

**Universidad de Matanzas**  
**Facultad de Ciencias Técnicas**  
**Departamento de Química**



*Tesis presentada en opción al título académico de Ingeniero Químico.*

*Propuesta de diseño de una torre de enfriamiento para garantizar mayor eficiencia en la obtención de alcohol etílico fino en la destilería de la Ronera Cárdenas.*

**Autor(a):** Rosmary Borges de la Portilla.

**Tutores:**

MSc. Dainerys Amaro Prieto

Ing. María de los Ángeles Rodríguez Fundora

**Consultante:**

Ing. José de Jesús Lauzurique Fernández

**Matanzas, 2022**

## **Declaración de autoridad**

Yo, Rosmary Borges de la Portilla declaro ser la autora de este trabajo de diploma y autorizo al departamento de Química de la Universidad de Matanzas y a la Ronera Cárdenas perteneciente a la Corporación CubaRon, utilizarlo de la manera que lo estime conveniente, además de todo aquel que necesite su consulta, siempre y cuando se respete el nombre del autor.

Para que así conste firma:

---

*Rosmary Borges de la Portilla*

*Autor*

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Institución

---

Nombre del presidente del tribunal

---

Firma

---

Evaluación

---

Fecha

## *Pensamiento*

*"El diseño no es sólo cómo se ve y se siente. El diseño es como funciona".*

*- Steve Jobs*

## **DEDICATORIA:**

*A mis padres: por ser la guía y motor impulsor en todas mis actividades.*

*A mis abuelos: por su apoyo incondicional durante la realización de este trabajo.*

*A mis hermanos: por estar a mi lado en cada momento de mi vida.*

*A mis sobrinos: por ser mi fuente de inspiración.*

# *AGRADECIMIENTOS:*

*A mis tutores: MSc. Dainerys Amaro Prieto y Ing. María de los Ángeles Rodríguez Fundora, por su valiosa dedicación y sabiduría puesta a mi disposición en la realización de esta investigación.*

*A mis profesores, por conducirme hacia el acertado camino del conocimiento.*

*A mis amigos, con los que compartí 4 inolvidables años, por su apoyo incondicional, por las risas y los buenos momentos.*

*A Jesús Lauzurque por contribuir con su sapiencia al desarrollo de este trabajo.*

*A todos los que de alguna manera contribuyeron de manera desinteresada.*

*Mis más sinceros agradecimientos.*

## **RESUMEN**

En esta tesis se exponen los presupuestos teóricos, metodológicos y prácticos que orientan la investigación, sobre la base de la sistematización realizada de las categorías del objeto y campo de acción, estudiadas en la obra de diferentes investigadores que han contribuido al tema. Se presentan las definiciones asumidas por la autora, el diseño de la torre de enfriamiento que se propone, los cuales están orientados a garantizar mayor eficiencia en la obtención de alcohol etílico fino en la destilería de la Ronera Cárdenas, a partir de la disminución del volumen de agua en el proceso. Se realiza una descripción y un diagnóstico técnico del proceso tecnológico. Se determinan los parámetros de operación y diseño de una torre de enfriamiento, los cuales permiten seleccionar el tipo de torre más efectiva a emplear. Se evalúa la propuesta desde el punto de vista técnico y económico, a partir de los resultados se determinaron los parámetros que se consideran necesarios incluir en la conformación del diseño que se propone.

## **ABSTRACT**

This thesis presents the theoretical, methodological and practical assumptions that guide the research, based on the systematization of the categories of the object and field of action, studied in the work of different researchers who have contributed to the subject. The definitions assumed by the author, the design of the proposed cooling tower, which are aimed at ensuring greater efficiency in obtaining fine ethyl alcohol in the Ronera Cardenas distillery, from the reduction of the volume of water in the process, are presented. A description and technical diagnosis of the technological process is made. The operation and design parameters of a cooling tower are determined, which allow selecting the most effective type of tower to be used. The proposal is evaluated from the technical and economic point of view, from the results the parameters that are considered necessary to include in the conformation of the proposed design were determined.



## Índice

INTRODUCCION .....	1
CAPÍTULO I. ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO.....	5
1.1 Generalidades acerca de las torres de enfriamiento.....	5
1.1.1 Definiciones de torres de enfriamiento.....	6
1.1.2 Características generales de las torres de enfriamiento.....	7
1.1. 3 Proceso de transferencia de calor en una torre de enfriamiento .....	8
1.2 Influencia de agentes o variables externos sobre el funcionamiento de las torres de enfriamiento .....	11
1.2.1 Principales factores que afectan la eficiencia de operación de una torre de enfriamiento.....	13
1.3 Clasificación de las torres de enfriamiento.....	15
1.4 Aproximación de temperatura .....	19
1.5 Componentes de una torre de enfriamiento.....	19
2. Motores .....	20
1.6 Deposito, estanque o piscina de agua .....	21
1.7 Principio de funcionamiento de las torres de enfriamiento.....	21
1.8 Experiencias de la utilización de las torres de enfriamiento en Latinoamérica y Cuba .....	22
1.9 Estimación del costo de adquisición de la torre de enfriamiento.....	23
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS .....	25
2.1 Descripción física – geográfica y social de la institución.....	25
2.2 Selección del tipo de torre y de relleno .....	25
2.3 Condiciones de inicio .....	25
2.3.1 Aproximación de temperatura y rango de enfriamiento .....	26

