59) + 39.04}{4} = 29.86 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Tp_{10} = \frac{29.63 + 2 (25.86) + 40.07}{4} = 30.35 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Tp_{11} = \frac{29.01 + 2 (25.20) + 38.17}{4} = 29.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Tp_{12} = \frac{30.67 + 2 (26.29) + 38.22}{4} = 30.37 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Tp_1 = \frac{30.76 + 2 (26.46) + 39.54}{4} = 30.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Tp_2 = \frac{30.72 + 2 (26.63) + 38.82}{4} = 30.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Tp_3 = \frac{30.54 + 2 (26.22) + 39.18}{4} = 30.54 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Tp_4 = \frac{29.48 + 2 (26.01) + 38.76}{4} = 30.06 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2.2. Eficiencia promedio para cada hora.

$$\eta_{p9} = \frac{39.04 - 29.86}{39.04 - 25.59} \cdot 100 = 68.25 \%$$

$$\eta_{p10} = \frac{40.07 - 30.35}{40.07 - 25.86} \cdot 100 = 68.40 \%$$

$$\eta_{p11} = \frac{38.17 - 29.4}{38.17 - 25.20} \cdot 100 = 69.15 \%$$

$$\eta_{p12} = \frac{38.22 - 30.37}{38.22 - 26.29} \cdot 100 = 65.8 \%$$

$$\eta_{p1} = \frac{39.54 - 30.8}{39.54 - 26.46} \cdot 100 = 66.81 \%$$

$$\eta_{p2} = \frac{38.82 - 30.7}{38.82 - 26.63} \cdot 100 = 66.61 \%$$

$$\eta_{p3} = \frac{39.18 - 30.54}{39.18 - 26.22} \cdot 100 = 66.66 \%$$

$$\eta_{p4} = \frac{38.76 - 30.06}{38.76 - 26.01} \cdot 100 = 68.23 \%$$

3.- Eficiencia real de las torres.

$$\eta_r = \frac{T_{ea} - T_{sa}}{T_{ea} - T_{bh}} \cdot 100$$

3.1- Eficiencia real para cada hora.

$$\eta_{r9} = \frac{39.04 - 32.29}{39.04 - 25.59} \cdot 100 = 50.18 \%$$

$$\eta_{r10} = \frac{40.07 - 29.3}{40.07 - 25.86} \cdot 100 = 75.79 \%$$

$$\eta_{r11} = \frac{38.17 - 28.28}{38.17 - 25.20} \cdot 100 = 76.25 \%$$

$$\eta_{r12} = \frac{38.22 - 29.35}{38.22 - 26.29} \cdot 100 = 74.35 \%$$

$$\eta_{r1} = \frac{39.54 - 29.3}{39.54 - 26.46} \cdot 100 = 78.28 \%$$

$$\eta_{r2} = \frac{38.82 - 29.45}{38.82 - 26.63} \cdot 100 = 76.86 \%$$

$$\eta_{r3} = \frac{39.18 - 29.56}{39.18 - 26.22} \cdot 100 = 74.22 \%$$

$$\eta_{r4} = \frac{38.76 - 29.64}{38.76 - 26.01} \cdot 100 = 71.52 \%$$

4.- Carga de la torre (líquida) L.

$$G = 2291 \text{ m}^3/\text{h} = \text{para una sección} = 697.75 \text{ m}^3/\text{h}.$$

$$A = 144 \text{ m}^2.$$

$$L = G \text{ para una sección / A para las 9.00 am.}$$

$$L = \frac{697.75}{144}$$

$$L = 4.84 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$$

$$L = 4\,840 \text{ Kg/m}^2.\text{h}$$

5.- Carga gaseosa de la torre (G)

$$Q_a = 1\,002\,240 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_e 66$$

$$G = \frac{Q_a}{A}$$

$$G = \frac{1\,002\,240}{144}$$

$$G = 8\,791.58 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$$

para llevar de $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$ a $\text{Kg/m}^2.\text{h}$, con $T_{bs} = 29.99 \text{ }^\circ\text{C}$, se busca en la tabla 17.2 del "Kern" el volumen específico.

$$T_{bs} = 29.99 \text{ }^\circ\text{C} + 32 = 61.99 \text{ }^\circ\text{F}$$

Con esta temperatura en $^\circ\text{F}$ buscamos el volumen específico de la mezcla de agua + aire, que será igual a 13.40 pies³/Lb, o sea, $0.8347 \text{ m}^3/\text{Kg}$ y hallando su inverso, nos da la densidad de la mezcla que es igual a 1.1980 Kg/m^3 .

$$G = 8791.58 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h} \cdot 1.1980 \text{ Kg/m}^3$$

$$G = 10\,532.31 \text{ Kg/m}^2.\text{h}$$

$$\frac{L}{G} = \frac{4840}{10\,532.31} = 0.4595$$

Luego pasamos a calcular:

- Entalpía de la entrada del aire (H1).
- Entalpía de la salida del aire (H2)
- Humedad del aire que entra (X')
- Con la diferencia de temperatura del bulbo húmedo buscamos la Pw en la tabla de vapor saturado del "M.P.Vukalovitch". página 98.

Según las siguientes ecuaciones:

$$H1 = X' \cdot Tbh + \lambda X' + Cpa \cdot Tbh$$

$$H2 = H1 + L / G (Tea - Tsa)$$

$$X' = \frac{Pw}{Pt - Pw} \frac{Mw}{Ma}$$

Luego, tabulamos; ver tabla No 3. Ahora con esta tabla ya podemos graficar la línea de operación para cada hora; ver gráficos III, IIIa, IIIb, IIIc, IIId, IIIe, IIIf, IIIg.

Con la temperatura en grados centígrados de entrada y salida para cada hora y en la tabla de vapor buscamos la Pw, , y calculamos X' y H1 por la siguiente fórmula.

$$X' = \frac{Pw}{Pt - Pw} \frac{Mw}{Ma}$$

$$H1 = X' \cdot T + X' \cdot \lambda + Cpa \cdot T$$

entonces tabulamos; ver tabla No 4.

Ahora pasamos a calcular el número de unidades de difusión para cada hora y para diferentes L/G según la siguiente fórmula:

$$\frac{(H_1 - H^*)}{2} = \frac{7.98 + 8.44}{2} = 8.21$$

$$H^{**} = H_1 + L/G (T_2 - T_1) = 18.73 + 0.46 (33 - 32.29) = 19.05$$

$$N_d = \frac{\int dt}{(H_1 - H) / 2}$$

$$N_d = 0.612$$

Ver tabla No 5, 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 y con estas podemos graficar la línea de saturación para cada hora ver gráficas I, Ia, Ib, Ic, Id, Ie, If, Ig. Luego tabulamos para hacer una comparación entre los datos por diseño y los reales al que está trabajando la torre. Ver tabla No 6.

Luego pasamos a calcular la humedad de salida del aire de la torre para diferentes horas.

Cálculo de la humedad de salida del aire de las torres en un turno (8 horas).

- 9.00 am -

$T_{bh} = 33.53$ °C. Suponemos que el aire está saturado $Q = 100 \%$

Presión del vapor saturado.

33 °C	0.05128	34 °C	0.05423
34 °C	0.05423	33.53	0.00138
1	0.00295	0.47	0.05284

$$0.47 \quad X = 0.00138$$

$$P_w = 0.05284$$

Cálculo de la humedad en el aire de salida de la torre.

$$X = \frac{P_w}{P_t - P_w} \frac{M_w}{M_a} \quad \begin{array}{l} P_t = 1.033 \text{ Kg/cm}^2 \\ M_w = 18 \\ M_a = 29 \end{array}$$

$$X = \frac{0.05284}{1.033 - 0.05284} \frac{18}{29}$$

X = 0.03346 Kg de agua / Kg de aire seco

- 10:00 am -

Tbh = 33.26 °C

Presión del vapor saturado Pw.

33 °C	0.05128	34 °C	0.05423
34 °C	0.05423	33.26	0.00218
1	0.00205	0.74	0.052047

0.74 X = 0.002183

Pw = 0.05204 Kg/cm²

Cálculo de la humedad del aire de salida de la torre.

$$X = \frac{P_w}{P_t - P_w} \frac{M_w}{M_a} \quad \begin{array}{l} P_t = 1.033 \text{ Kg/cm}^2 \\ M_w = 18 \\ M_a = 29 \end{array}$$

$$X = \frac{0.05204}{1.033 - 0.05204} \frac{18}{29}$$

X = 0.03292 Kg de agua / Kg de aire seco

- 11:00 am -

Tbh = 34.05 °C

Presión del vapor saturado Pw.

35 °C	0.05733	35 °C	0.05733
34 °C	0.05423	34.05	0.00294
1	0.0031	0.95	0.05438

0.95

$$X = 0.002945$$

$$P_w = 0.05438 \text{ Kg/cm}^2$$

Cálculo de la humedad del aire de salida de la torre.

$$X = \frac{P_w}{P_t - P_w} \frac{M_w}{M_a} \quad \begin{array}{l} P_t = 1.033 \text{ Kg/cm}^2 \\ M_w = 18 \\ M_a = 29 \end{array}$$

$$X = \frac{0.05438}{1.033 - 0.05438} \frac{18}{29}$$

$$X = 0.03449 \text{ Kg de agua / Kg de aire seco}$$

- 12:00 m -

$$T_{bh} = 34.17 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Presión del vapor saturado P_w .

35 °C	0.05733	35	0.05733
34 °C	0.05423	34.17	0.002573
1	0.0031	0.83	0.054757

$$0.83 \quad X = 0.002573$$

$$P_w = 0.05475 \text{ Kg/cm}^2$$

Cálculo de la humedad del aire de salida de la torre.

$$X = \frac{P_w}{P_t - P_w} \frac{M_w}{M_a} \quad \begin{array}{l} P_t = 1.033 \text{ Kg/cm}^2 \\ M_w = 18 \\ M_a = 29 \end{array}$$

$$X = \frac{0.05479}{1.033 - 0.05479} \frac{18}{29}$$

$$X = 0.0347383 \text{ Kg de agua / Kg de aire seco}$$

- 1:00 pm -

$$T_{bh} = 33.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Presión del vapor saturado P_w .

34 °C	0.05423	34 °C	0.05423
-------	---------	-------	---------

35 °C	0.05128	33.9	0.000295
1	0.00295	0.1	0.053935
0.1	X = 0.000295		

$$P_w = 0.05393 \text{ Kg/cm}^2$$

Cálculo de la humedad del aire de salida de la torre.

$$X = \frac{P_w}{P_t - P_w} \frac{M_w}{M_a} \quad \begin{array}{l} P_t = 1.033 \text{ Kg/cm}^2 \\ M_w = 18 \\ M_a = 29 \end{array}$$

$$X = \frac{0.05393}{1.033 - 0.05393} \frac{18}{29}$$

$$X = 0.03418 \text{ Kg de agua / Kg de aire seco}$$

- 2:00 pm -

$$T_{bh} = 34.24 \text{ °C}$$

Presión del vapor saturado P_w .

35 °C	0.05733	35 °C	0.05733
34 °C	0.05423	34.24	0.002356
1	0.0031	0.76	0.054974
0.76	X = 0.002356		

$$P_w = 0.05497 \text{ Kg/cm}^2$$

Cálculo de la humedad del aire de salida de la torre.

$$X = \frac{P_w}{P_t - P_w} \frac{M_w}{M_a} \quad \begin{array}{l} P_t = 1.033 \text{ Kg/cm}^2 \\ M_w = 18 \\ M_a = 29 \end{array}$$

$$X = \frac{0.05497}{1.033 - 0.05497} \frac{18}{29}$$

$X = 0.03488$ Kg de agua / Kg de aire seco

- 3:00 pm -

$T_{bh} = 34.09$ °C

Presión del vapor saturado P_w .

35 °C	0.05733	35 °C	0.05733
34 °C	0.05423	34.09	0.002821
-----	-----	-----	-----
1	0.0031	0.91	0.054509
0.91	$X = 0.002821$		

$P_w = 0.0545$ Kg/cm²

Cálculo de la humedad del aire de salida de la torre.

$$X = \frac{P_w}{P_t - P_w} \frac{M_w}{M_a} \quad \begin{array}{l} P_t = 1.033 \text{ Kg/cm}^2 \\ M_w = 18 \\ M_a = 29 \end{array}$$

$$X = \frac{0.0545}{1.033 - 0.0545} \frac{18}{29}$$

$X = 0.03457$ Kg de agua / Kg de aire seco

- 4:00 pm -

$T_{bh} = 33.86$ °C

Presión del vapor saturado P_w .

34 °C	0.05423	34 °C	0.05423
33 °C	0.05128	33.86	0.000413
-----	-----	-----	-----
1	0.00295	0.14	0.053817
0.14	$X = 0.000413$		

$P_w = 0.05381$ Kg/cm²

Cálculo de la humedad del aire de salida de la torre.

$$X = \frac{P_w}{P_t - P_w} \frac{M_w}{M_a} \quad \begin{array}{l} P_t = 1.033 \text{ Kg/cm}^2 \\ M_w = 18 \\ M_a = 29 \end{array}$$

Trabajo de
Diploma

Instituto Superior Minero Metalúrgico
Facultad Metalúrgica Electromecánica

Hoja
No. ⁴⁶

$$X = \frac{0.05381}{1.033 - 0.05381} \frac{18}{29}$$

$$X = 0.03410 \text{ Kg de agua / Kg de aire seco}$$

Ver tabla No 7.

CONCLUSIONES

Podemos observar, según los cálculos, que la carga de las torres en condiciones actuales está por debajo de la carga de diseño, lo que nos dice que la torre es capaz de admitir una mayor cantidad de agua para su enfriamiento según diseño, esto se reafirma con los valores obtenidos de aprovechamiento de la capacidad de las torres. Sin embargo podemos observar que a medida que aumenta la carga de la torre, la eficiencia de esta disminuye y viceversa; cuando la carga disminuye la eficiencia aumenta. Esto quiere decir que si nosotros aumentamos la carga a la torre, para obtener un aprovechamiento de su capacidad igual a la de diseño, tendríamos entonces una eficiencia mínima de la torre, lo que traería como consecuencia un aumento de la temperatura de salida del agua. Esto se explica debido a que la torre se diseña para parámetros atmosféricos diferentes a las condiciones climáticas en que se encuentran actualmente y se sabe que las condiciones climáticas es uno de los parámetros más importantes que determinan el diseño y construcción, así como la operación o comportamiento de las torres de enfriamiento.

RECOMENDACIONES

- 1.- Operar la torre con una carga aproximada o en el rango de $L/G = 0.52$ a 0.54 , aunque el aprovechamiento de su capacidad con respecto a la de diseño esté entre el 74 y 76 %, lo que permitirá mantener una temperatura de salida del agua de la torre por debajo de los 30°C .
- 2.- Que se implante el siguiente algoritmo como metodología en la planta de Servicios Energéticos para la evaluación del comportamiento de las torres de enfriamiento.
- 3.- Pedir a la Unión del Níquel que la presente metodología sea tomada como base para evaluar el comportamiento de las torres de la Unión, así como para valorar posibles ofertas para nuevas inversiones.
- 4.- A la dirección de la planta de Servicios Energéticos continuar el presente estudio y efectuar mediciones en el transcurso de los demás meses del año con vista a crear una carta de régimen de operación de dichas torres, de meses contra carga L/G que permita operar la torre a su máxima eficiencia de proyecto, tanto en el ciclo I como en el ciclo II.
- 5.- Realizar una tesis de grado en la que la presente metodología sea llevada a un programa de computación, el cual facilite la velocidad en la realización de los cálculos, lo cual permitirá conocer el comportamiento de las torres y tomar las medidas operacionales para llevarlas a su máxima eficiencia.

Bibliografía y referencia.

- 1.- Manual de conservación de la energía.
- 2.- Proceso de transferencia de calor. "Donal Keck".
- 3.- Propiedades termodinámicas del agua y el vapor. "M.P. Vukalovitch".
- 4.- Termodinámica. "Virgil Moring Faires".