2.4 Metodología para el cálculo y diseño de la torre de tiro inducido a contraflujo .....	26
2.4.1 Flujo necesario de aire.....	27
2.4.2 Área de la sección transversal.....	29
2.4.3 Velocidades superficiales .....	30
2.4.4 Altura de la torre .....	30
2.4.5 Potencia térmica a disipar en la torre.....	34
2.4.6 Estimación de las necesidades de agua de reposición.....	34
2.5 Eficiencia de la torre.....	35
2.6 Cálculo de los parámetros fundamentales para la selección del ventilador .	36
2.7 Condiciones de instalación .....	37
2.8 Depósito, estanque o piscina de agua .....	37
2.9 Estimación del costo de adquisición de la torre de enfriamiento utilizando el software CAPCOST .....	38
<b>CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>40</b>
3.1 Caracterización de la Ronera Cárdenas .....	40
3.1.1 Resultados de la descripción del proceso tecnológico para la obtención del alcohol etílico fino.....	41
3.1.2 Caracterización de los principales equipos que intervienen en el proceso productivo .....	44
3.2 Resultados de la selección del tipo de torre y de relleno .....	46
3.3 Análisis de las condiciones de inicio .....	47
3.3.1 Análisis de la aproximación de temperatura y rango de enfriamiento .....	48
3.4 Resultados del cálculo y diseño de la torre de tiro inducido a contraflujo ....	48
3.4.1 Resultados del flujo necesario de aire .....	48
3.4.2 Resultados del área de la sección transversal.....	49

3.4.3 Resultados de las velocidades superficiales.....	50
3.4.4 Resultados de la altura de la torre .....	50
3.4.5 Resultados de la potencia térmica a disipar en la torre .....	53
3.4.6 Resultados de la estimación de las necesidades de agua de reposición .....	53
3.5 Resultados de la eficiencia de la torre .....	54
3.6 Resultados del cálculo de los parámetros fundamentales para la selección del ventilador .....	55
3.7 Resultados de las condiciones de instalación .....	55
3.8 Análisis del depósito, estanque o piscina de agua.....	56
3.9 Resultados de la estimación del costo de adquisición de la torre de enfriamiento utilizando el software CAPCOST.....	56
CONCLUSIONES.....	59
RECOMENDACIONES .....	60
BIBLIOGRAFÍA .....	61
ANEXOS .....	66

## INTRODUCCION

La instrumentación, diseño y simulación de dispositivos de enfriamiento de agua constituye, a lo largo del desarrollo de las operaciones unitarias, un marco de referencia en el estudio, comprensión y aplicación de la fenomenología de los mecanismos de transferencia de masa, energía y cantidad de movimientos. Los equipos de enfriamiento de sistemas simples como el de aire y vapor de agua constituyen una base fundamental en estudios preliminares de gran aplicación a nivel industrial.

En los grandes procesos químicos de la industria se generan enormes cantidades de calor que debe ser removido para que todas las unidades operen eficientemente. Los equipos de transferencia de calor más comúnmente utilizados son los intercambiadores de calor y condensadores. Muchas industrias requieren tener procesos eficientes en cuanto al costo, razón por la cual gran cantidad del agua que se usa en muchos intercambiadores de calor para refrigerar es recirculada y reutilizada. Para lograr esto, una de las formas más prácticas y económicas es mediante el uso de torres de enfriamiento empacadas, ya que ofrecen ventajas importantes por la transferencia simultánea de calor y masa debida a que el contacto entre los fluidos es directo, según refieren Pérez, *et al.*, (2018).

De ahí que la necesidad de las torres de enfriamiento se incrementa de manera importante en el mundo y Cuba no está exenta de ello, debido a las altas tasas de rechazo de calor. Estas tendencias van unidas a los aspectos ambientales, entre los que se incluyen la conservación del agua y las limitaciones en las descargas térmicas y químicas.

Las mismas constituyen sistemas mecánicos que se destinan a enfriar masas de agua en procesos que requieren una disipación de calor. El uso más habitual de estos equipos se asocia a los sistemas de refrigeración, tanto en aire.

Una de las principales aplicaciones prácticas de la Ingeniería Química es en las industrias en el que la obtención del producto final, en cuestión, se realiza mediante

procesos tecnológicos asociados al aislamiento y purificación de un compuesto determinado en una mezcla, donde es necesario un proceso de destilación en el que se ponen de manifiesto importantes fenómenos termodinámicos y coexisten en fuerte intercambio calórico y másico.

Estos equipos se usan para el enfriamiento de cualquier parte del proceso que genere calor y deba ser disipado.

Necesidad de que se realice una propuesta de diseño de una torre de enfriamiento para garantizar mayor eficiencia en la obtención de alcohol etílico fino en la destilería de la Ronera Cárdenas.

- No cuentan con torres de enfriamiento en el centro. Actualmente se emplea un enfriadero que se encuentra a unos 300 metros del lugar donde se ubica el proceso tecnológico, por lo que las tuberías pasan por fuera de la edificación con agua a muy altas temperaturas, lo que resulta engorroso y peligroso para los trabajadores, además de poco eficiente por los grandes volúmenes de agua que se requieren.

-En la destilería de la Ronera Cárdenas se requiere de cambios tecnológicos en el proceso de obtención del alcohol etílico fino, con el fin de disminuir la temperatura de los vapores alcohólicos que provienen del condensador final de las columnas de destilación, además de acercar el sistema de enfriamiento al proceso.

Por lo antes expuesto se declara como **problema científico**:

¿Cómo garantizar mayor eficiencia en el proceso de producción de alcohol etílico fino en la destilería de la Ronera Cárdenas?

De ahí la siguiente **hipótesis**:

Si se diseña una torre para el enfriamiento del agua que se emplea para disminuir la temperatura de los vapores alcohólicos que provienen del condensador final de las columnas de destilación, se garantiza mayor eficiencia en el proceso de obtención del alcohol etílico fino en la destilería de la Ronera Cárdenas.

Para dar solución al problema científico se propone el siguiente **objetivo general**:

Proponer el diseño de una torre de enfriamiento para garantizar mayor eficiencia en el proceso de producción del alcohol etílico fino en la destilería de la Ronera Cárdenas.