Simbología adoptada y unidades.

Tbs	-Temperatura de bulbo seco	°C
Tbh	-Temperatura de bulbo húmedo	°C
φ	-Humedad relativa	%
Tsa	-Temperatura de salida del agua de la torre	°C
Tea	-Temperatura de entrada del agua a la torre	°C
q1	-Pérdida de agua tecnológica	%
q2	-Pérdida de agua por evaporación	%
q3	-Pérdida de agua por arrastre mecánico	%
L	-Carga líquida de la torre	m ³ /m ² .h
A	-Area de una sección de la torre	m ²
Ga	-Flujo de aire de un ventilador	m ³ /h
Gelt	-Flujo de agua de entrada de la torre	m ³ /h
G	-Flujo de aire de la torre	m ³ /h
N	-Potencia del ventilador	KW
Pb	-Presión de salida del agua de la bomba	Kgf/cm ²
Glsb	-Flujo de salida del agua de la bomba	m ³ /h
Gls	-Flujo de salida del agua del ciclo II	m ³ /h
Tp	-Temperatura promedio	°C
η_p	-Eficiencia promedio	%
η_r	-Eficiencia real	%
Pw	-Presión de saturación del agua	Kgf/cm ²
Pt	-Presión atmosférica	Kgf/cm ²
Mw	-Peso molecular del agua	
Ma	-Peso molecular del aire	
Cpa	-Calor específico del aire	
λ	-Calor latente promedio de vaporización	KCal/Kg

X'	-Humedad del aire que entra a la torre	Kg agua ----- Kg aire
X	-Humedad del aire que sale de la torre	Kg agua ----- Kg aire
H1	-Entalpía de entrada del aire	KCal/Kg
H2	-Entalpía de salida del aire	KCal/Kg
nd	-Número de difusión	
γ	-Volumen específico del aire a la temperatura ambiente del bulbo húmedo	m ³ /Kg

Tabla No 1
Tabla para calcular las entalpías de la línea de
saturación de la torre.

T (°C)	Pw (Kg/cm ²)	$\frac{X' \cdot P_w}{P_t - P_w} \cdot \frac{M_w}{M_a}$	λ (KCal/Kg)	H1 $X' \cdot T_{bs} + X' \cdot \lambda + C_{pa} \cdot T_{bs}$
25	.03229	.020	583.2	18.16
26	.03426	.021	582.6	19.02
27	.03634	.022	582.1	19.82
28	.03853	.024	581.5	21.34
29	.04083	.025	581.0	22.20
30	.04325	.027	580.4	23.68
31	.04580	.029	579.9	25.14
32	.04847	.030	579.3	26.01
33	.05128	.032	578.7	27.49
34	.05423	.034	578.2	28.97
35	.05733	.036	577.6	30.45
36	.06057	.038	577.0	31.93
37	.06398	.040	576.5	33.42
38	.06755	.043	575.9	35.51
39	.07129	.046	575.3	37.61
40	.07520	.048	574.7	39.10
41	.07931	.051	574.1	41.21
42	.08360	.054	573.5	43.31
43	.08809	.057	572.9	45.42
44	.09272	.061	572.4	48.16
45	.09771	.064	571.8	50.27
46	.10284	.068	571.3	53.01
47	.10821	.072	570.7	55.75
48	.11382	.076	570.1	58.49
49	.11967	.081	569.6	61.86
50	.12578	.086	569.0	65.23

Tabla No 2
Tabla para calcular según el método de integración numérica

Ta (°C)	H1' (KCal/Kg)	H2' (KCal/Kg)	H1'-H2' (KCal/Kg)	(H1'-H2')av	(H1'-H2')av/dt
32	26.01	21.34	4.67	—	—
33	27.49	22.05	5.44	5.055	0.197
34	28.97	22.76	6.21	5.825	0.171
35	30.45	23.47	6.98	6.595	0.151
36	31.93	24.18	7.75	7.365	0.135
37	33.42	24.89	8.53	8.140	0.122
38	35.51	25.60	9.91	9.220	0.108
39	37.61	26.31	11.30	10.605	0.094
40	39.1	27.02	12.08	11.690	0.085
41	41.21	27.73	13.48	12.780	0.078
42	43.31	28.44	14.87	14.175	0.070
43	45.42	29.15	16.27	15.570	0.064
44	48.16	29.86	18.30	17.285	0.057
45	50.27	30.57	19.70	19.000	0.052
46	53.01	31.28	21.73	20.715	0.048
47	55.75	31.99	23.76	22.745	0.043
48	58.49	32.70	25.79	24.775	0.040
49	61.86	33.41	28.45	27.120	0.036

Tabla No 3

Tabla para calcular las entalpías de la línea de operación de la torre

Hor	Tbh (C)	Pw (Kg/cm ²)	X ² Kg agua Kg aire	λ (KCal/Kg)	H1 ² (KCal/Kg)	L/G	Taa (C)	Tae (C)	H2 (KCal/Kg)
9:00 am	25.59	.03345	.0207	582.84	18.73	0.46	39.04	32.29	21.83
10:00 am	25.86	.03398	.0211	582.68	19.04	0.57	40.07	29.31	25.17
11:00 am	25.20	.03268	.0202	583.08	18.33	0.56	38.17	28.28	23.86
12:00 m	26.29	.03486	.0216	582.45	19.45	0.57	38.22	29.36	24.50
1:00 pm	26.46	.03521	.0219	582.37	19.68	0.54	39.54	29.30	25.20
2:00 pm	26.63	.03557	.0221	582.28	19.84	0.55	38.82	29.45	24.99
3:00 pm	26.22	.03471	.0215	582.49	19.38	0.58	39.18	29.56	24.95
4:00 pm	26.01	.03428	.0213	582.60	19.20	0.58	38.76	29.64	24.48

Tabla No 4
Valores maximos y minimos de H1 para cada curva de
saturacion en cada hora.

T (°C)	Pw (Kg/cm ²)	$\frac{X' \text{ agua}}{\text{Kg aire}}$	λ (KCal/Kg)	H1' (KCal/Kg)	Hora
32.29	.049280	.031	579.47	26.71	9:00
39.04	.071440	.046	575.32	37.63	9:00
29.31	.041580	.026	580.81	22.86	10:00
40.07	.075480	.048	574.65	39.12	10:00
28.28	.039174	.024	581.36	21.41	11:00
38.17	.068180	.043	575.79	35.56	11:00
29.36	.041700	.026	580.78	22.91	12:00
38.22	.068370	.043	575.76	35.57	12:00
29.30	.041550	.026	580.82	22.89	1:00
39.54	.069170	.044	574.97	36.52	1:00
29.45	.041919	.026	580.73	22.93	2:00
38.82	.070610	.045	575.40	36.95	2:00
29.56	.042180	.026	580.66	22.96	3:00
39.18	.071990	.046	575.19	37.66	3:00
29.64	.042370	.026	580.61	22.98	4:00
38.76	.070390	.045	575.44	36.94	4:00

Tabla No 5
Numero de unidades de difusion. Hora: 9:00 am $L/G = 0.46$

T_a (°C)	H_1' (KCal/Kg)	H_1 (KCal/Kg)	$H_1' - H$	$(H_1' - H)/2$	$dT/(H_1' - H)/2$
32.29	26.71	18.73	7.98	-	-
33.00	27.49	19.05	8.44	8.21	.086
34.00	28.97	19.51	9.46	8.95	.111
35.00	30.45	19.97	10.48	9.97	.100
36.00	31.93	20.43	11.50	10.99	.090
37.00	33.42	20.89	12.53	12.01	.083
38.00	35.51	21.35	14.16	3.34	.074
39.00	37.61	21.81	15.80	14.98	.066
39.04	37.63	21.83	15.80	15.80	.002

$N_d = 0.612$

Tabla No 5.1
Numero de unidades de difusion. Hora: 10:00 am L/G = 0.57

T_a (°C)	H_1' (KCal/Kg)	H_1 (KCal/Kg)	$H_1' - H$	$(H_1' - H)/2$	$dT/(H_1' - H)/2$
29.31	22.86	19.04	3.82	-	-
30.00	23.68	19.43	4.25	4.04	.171
31.00	25.14	20.00	5.14	4.70	.212
32.00	26.01	20.57	5.44	5.29	.189
33.00	27.49	21.14	6.35	5.90	.169
34.00	28.97	21.71	7.26	6.81	.149
35.00	30.45	22.28	8.17	7.72	.129
36.00	31.93	22.85	9.08	8.63	.115
37.00	33.42	23.42	10.00	9.54	.104
38.00	35.51	23.99	11.52	10.76	.092
39.00	37.61	24.56	13.05	12.29	.081
40.07	39.12	25.16	13.96	13.51	.074

$N_d = 1.483$

Tabla No 5.2
Numero de unidades de difusion. Hora: 11:00 am L/G = 0.56

T_a (°C)	H_1' (KCal/Kg)	H_1 (KCal/Kg)	$H_1' - H$	$(H_1' - H)/2$	$dT/(H_1' - H)/2$
28.28	21.41	18.33	3.08	-	-
29.00	22.20	18.73	3.47	3.28	.219
30.00	23.68	19.29	4.39	3.93	.254
31.00	25.14	19.85	5.29	4.84	.206
32.00	26.01	20.41	5.60	5.44	.183
33.00	27.49	20.97	6.52	6.06	.165
34.00	28.97	20.53	7.44	6.98	.143
35.00	30.45	22.09	8.36	7.90	.126
36.00	31.93	22.65	9.28	8.82	.113
37.00	33.42	23.21	10.21	9.74	.102
38.17	33.56	23.85	11.71	10.96	.106

$N_d = 1.617$

Tabla No 5.3
Numero de unidades de difusion. Hora: 12:00 m $L/G = 0.57$

T_a (°C)	H_1' (KCal/Kg)	H_1 (KCal/Kg)	$H_1' - H$	$(H_1' - H)/2$	$dT/(H_1' - H)$
29.36	22.91	19.45	3.46	-	-
30.00	23.68	19.81	3.87	3.66	.174
31.00	25.14	20.38	4.76	4.31	.232
32.00	26.01	20.95	5.06	4.91	.203
33.00	27.49	21.52	5.97	5.51	.181
34.00	28.97	22.09	6.88	6.42	.155
35.00	30.45	22.66	7.79	7.33	.136
36.00	31.93	23.23	8.70	8.24	.121
37.00	33.42	23.80	9.62	9.16	.109
38.22	35.57	24.50	11.07	10.34	.117

$N_d = 1.428$

Tabla No 5.4
Numero de unidades de difusion. Hora: 1:00 pm L/G = 0.54

T_a (°C)	$H1'$ (KCal/Kg)	$H1$ (KCal/Kg)	$H1'-H$	$(H1'-H)/2$	$dT/(H1'-H)/2$
29.30	22.89	19.68	3.21	—	—
30.00	23.68	20.05	3.63	3.42	.204
31.00	25.14	20.59	4.55	4.09	.244
32.00	26.01	20.13	4.88	4.71	.212
33.00	27.49	21.67	5.82	5.35	.186
34.00	28.97	22.21	6.76	6.29	.158
35.00	30.45	22.75	7.70	7.23	.138
36.00	31.93	23.29	8.64	8.17	.122
37.00	33.42	23.83	9.59	9.11	.109
38.00	35.51	24.37	11.14	10.73	.093
39.54	36.52	25.20	11.32	11.23	.137

$Nd = 1.603$

Tabla No 5.5
Numero de unidades de difusion. Hora: 2:00 pm L/G = 0.55

T_a (°C)	H_1' (KCal/Kg)	H_1 (KCal/Kg)	$H_1' - H$	$(H_1' - H)/2$	$dT/(H_1' - H)/2$
29.45	22.93	19.84	3.09	-	-
30.00	23.68	20.14	2.99	3.04	.180
31.00	25.14	20.69	4.45	3.72	.268
32.00	26.01	21.24	4.77	4.61	.216
33.00	27.49	21.79	5.70	5.23	.191
34.00	28.97	22.34	6.63	6.16	.162
35.00	30.45	22.89	7.56	7.09	.141
36.00	31.93	23.44	8.49	8.02	.124
37.00	33.42	23.99	9.43	8.96	.111
38.82	36.95	24.99	11.96	10.69	.170

$N_d = 1.463$

Tabla No 5.6
Numero de unidades de difusion. Hora: 3:00 pm L/G = 0.58

T_a (°C)	$H1'$ (KCal/Kg)	$H1$ (KCal/Kg)	$H1'-H$	$(H1'-H)/2$	$dT/(H1'-H)/2$
29.56	22.96	19.38	3.58	-	-
30.00	23.68	19.63	4.05	3.82	.115
31.00	25.14	20.21	4.93	4.49	.227
32.00	26.01	20.79	5.22	5.08	.197
33.00	27.49	21.37	6.12	5.67	.176
34.00	28.97	21.95	7.02	6.57	.152
35.00	30.45	22.53	7.92	7.47	.133
36.00	31.93	23.11	8.82	8.37	.119
37.00	33.42	23.69	9.73	9.27	.107
38.00	35.51	24.27	11.24	10.48	.095
39.18	37.66	24.95	12.71	11.97	.098

$N_d = 1.419$

Tabla No 5.7
Numero de unidades de difusion. Hora: 4:00 pm $L/G = 0.58$

T_a (°C)	$H1'$ (KCal/Kg)	$H1$ (KCal/Kg)	$H1'-H$	$(H1'-H)/2$	$dT/(H1'-H)/2$
29.64	22.98	19.20	3.78	-	-
30.00	23.68	19.40	4.28	4.03	.089
31.00	25.14	19.98	5.16	4.72	.211
32.00	26.01	20.56	5.45	5.30	.166
33.00	27.49	21.14	6.35	5.90	.169
34.00	28.97	21.72	7.25	6.80	.147
35.00	30.45	22.30	8.15	7.70	.129
36.00	31.93	22.88	9.05	8.60	.116
37.00	33.42	23.46	9.96	9.50	.105
38.76	36.94	24.48	12.46	11.21	.157

$Nd = 1.311$

Tabla No 6
Comparacion de los datos por diseno y los reales a que esta trabajando la torre

Hora	L/3	L/6	Aprovechamiento de la capacidad de la torre	Tp (C)	np (%)	nr real (%)	nr diseno (%)	# unidades de difusion real (Nd)	# unidades de difusion por diseno (Nd)
9:00 am	.45	.71	64.78	29.86	68.25	50.18	80.95	0.612	1.551
10:00 am	.57	.71	80.28	30.35	68.40	75.79	80.95	1.485	1.551
11:00 am	.56	.71	78.87	29.40	69.15	76.25	80.95	1.617	1.551
12:00 m	.57	.71	80.28	30.37	65.80	74.35	80.95	1.628	1.551
1:00 pm	.54	.71	76.05	30.80	66.81	78.28	80.95	1.403	1.551
2:00 pm	.55	.71	77.46	30.70	66.61	76.86	80.95	1.463	1.551
3:00 pm	.58	.71	81.69	30.54	66.66	74.22	80.95	4.419	1.551
4:00 pm	.58	.71	81.69	30.06	68.23	71.52	80.95	1.311	1.551