Y como **objetivos específicos**:

1. Realizar el diagnóstico técnico del proceso tecnológico de la destilería.
2. Seleccionar el tipo de torre de enfriamiento más efectiva para este proceso.
3. Calcular los parámetros de operación y diseño para una torre de enfriamiento.
4. Estimar la factibilidad técnico-económica de la torre de enfriamiento propuesta.

La metodología general de la investigación se sustenta en el enfoque dialéctico-materialista por su carácter generalizador como esencia de la teoría del conocimiento científico. La lógica de indagaciones teóricas y estadísticas, posibilitó realizar una propuesta de diseño de una torre de enfriamiento para garantizar mayor eficiencia en la obtención de alcohol etílico fino en la destilería de la Ronera Cárdenas.

En las **indagaciones teóricas** se emplearon:

El **método histórico lógico**, posibilitó ver la evolución del objeto de estudio en el tiempo de manera lógica, es decir diseño de una torre de enfriamiento.

El **método de análisis documental**: Proporcionó la información relacionada con el diseño de una torre de enfriamiento, a partir del estudio de la bibliografía que abordan el tema.

El **método de sistematización**: Permitió organizar los conocimientos adquiridos a partir de la literatura consultada para establecer relaciones entre ellas, además favoreció la determinación de la propuesta de diseño de una torre de enfriamiento para garantizar mayor eficiencia en el proceso de producción del alcohol etílico fino en la destilería de la Ronera Cárdenas.

El **método enfoque de sistema**: Favoreció un análisis integral para la conformación

de diseño de una torre de enfriamiento, mediante la determinación de los elementos básicos que lo componen.

El aporte de la tesis está en la propuesta de propuesta de diseño de una torre de enfriamiento para garantizar mayor eficiencia en la obtención de alcohol etílico fino en la destilería de la Ronera Cárdenas, que no le precede uno igual.

## **CAPÍTULO I. ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO**

En el presente capítulo se realiza un análisis bibliográfico de diferentes autores profundizando en las definiciones referentes a torres de enfriamiento, con el objetivo de determinar el método de cálculo a utilizar en el diseño.

### **1.1 Generalidades acerca de las torres de enfriamiento**

Las operaciones de la transferencia de masa interfacial y de energía, que resulta cuando un gas se pone en contacto con un líquido puro, en el cual es prácticamente insoluble se define como operaciones de humidificación (Treybal, 1994)

Esta operación se define como el efecto de bajar la temperatura de un líquido (por lo regular agua) que entra en contacto con el aire y este permite que exista un contacto directo por el cual el fenómeno de evaporación extrae el calor del agua y la enfría, humedeciendo el aire y formando una neblina (Geankoplis, 1998).

El contacto directo de un gas con un líquido puro puede tener algunos de los siguientes fines:

1. Enfriar un gas caliente: El contacto directo constituye un intercambiador de calor que no es sucio y es muy eficaz, siempre que no sea objetable una cierta vaporización de líquido dentro del gas.
2. Humidificar un gas: Esto puede usarse para controlar el contenido de humedad del aire por secado.
3. Dehumidificar un gas: El contacto de una mezcla vapor caliente – gas con líquido frío produce la condensación del vapor. Esto tiene aplicaciones en aire acondicionado, en la recuperación de vapores de solvente de los gases usados en secado y, para otros fines parecidos.
4. Enfriar un líquido: El enfriamiento se produce por transferencia del calor sensible y también por evaporación. La aplicación principal es el enfriamiento del agua por contacto con la atmósfera (enfriamiento de agua).



El enfriamiento de agua con aire es, sin lugar a dudas, la más importante de las operaciones, y a la que se hace referencia con este proyecto. El agua caliente al pasar a través de intercambiadores de calor, condensadores y dispositivos semejantes se enfría por contacto directo con el aire atmosférico, para utilizarse nuevamente. El calor latente del agua es tan grande, que la evaporación de pequeñas cantidades produce efectos muy grandes de enfriamiento. (Treybal, 1994). Los criterios anteriores fueron citados por Aguilar, H. (2017)

### **1.1.1 Definiciones de torres de enfriamiento**

Las torres de enfriamiento son equipos que se utilizan para retirar el calor de un fluido de temperatura más o menos elevada proveniente de un proceso, la cual a través del intercambio de calor con el aire lo devuelve a menor temperatura y lo incorpora de nuevo al proceso. La eficiencia de trabajo en las torres de enfriamiento está dada por el acercamiento a la bombilla húmeda, verificada en la práctica, siendo mayor mientras menor sea la diferencia entre la temperatura del fluido que sale de la torre y la temperatura de bulbo húmedo del aire en la entrada de la misma (Contreras, 2012).

Una torre de enfriamiento es una instalación cuya función es la dispersión de calor del agua, que involucra conjuntamente los fenómenos de transferencia de calor y de masa (evaporación controlada por el contacto directo del agua con el aire) (Díaz, Barreneche; 2005). Al respecto (Burger, 1993) coincide al plantear que las torres de refrigeración o enfriamiento son estructuras diseñadas para disminuir la temperatura del agua y otros medios, concordando la autora con este criterio. El uso principal de las grandes torres de refrigeración industriales es el de rebajar la temperatura del agua de refrigeración utilizada en plantas de energía, refinerías de petróleo, plantas petroquímicas, plantas de procesamiento de gas natural y otras instalaciones industriales.

Al respecto, existen otros criterios como el de Arnabat, (2018), la cual refiere que las torres de enfriamiento son equipos que basan su funcionamiento en el principio de enfriamiento evaporativo.

### 1.1.2 Características generales de las torres de enfriamiento

Según Obregón, *et al.*, (2017) una ventaja que tienen las torres de enfriamiento sobre los intercambiadores de calor comunes es la gran cantidad de agua que manejan debido a que pueden tratar toda el agua de una planta entera mientras que los intercambiadores comunes se utilizan para equipos simples. Además, se desarrolla rápidamente en su estructura, tipo, autocontrol y materiales.