Trabajo de
Diploma

Instituto Superior Minero Metalúrgico
Facultad Metalurgia Electromecánica

Hoja
No. —

Tabla No 7
Tabla para calcular según el método de
integración numérica

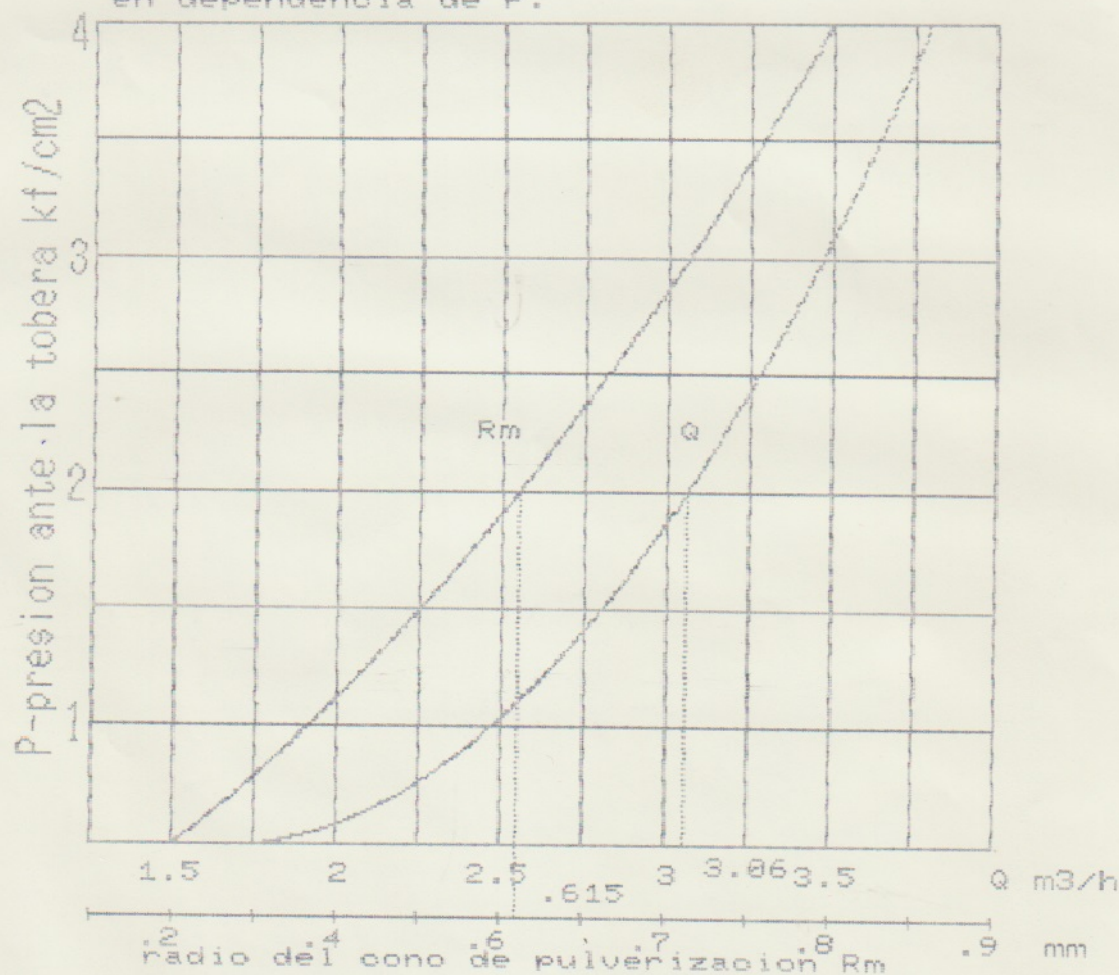
Hora	X'	X	G	δ'	dX
9:00 am	.0207	.03346	1002240	.868	14.73
10:00 am	.0211	.03292	1002240	.868	13.64
11:00 am	.0202	.03449	1002240	.870	16.46
12:00 m	.0214	.03473	1002240	.870	15.12
1:00 pm	.0219	.03418	1002240	.869	14.16
2:00 pm	.0221	.03488	1002240	.870	14.72
3:00 pm	.0215	.03457	1002240	.870	15.05
4:00 pm	.0213	.03410	1002240	.869	14.76

Tabla No 8
Porcientos en perdidas por vaporización

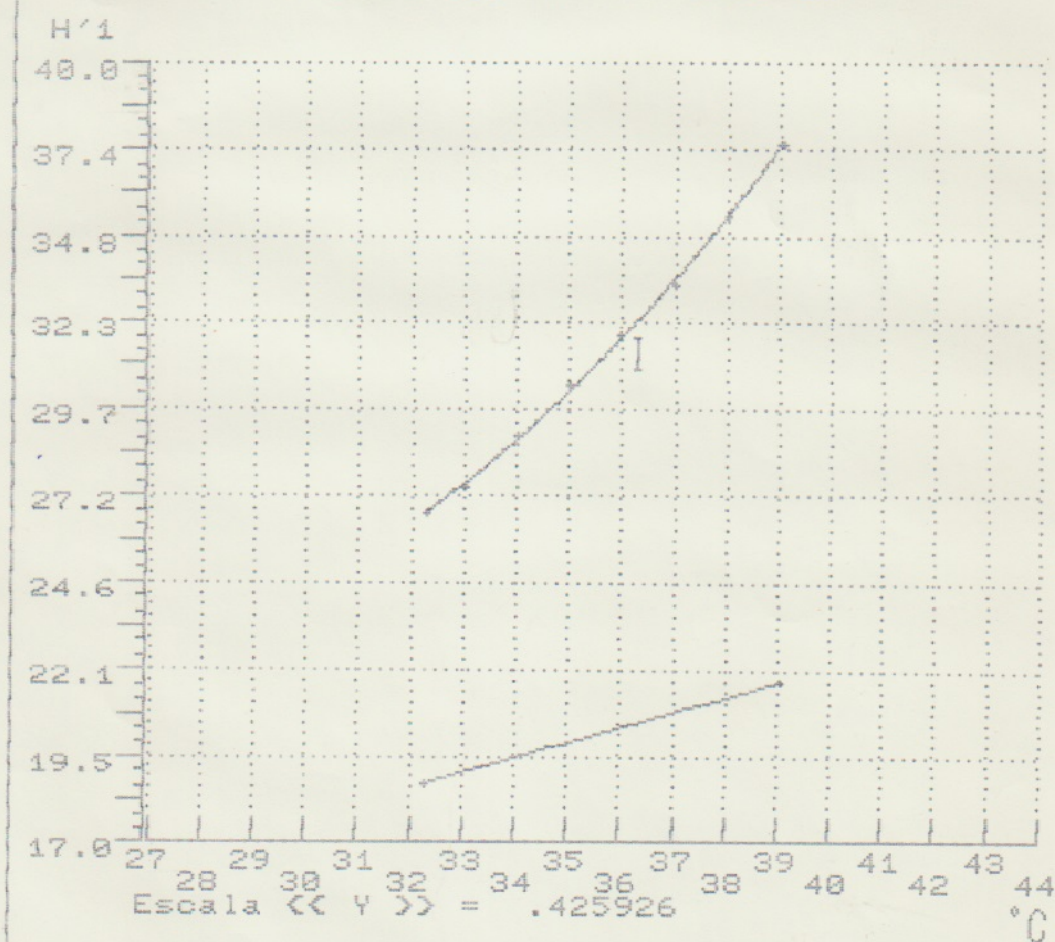
Hora	dX	L	% perdidas por evaporación	perdidas de agua por evaporación (4 torres)
9:00 am	14.73	2791	2.11	58.92
10:00 am	13.64	2760	1.97	54.56
11:00 am	16.46	2700	2.43	56.84
12:00 m	15.12	2743	2.20	60.48
1:00 pm	14.16	2618	2.16	56.64
2:00 pm	14.72	2644	2.22	58.88
3:00 pm	15.05	2786	2.16	60.20
4:00 pm	14.76	2797	2.11	59.04
	14.83	2730	2.17	59.32