El agua de enfriamiento a alta temperatura se rocía uniformemente desde la parte superior y fluye hacia la parte inferior de la torre de enfriamiento, forma una película de agua en la superficie del relleno según (Nailing; *et al.*, 2017) y el aire ingresa a la torre de enfriamiento desde el fondo, intercambiando calor y masa en el relleno interior con película de agua.

Según Obregón, *et al.*, (2017) el resultado de la transferencia de calor y masa es el valor de entalpía del aire que aumenta al absorber calor y masa, el agua de refrigeración se enfría por disipación de calor. El aire caliente y húmedo se descarga fuera de la torre de enfriamiento por efecto del ventilador de flujo axial. El agua de refrigeración fluye al dispositivo de enfriamiento, absorbe el calor para mantener el proceso en marcha, citado por Pérez, *et al.*, (2018).

Merkel (1925) estructuró la teoría básica de las torres de enfriamiento según Alean, *et al.*, (2009) el método implementado por él se usa actualmente para determinar la eficiencia de la torre.

Se tiene en cuenta también lo que plantea Jianlin; *et al.*, (2015) quienes exponen que los parámetros meteorológicos que influyen positivamente o negativamente en la tasa de flujo de agua, la velocidad del viento, el llenado y otros factores que afectan el rendimiento de enfriamiento.

La estructura típica de una torre de enfriamiento tiene unas paredes que pueden ser de concreto o madera. En su parte superior tiene un domo y dependiendo del modelo puede tener un ventilador en dicho domo o un ventilador en la parte frontal.

El ventilador se rodea de una estructura que se conoce como chimenea o cono de vénturi cuya función es la de aumentar la velocidad de salida del aire y para lograr ese objetivo tiene una reducción en su área transversal (garganta) justo donde se coloca el ventilador.

La torre tiene rompevientos cuya función es controlar la dirección del viento que entra. Para lograr el enfriamiento del agua, ésta se deja caer desde la parte más alta de la torre por medio de un sistema de distribución que permite un goteo. Para disminuir la pérdida de agua por el goteo cuenta con eliminadores de arrastre en la parte superior. En su interior se encuentra un relleno laminar apilado en capas, su función es la de frenar la caída del agua, aumentar el tiempo de transferencia de calor y hacer cada vez más pequeñas las gotas.

Este relleno consiste en rejillas horizontales y perpendiculares a la caída del agua, cuyo arreglo tiene como objetivo principal el tratar de dividir el agua en gotas pequeñas, con el fin de provocar el mayor contacto de superficie con el aire, además estas rejillas o relleno laminar retardan la caída libre hasta el fondo de la torre; dicho retardo permite que la diferencia de temperaturas se aproxime a cero, como resultado de una buena transferencia de calor (González, 2014).

### **1.1. 3 Proceso de transferencia de calor en una torre de enfriamiento**

Los procesos industriales generan un exceso de calor, usualmente en forma de agua caliente, que debe ser enfriada y reutilizada. Todo lo que se requiere para enfriar el agua, es exponer su superficie al aire: La disipación del calor depende en gran parte de la evaporación en el aire de una porción del agua. El proceso de enfriamiento puede ser tan lento y limitado como la disminución de la temperatura que se realiza en el agua de la superficie de un estanque, o tan rápido y eficiente como el que se puede obtener con una adecuada torre de enfriamiento.

Las torres de enfriamiento se diseñan para exponer la mayor área superficial del agua circulante al máximo flujo de aire durante el más largo período de tiempo posible. Usualmente es una estructura parecida a un cajón de madera que tiene estructura interna del mismo material. La función de su relleno interior es aumentar

la superficie de contacto entre el agua y el aire. Por su aparente simplicidad, las torres de enfriamiento son frecuentemente tratadas con indiferencia. Por lo general se asume que se suministra el agua que se requiere lo suficientemente fría, pero en realidad, las torres de enfriamiento son complejos artefactos que requieren de un cuidadoso diseño y un adecuado mantenimiento. La menor desviación con respecto a las especificaciones de diseño o un deterioro por falta de mantenimiento pueden ocasionar un efecto negativo en el rendimiento de la torre y por ende una baja en la economía del proceso (Mendoza, Gallardo, 2016).

El proceso de transferencia de calor en una torre de enfriamiento comprende:

- a) La transferencia de calor latente que resulta de la evaporación de una porción pequeña de agua.
- b) La transferencia de calor sensible que resulta de la diferencia de temperatura entre el agua y el aire. Aproximadamente el 80% de la transferencia de calor se debe al latente y el 20% al sensible (Perry, *et al.*, 1992).

Cuando el agua pasa a través de la torre, su temperatura puede descender debajo de la temperatura de bulbo seco del aire de entrada, pero no más abajo que el bulbo húmedo de este aire. Considérese la torre dividida en dos porciones. En la porción superior el agua caliente se pone en contacto con el aire de salida el cual es más frío que el agua. Aquí, la presión parcial del agua fuera del líquido es mayor que la del aire de salida, mientras la temperatura del agua es también mayor a la del aire de salida. Ambos potenciales sirven para bajar la temperatura del agua por evaporación y transferencia de calor sensible al aire, aumentando, por lo tanto, la entalpía del aire.

En esta forma, en función de la cantidad de aire y del monto de la evaporación, es posible que la temperatura del agua descienda debajo de la temperatura del bulbo seco del aire de entrada antes de alcanzar el fondo de la torre por el que entra el aire. El hecho de que ambos potenciales puedan operar adiabáticamente en la misma dirección mientras saturan el aire hace posible que las torres de enfriamiento sean tan efectivas para enfriar el agua. En la última porción de la torre, el agua

puede poseer una temperatura igual o menor que la temperatura de bulbo seco del aire con que se pone en contacto, y la transferencia de calor sensible y de masa están en direcciones opuestas (Kern, 1991).