Grafico No 1

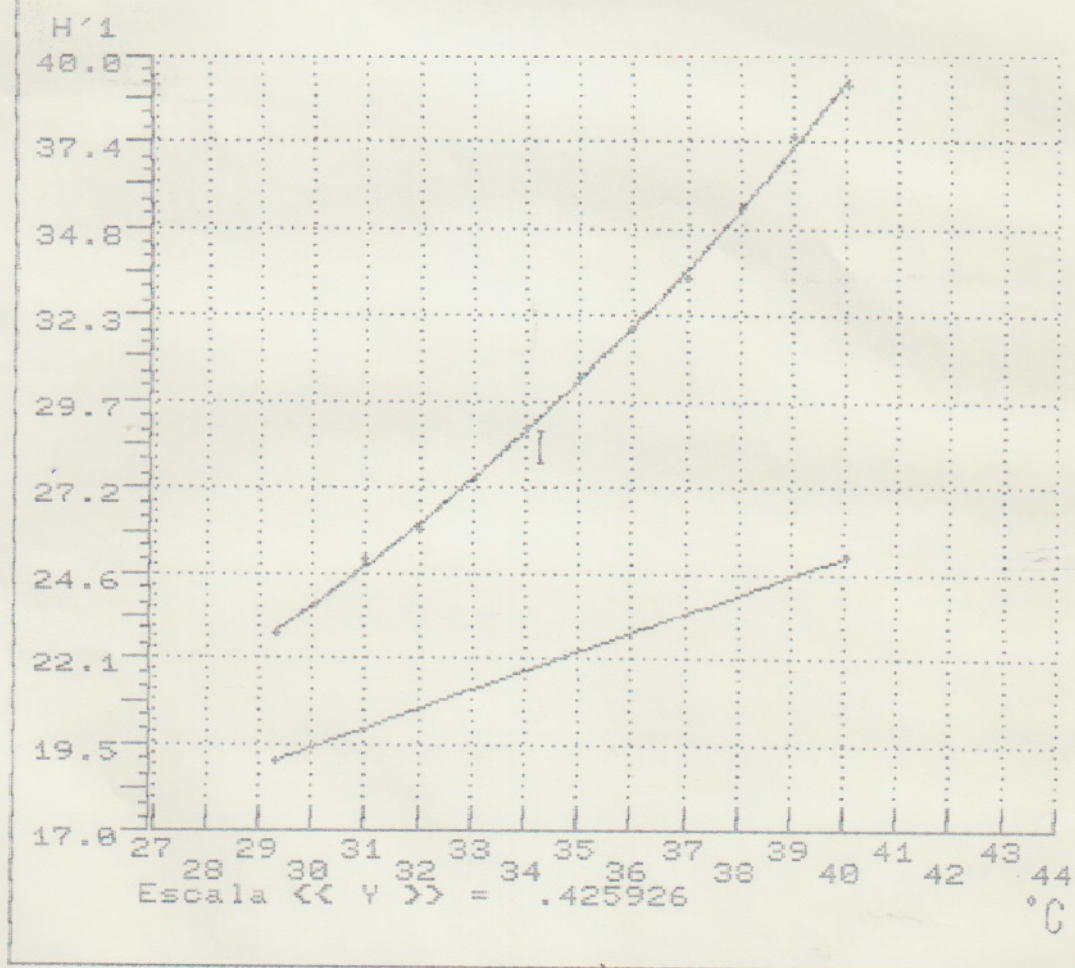
Grafico de la tobera para hallar Q y R_m
en dependencia de P .



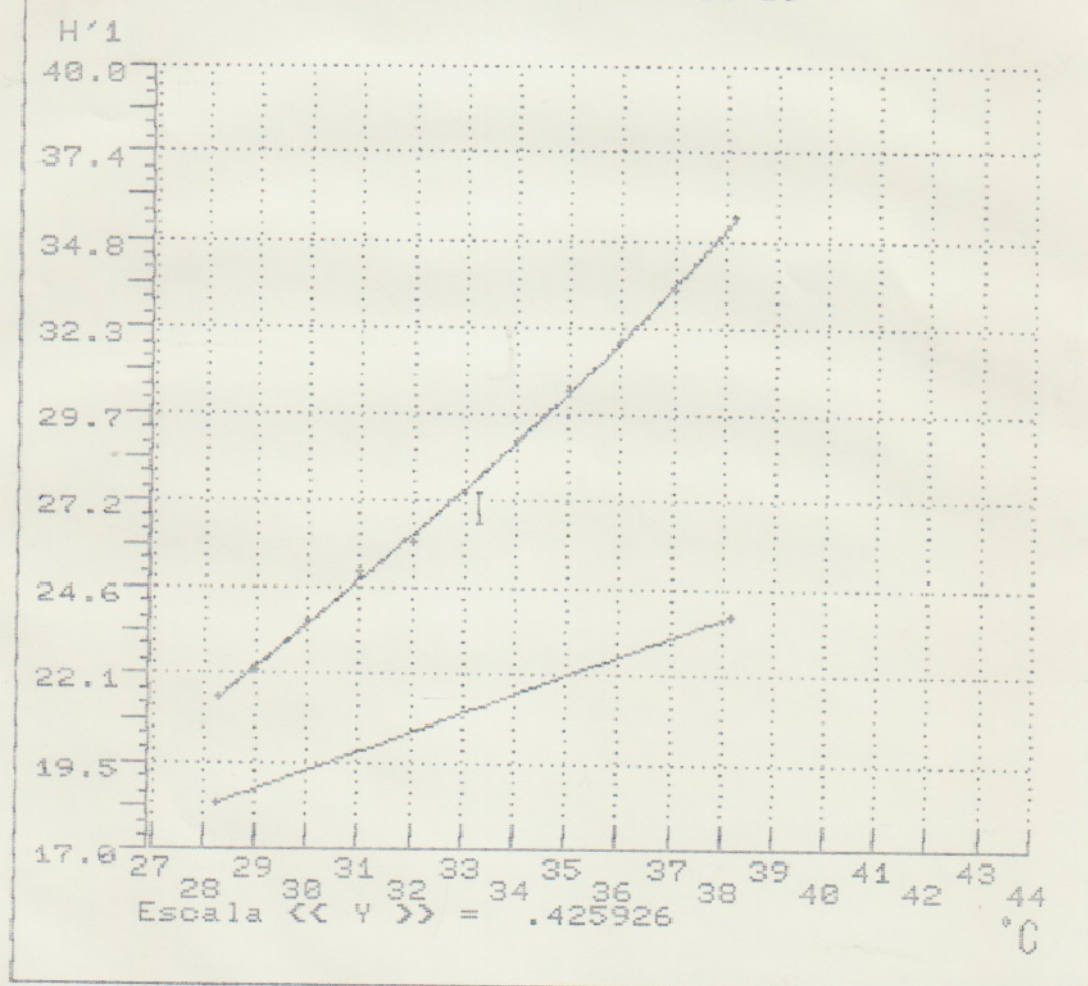
Gráfica II. Hora : 9:00 am



Gráfica II-a. Hora : 10:00 am



Gráfica II-b. Hora : 11:00 am



Gráfica II-c. Hora : 12:00 m

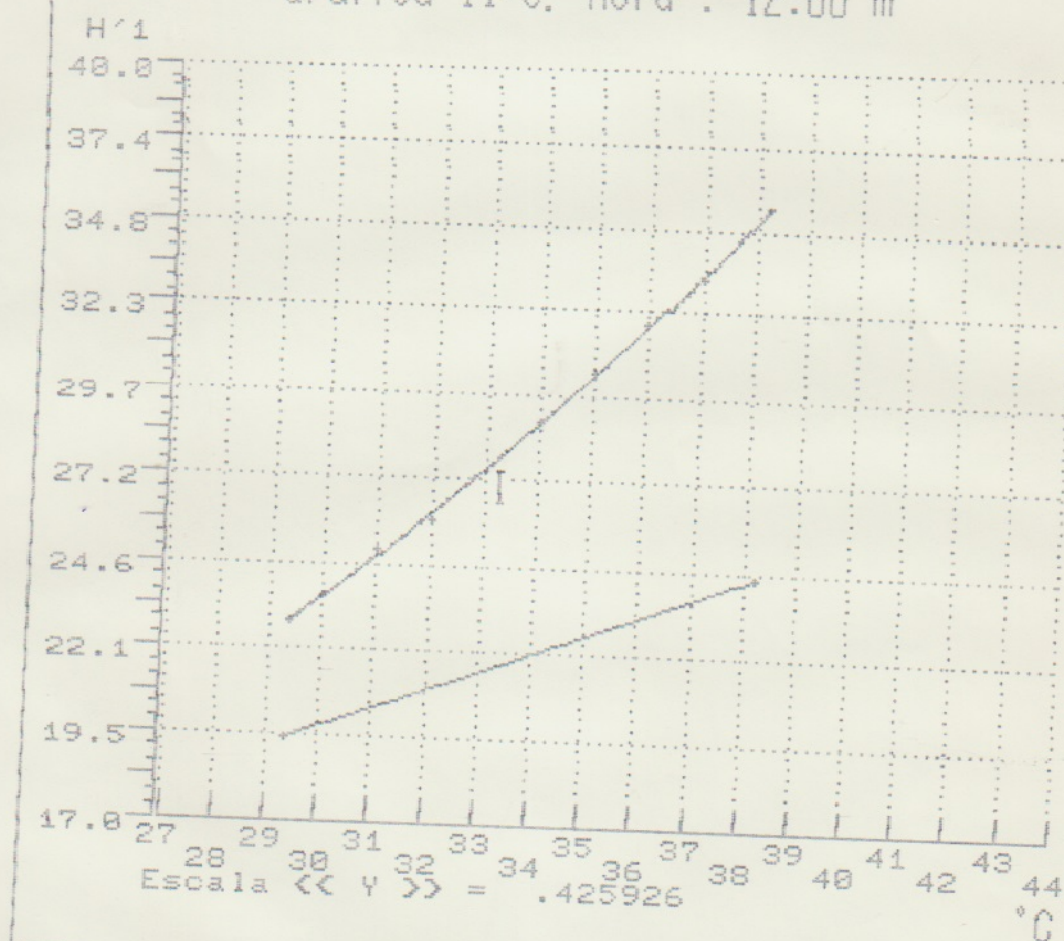
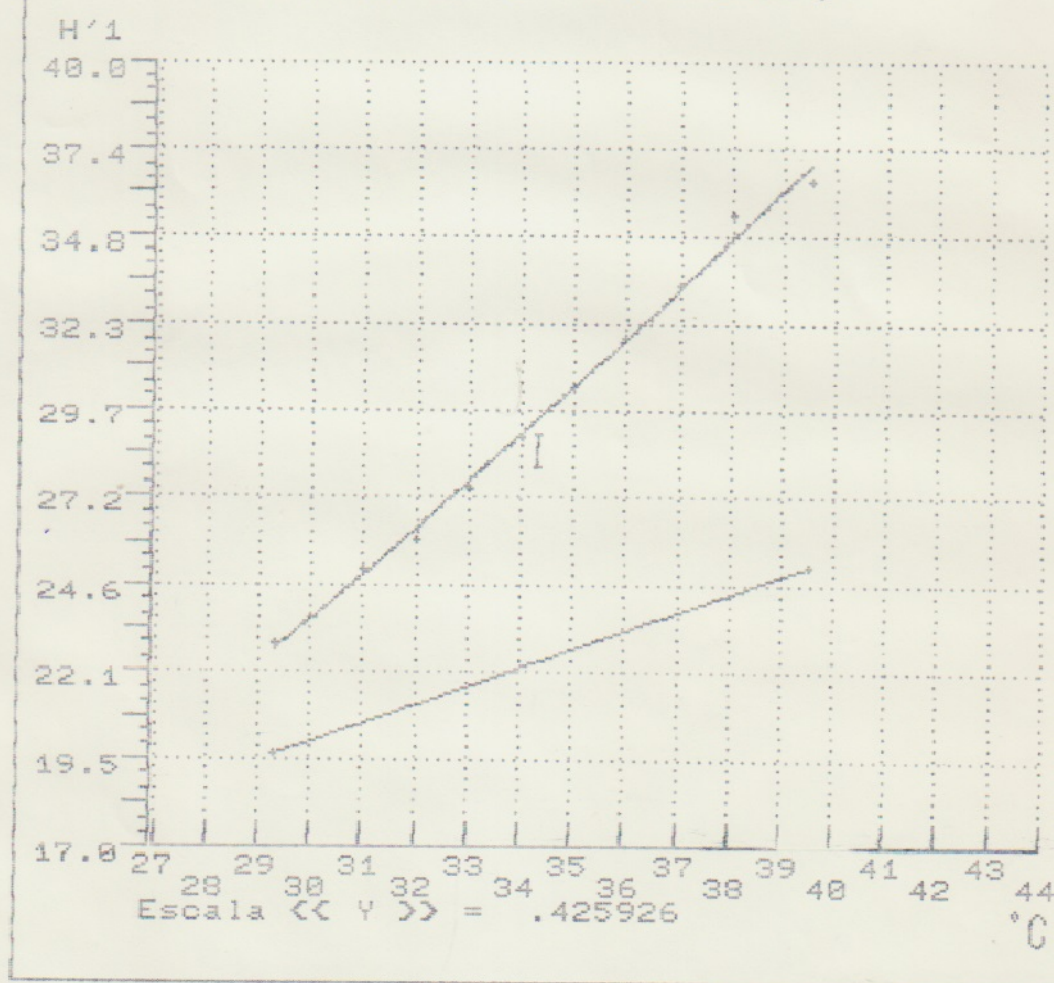
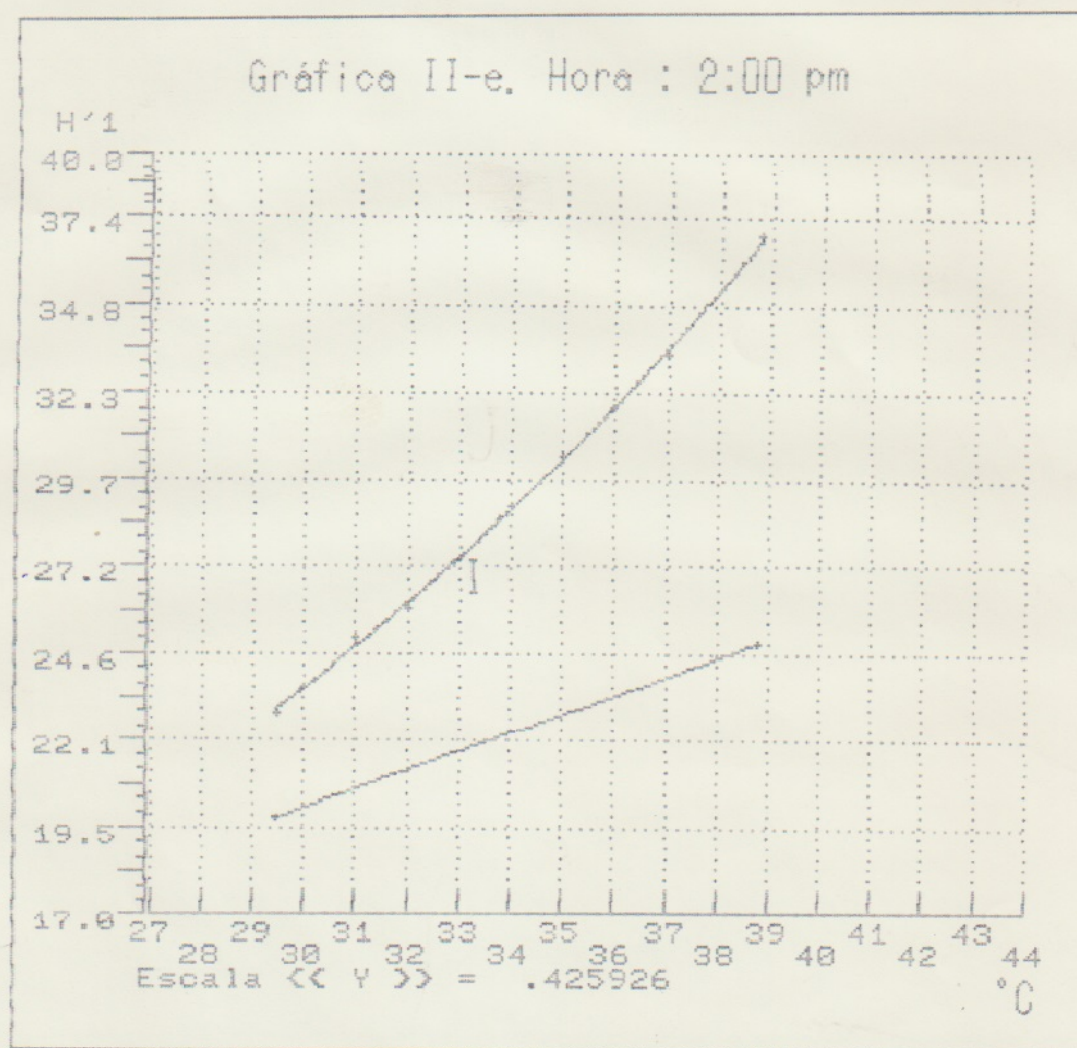
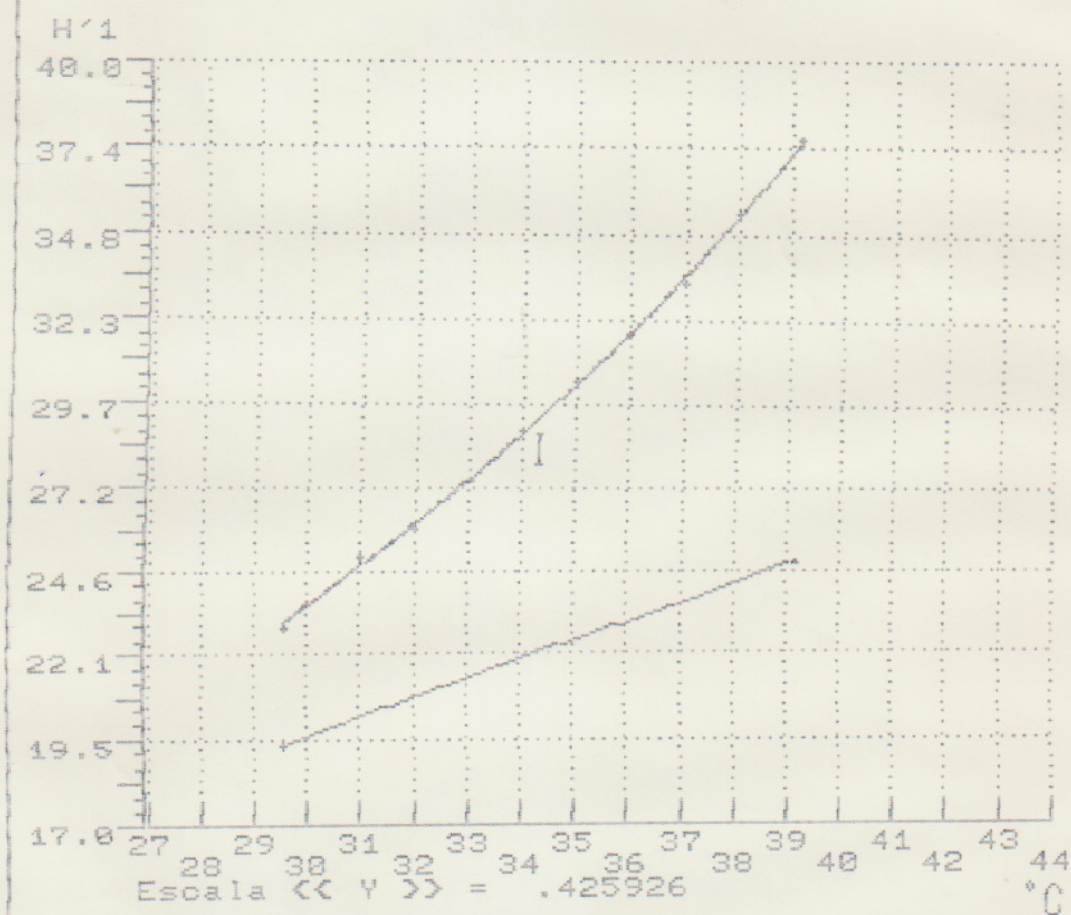