La diferencia entre la temperatura del líquido saliente ( $t_L$ ), y la temperatura de bulbo húmedo del aire entrante ( $t_W$ ), es decir  $t_L - t_W$ , se denomina la "aproximación mediante la temperatura de bulbo húmedo", es una medida de la fuerza motriz disponible para la difusión en la parte terminal de la torre. En el diseño de torres de enfriamiento, por lo común se especifica que ésta debe estar entre 2.5 y 5.0 °C, con una  $t_W$  colocada en la "temperatura de bulbo húmedo al 5 %" (la temperatura de bulbo húmedo que solo el 5 % de las veces excede el promedio durante el verano) (Towles, 1996).

El proceso de transferencia de calor inicia cuando el agua se introduce por la parte superior de la torre y se distribuye uniformemente sobre el relleno con ayuda de vertederos o boquillas para distribuir el agua en la mayor superficie posible.

El relleno sirve para aumentar el tiempo en el que baja el agua, así como la superficie de intercambio de calor entre el agua y el aire que fluye a contracorriente o a flujo cruzado. Una vez que se establece el contacto entre dichos elementos tiene lugar una cesión de calor que se produce debido a dos principios: la transferencia de calor por convección y la transferencia de masa (proceso de enfriamiento evaporativo) desde el agua hacia el aire.

Al inicio del proceso el aire tiene una temperatura de bulbo húmedo 1 menor a la temperatura del agua caliente, y con la transferencia se provoca un aumento de temperatura y humedad. A su vez, el agua experimenta un descenso en su temperatura cuyo límite estará marcado por la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra al sistema.

Temperatura de bulbo húmedo ( $T_{bh}$ ) es la temperatura en equilibrio que alcanza una superficie en evaporación. Ocurre cuando la velocidad de calor que se transfiere a la superficie por convección es igual al calor perdido por evaporación. Se mide en

un termómetro que se coloca a la sombra, con el bulbo envuelto en un pabilo de algodón humedecido en agua bajo una corriente de aire (Perry and Green, 2006).

La evaporación ocurre en la superficie del agua que está en contacto con el aire no saturado. En primer lugar, “las moléculas de agua cercanas a la superficie experimentan colisiones que aumentan su energía por arriba de la necesaria para vencer la energía de unión de superficie. La energía que se requiere para mantener la evaporación debe venir de la energía interna del líquido, que entonces experimenta una reducción de temperatura. Sin embargo, si se mantienen condiciones de estado estable, la energía latente perdida por el líquido como resultado de la evaporación debe recuperarse mediante la transferencia de energía al líquido desde sus alrededores. Esta transferencia se debe a la convección de energía sensible del gas” (Incropera, 2001). A medida que el aire recibe vapor también recibe calor latente de vaporización. Este proceso continúa hasta que se establece un estado de equilibrio a la temperatura de bulbo húmedo del aire.

El calor asociado a la transferencia de calor por convección del agua hacia el aire está dado por la ley de enfriamiento de Newton.

El proceso de evaporación depende de diversos factores como son: la presión, ya que la velocidad con que ocurre la evaporación es mayor cuando la presión es más baja y viceversa; la masa de agua evaporada, que es proporcional a la superficie en la cual se efectúa la evaporación; el coeficiente de transferencia de calor, que depende entre otras variables, de la velocidad del aire.

La evaporación sucede a mayor velocidad si existen corrientes de aire porque el viento desplaza las capas de aire sobre la superficie de evaporación y arrastra consigo la humedad. La evaporación es más rápida entre menor porcentaje de humedad tenga el aire (Mendoza y Gallardo, 2016).

## **1.2 Influencia de agentes o variables externos sobre el funcionamiento de las torres de enfriamiento**

**Recirculación:** La recirculación en las torres de enfriamiento se define como una adulteración de la atmósfera de entrada a la torre por la atmósfera de salida de la

misma. El efecto de la recirculación se ve en un inesperado aumento de la temperatura de bulbo húmedo del aire que entra a la torre de enfriamiento (por encima de la temperatura de bulbo húmedo del aire ambiente), y un correspondiente incremento en la temperatura del agua que sale de la torre.

**Restricción del flujo de aire:** A una determinada carga de calor, un flujo determinado de agua y una temperatura de bulbo húmedo particular la temperatura del agua fría producida por una torre de enfriamiento es totalmente dependiente de la cantidad de aire de entrada. Una disminución en la cantidad de aire y la temperatura del agua se incrementará. Debido a la importancia del flujo de aire, los fabricantes se preocupan en diseñar correctamente los ventiladores y sus motores, puesto que estos son los que mueven el aire contra la presión estática encontrada dentro de la torre.

**Viento:** Dependiendo de su velocidad y dirección, tiende a incrementar el potencial de la torre de enfriamiento a la recirculación.

No solamente la curvatura creada por el aire de salida en la dirección del flujo del viento, también se crea una zona de baja presión en la cual puede formarse una porción de niebla, si la admisión de aire a la torre está en esa dirección, entonces puede contaminarse el aire de entrada con esa niebla.

El grado al cual puede afectar la dirección del viento aumenta dependiendo de la relación de la velocidad de descarga de la torre ( $V_j$ ) respecto a la velocidad del viento ( $V_a$ )

**Interferencia:** Sumideros de calor ubicados cerca de una torre de enfriamiento pueden interferir con el desempeño térmico de la misma.

Estas interferencias pueden ser causadas por otras instalaciones de la planta u otros equipos. Muchas veces consisten de contribución térmica del efluente de otra torre de enfriamiento cercana (González, 2014).