Gráfico II-d. Hora : 1:00 pm

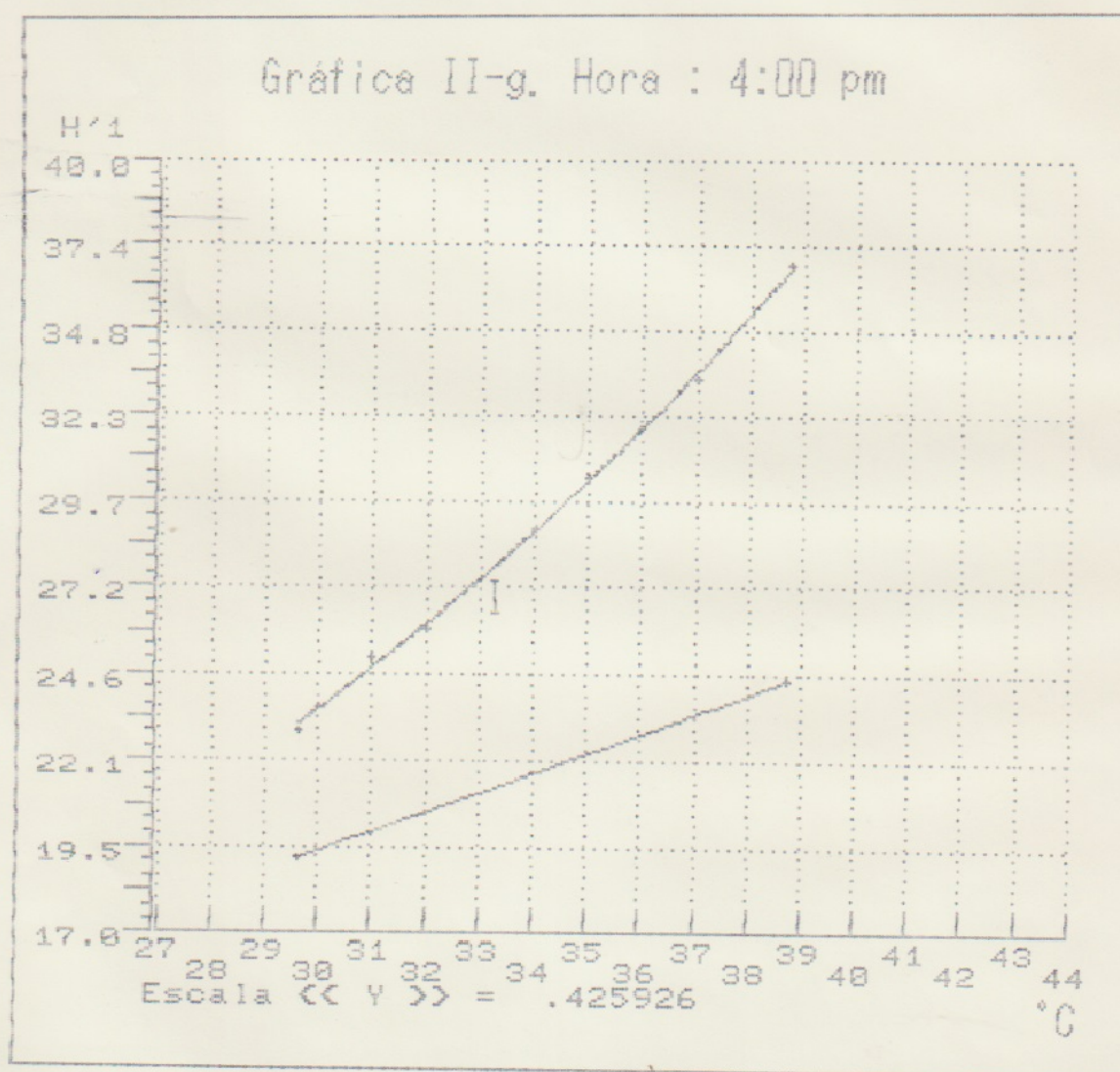




Gráfica II-f. Hora 3:00 pm



Gráfica II-g. Hora : 4:00 pm



ENTALPIA DE LA MEZCLA AIRE-AGUA (KCAL/KG)

CURVA DE SATURACION

POR PROYECTO

1000am
1000pm
200am
200pm
400pm
500am

TEMPERATURA DEL AGUA (°C)