### **1.2.1 Principales factores que afectan la eficiencia de operación de una torre de enfriamiento**

Los componentes de las torres de enfriamiento son hechos de metal, madera o plástico. Todos ellos pueden ser afectados por las condiciones a las cuales están expuestos: Los componentes hechos de metal son susceptibles a la corrosión y tienen una vida operativa (estimada) de 12 a 15 años. Las torres de madera son más resistentes que las metálicas a la corrosión y al crecimiento microbiológico. Tienen un período de uso útil de hasta 20 años. Las torres plásticas son resistentes a ácidos, bases, sales, ataques microbiológicos, oxidación y pueden tener una vida operativa de más de 20 años (Minnesota Technical Assistance Program, 1995).

Para mantener una torre de enfriamiento en niveles óptimos se requiere una rutina efectiva de mantenimiento. La eficiencia operativa se afecta por los factores siguientes: Contaminación: Los contaminantes del aire son depositados en el agua durante la fase evaporativa. Al incrementarse la efectividad en la operación, la transferencia de los contaminantes del aire al agua también se incrementa, lo cual tiende a disminuir la eficiencia de la torre.

El crecimiento de algas, hongos y bacterias también puede afectar la eficiencia de la operación. Todos los ingredientes necesarios para el crecimiento biológico (temperatura, humedad, luz solar, oscuridad, nutrientes) están presentes en un sistema de recirculación abierto. Estos organismos pueden corroer metales, madera, recubrir interiores de intercambiadores de calor y en general mantener el sistema de enfriamiento sucio (The Center for Applied Science, 1996).

Sólidos Disueltos: Los sólidos disueltos del agua evaporada son concentrados en el agua que permanece en la torre. Las principales sales minerales y gases disueltos en el agua consisten de Calcio y Magnesio en forma de Carbonatos y Bicarbonatos, Cloruros, Sulfatos, Silicio, Oxígeno y Bióxido de Carbono. Controlar el nivel de sólidos disueltos es un requerimiento muy importante para la correcta operación de la torre. Cuando el nivel de sólidos disueltos se reduce, el potencial de formación de incrustaciones y corrosión también se disminuye. Al incrementarse el contenido



puede favorecerse la formación de incrustaciones de sales y sólidos en la superficie de intercambiadores de calor disminuyendo así la eficiencia de la torre de enfriamiento.

La principal causa de desgaste y erosión en bombas, intercambiadores de calor, tuberías y resto del equipo auxiliar lo constituyen partículas más pesadas que el agua. Dondequiera que el flujo de agua es forzado a cambiar de dirección, las partículas pesadas tienden a mantenerse en su proceso inicial e inciden en las paredes del equipo. La energía de su choque es proporcional a su velocidad al cuadrado y a su tamaño elevado a una potencia entre 4 y 5. El mayor daño es causado por partículas con largos periodos de sedimentación que les permiten mantenerse en suspensión. Estas partículas son de tamaños entre 20 y 200  $\mu\text{m}$ . El control del nivel de sólidos disueltos se da con la descarga continua de un porcentaje de agua a través de un proceso llamado "purga", y de un reabastecimiento con agua relativamente pura o "reemplazo".

Es necesario, también la adición de algunos químicos para controlar la incrustación, corrosión y crecimiento microbiológico. Otra técnica efectiva empleada para disminuir la carga de sólidos es instalar un filtro en un flujo lateral de recirculado de la torre. Aunque es difícil justificar el costo para cualquier tipo de filtración. Un filtro para torre con rango de filtración de 2 micrones oscila alrededor de 20 000 USD ya instalado (The Center for Applied Science, 1996).

De esta manera se hace evidente la necesidad de un tratamiento adecuado a fin de minimizar los factores de riesgo que afectan a los componentes de la torre de enfriamiento.

Lo anteriormente comentado hace evidente la necesidad de un buen tratamiento al agua de recirculación en un sistema de enfriamiento, que debe, entre otras cosas:

- Evitar la corrosión.
- Evitar incrustación de sales.

- Mantener el agua en condiciones no atractivas para el crecimiento biológico.

Con esto se puede lograr prolongar la vida útil del sistema y equipo de enfriamiento, evitar o disminuir paros imprevistos por mantenimiento y aumentar o mantener la eficiencia en el sistema de enfriamiento. Un factor importante que debe tomarse en consideración para asegurar un mantenimiento satisfactorio de las torres es el efecto de cualquier tratamiento de agua sobre los materiales usados en la construcción de la torre y su equipo auxiliar (Kenney, Ray; 1983), ya que frecuentemente el uso de químicos para limpiar o eliminar otros químicos genera nuevos contaminantes (Bac-Pritchard, Inc., 1984).

### **1.3 Clasificación de las torres de enfriamiento**

Las industrias utilizan agua de enfriamiento para varios procesos. Como resultado, existen distintos tipos de torres de enfriamiento. Existen torres de enfriamiento para la producción de agua de proceso que solo se puede utilizar una vez, antes de su descarga, así como torres de enfriamiento de agua que puede reutilizarse en el proceso.

Existen sistemas de enfriamiento abiertos y cerrados. Cuando un sistema es cerrado, el agua no entra en contacto con el aire de fuera. Como consecuencia, la contaminación del agua de las torres de enfriamiento por los contaminantes del aire y microorganismos es insignificante. Además, los microorganismos presentes en las torres de enfriamiento no son eliminados a la atmósfera.

Las torres de enfriamiento se pueden clasificar, según refieren Ramírez; Villareal (2008), en diferentes formas según las características que se consideren.

- **Tipo de operación**

Torres de tiro mecánico. Usan uno o varios ventiladores para suministrar un flujo de aire con volumen constante que atraviesa la torre. El rendimiento térmico tiende hacia la estabilidad, y es afectado por pocas variables psicrométricas (Psicrometría: Determinación de la humedad atmosférica).

Dentro de este tipo de torres se pueden encontrar dos variantes:

Tiro forzado: El flujo de aire frío se fuerza hacia el interior por medio de un ventilador posicionado en la entrada de la torre y se descarga por la parte superior. Las torres de tiro forzado son caracterizadas por altas velocidades de aire entrante y la baja velocidad de salida; son extremadamente susceptibles a la recirculación y se considera que tiene características de estabilidad más bajas que la de tiro inducido. Debido a esto se deben diseñar con una cierta altura, generalmente bastante grande, debido a que existe un volumen que se desperdicia debido a que se usa como entrada del aire.

Comúnmente las torres de tiro forzado son equipos con ventiladores de flujo centrífugo; a pesar que se requiere mayor electricidad tiene la ventaja de estar disponibles para ser operadas con grandes presiones estáticas. También se puede tener un arreglo de dos ventiladores ya sea en el interior o en el límite, esto provocará una separación entre la entrada y la descarga, efectuando una recirculación minimizada. La distribución del aire es relativamente pobre debido a que el aire debe dar una vuelta de 90° a gran velocidad.

Entre las desventajas de este tipo de torres podemos encontrar: La descarga de aire ocurre a baja velocidad a través de una gran abertura en la parte superior de la torre. Debido a estas condiciones, el perfil de velocidades del aire es pequeño y tiende a asentarse en la trayectoria de entrada del ventilador. Por lo tanto, la succión de aire fresco se contamina con el aire parcialmente saturado que ya ha pasado a través de la torre con anterioridad.

Tiro inducido: El aire se succiona a través de la torre mediante un ventilador situado en la parte superior de la torre. Ésta tiene una velocidad de descarga de aire 3 ó 4 veces más grande que la velocidad de entrada de aproximadamente de unos 8 km/h. Dentro de las ventajas que ofrecen estas torres podemos mencionar que no hay tendencia a que se creen zonas de baja presión por acción de ventiladores que puedan provocar recirculación. Esta configuración permite que el aire pueda entrar a lo largo de una o más paredes de la torre y gracias a esto, la altura requerida es más pequeña si la comparamos con torres de otro tipo. (Anexo 1)

En estas torres, el aire se descarga a través del ventilador a alta velocidad proyectando el flujo hacia arriba, donde se encuentran las corrientes naturales de aire que evitan que exista un asentamiento posteriormente.

Una de las desventajas que se puede mencionar es que se presenta una caída de presión en la toma del ventilador y esto aumenta los requerimientos de energía. Otra es que la alta velocidad de descarga provoca un mayor arrastre sobre las gotitas de agua y éstas son transportadas por la corriente de aire.

- **Tipo de flujo de aire**

Torres de circulación natural

Estanque de rocío: Es un pequeño estanque con un sistema de rocío rodeado por paredes que tienen tablillas protectoras de fango.

En este tipo de torre el flujo de aire es inducido por el sistema de rocío a través de las tablillas. Las gotas de agua suspendidas invaden las tablillas colocadas afuera y drenan de nuevo hasta la base de la torre.

Atmosféricas: Estas torres no utilizan aparatos mecánicos que generen un flujo de aire que atraviese la torre. Obtienen su flujo de aire de la inducción natural proporcionando un tipo de presión-rocío de agua, distribuida en el sistema. El aire entra a través de los rompevientos en una sola dirección. Su desempeño varía directamente con la estación del año y las condiciones atmosféricas. Aprovechan las corrientes atmosféricas del aire. A pesar de ser relativamente económicas son usadas en pocas ocasiones porque son extremadamente afectadas por las condiciones adversas del viento. Su uso no es recomendable en procesos que requieran precisión en la temperatura del agua de enfriamiento.

Las corrientes atmosféricas penetran a todo lo ancho de la torre, por lo que se hacen muy angostas en comparación con otros tipos de torres. Para igualar el desempeño deben ser largas. Las pérdidas por arrastre son bastante grandes debido a que se manifiesta un flujo cruzado del aire dentro de la torre.

Para grandes instalaciones se pueden colocar varias torres, una junto a otra en un largo renglón, direccionadas en ángulo recto con respecto de la dirección del viento dominante. Este arreglo es particularmente efectivo en regiones costeras donde la dirección del viento predomina hacia dentro o fuera de la costa.

Tiro natural: Dentro de las torres atmosféricas existe un tipo especial, las torres de tiro natural hiperbólicas. Son extremadamente dependientes y predecibles en su rendimiento térmico. El flujo de aire que atraviesa la torre es producido por la diferencia de densidades que existe entre el aire frío del ambiente y el calor del aire caliente acumulado en el interior que sale de la torre. El aire se calienta en la torre debido al contacto con el agua caliente y su densidad baja. El incremento de temperatura del aire provoca un movimiento hacia arriba a través de la torre induciendo una circulación por convección térmica dando origen a un flujo de aire frío en la parte inferior y una expulsión del aire caliente y menos denso por la parte superior. Esto es especialmente útil si la velocidad del viento es muy baja. (Anexo 2)

Normalmente estas torres tienden a ser muy largas y amplias ya que en ocasiones exceden los 152 m de altura. Las torres de tiro natural deben ser altas para promover que se dé el fenómeno de convección. Están hechas de concreto reforzado con una pared que va desde 5 hasta 15 centímetros de ancho. La forma geométrica es un hiperboloide de manera que dos capas de rodillos de acero reforzado rectas pueden ser arregladas para que se inclinen en direcciones opuestas de la vertical para formar una red.

Este tipo de torres se comporta bien en sitios en donde la temperatura ambiente rara vez excede los 27° C y existe un viento estable disponible durante todo el año.

Torre en contraflujo: el aire se mueve verticalmente hacia la parte superior atravesando el relleno, en contra de la caída del agua. Debido a la necesidad de un sistema de rocío que maneje grandes presiones de rocío y a las altas pérdidas en la presión del aire, algunas torres de contraflujo físicamente son grandes, y requieren de grandes bombas y ventiladores de más poder para generar el contraflujo.

Flujo Cruzado: Las torres de flujo cruzado tienen un relleno configurado de tal forma que el aire fluye horizontalmente cruzando la caída del agua. El agua que se va a enfriar es dirigida en primera instancia hacia unos recipientes localizados en la parte superior de las zonas donde está el relleno, después es distribuida hacia el relleno por medio de gravedad a través de orificios en el fondo de dichos recipientes. Con esto se evita la necesidad de un sistema de presión de rocío para la distribución del agua. El ventilador está centrado en la parte superior de la torre y dirige el aire a través de dos celdas que están posicionadas a la orilla de una cámara de succión que está dividida en dos por el ventilador. Para un fácil mantenimiento y limpieza se utilizan válvulas de control de flujo, además la torre de flujo cruzado tiene una distribución tal que se puede realizar un mantenimiento seccional mientras se encuentra en uso (Mendoza y Gallardo, 2016).

#### **1.4 Aproximación de temperatura**

En las torres de enfriamiento de agua con aire, la entalpía del gas, es función de la temperatura de bulbo húmedo del aire. Por esta razón, si la temperatura de salida del agua  $T_{L1}$  es igual a la  $T_{bh}$  del aire entrante, el sistema en ese punto estará saturado, lo cual da por resultado una fuerza impulsora nula y, en consecuencia, una altura infinita  $Z$  para llevar a cabo un cambio de temperatura dado en el agua. Es por ello que  $T_{bh}$  debe estar por debajo de  $t_{L1}$ , aunque no se necesita que lo esté  $t_{G1}$ . La diferencia  $T_{L1}-T_{bh}$  se denomina “aproximación de temperatura de bulbo húmedo”. En el proyecto de torres de enfriamiento, generalmente se establece que  $t_{L1}-t_{bh}$  se encuentre en el rango de 4 – 6 °C como mínimo. Es por ello que las torres de enfriamiento deben ser diseñadas teniendo en cuenta las máximas  $T_{bh}$  que alcanza el aire atmosférico durante el año (máxima humedad), tomando un valor de 3 °C en las localidades donde  $T_{bh}$  es elevada. El agua no puede enfriarse por debajo de la temperatura húmeda del aire.

#### **1.5 Componentes de una torre de enfriamiento**

Entre los componentes de una torre de enfriamiento se pueden encontrar el relleno que distribuido dentro de la torre suministra el área superficial para la transferencia

de masa y calor, así como el empaquetamiento o relleno que constituye una estructura que se encuentra en el interior de la torre y puede ser metálica, plástica o de madera. Su función es obligar a que el agua que cae en forma de gotas, permanezca por más tiempo dentro del cuerpo de la torre.

El relleno es el corazón de la torre de enfriamiento ya que éste realiza el intercambio de energía y masa. Debe cubrir las siguientes características:

$\frac{3}{4}$  altos coeficientes de transferencia de calor y masa  $\frac{3}{4}$  baja resistencia al flujo de aire  $\frac{3}{4}$  libertad de canalizar el aire o el agua

Idealmente el relleno tiene un bajo costo y puede ser fácilmente instalado. Los materiales deben ser fuertes, ligeros y resistentes a la deterioración

En torres de flujo cruzado se necesita romper la corriente de agua que desciende.

### **Equipo mecánico**

1. Ventiladores
2. Motores

Rociadores: Se encuentran en la parte superior de la torre y permiten que el agua caliente ingrese en forma de gotas para aumentar su superficie de contacto.

Eliminadores de acero y rocío: Es una estructura ubicada en la parte superior de la torre y tiene la finalidad de evitar que las gotas pequeñas sean arrastradas por la corriente de aire fuera del sistema.

Reservorio: Se encuentra en el fondo de la torre y es un tanque en el cual se recoge el agua enfriada para regresar nuevamente al sistema. Su misión principal es recolectar el agua fría en la parte inferior de la torre, después de haber pasado a través del empaquetamiento. En el depósito succionan las bombas de circulación.

Al recolectar materiales arrastrados por el agua, debe ser accesible, de fácil limpieza y contener una pantalla o filtro para evitar que los residuos sean succionados por la bomba de circulación.

### Tubería de agua adicional

Tubería de restitución de agua: Conforme se produce la evaporación, es necesario ir restituyéndola. Para este propósito existe una tubería que mantiene el nivel del depósito constante.

Escalera de acceso: se construye de acuerdo a las especificaciones de la OSHA\* y permite una fácil inspección y mantenimiento. Está fabricada, por lo general, del mismo material de la estructura de la torre (Fibra de vidrio reforzada con resina poliéster o en madera tratada químicamente). \*Occupational Safety and Health Administration

Estructura de la torre: Es la estructura que le da forma a la torre y puede ser metálica, de madera o de hormigón (González, 2014).

### **1.6 Deposito, estanque o piscina de agua**

Al ser un componente crítico, se utilizan materiales compatibles con el marco de la torre, como el acero inoxidable, plástico (pequeños tamaños) o metales revestidos para aumentar la vida de la unidad, aunque puede ser necesario añadir una rejilla de acero u hormigón para dar capacidad de soporte.

La profundidad debe ser suficiente para proveer la altura hidráulica requerida para garantizar un flujo correcto al sumidero y aceptar el flujo en condiciones de disparo. Los sumideros deben ser lo suficientemente profundos para satisfacer la altura de succión de la bomba y contener la pantalla, generalmente mallada, para remover materiales no deseados en la succión de la bomba.

### **1.7 Principio de funcionamiento de las torres de enfriamiento**

El agua se introduce por el domo de la torre por medio de vertederos o por boquillas para distribuir el agua en la mayor superficie posible. El enfriamiento ocurre cuando el agua, al caer a través de la torre, se pone en contacto directo con una corriente de aire que fluye a contracorriente o a flujo cruzado, con una temperatura menor a la temperatura del agua, en estas condiciones, el agua se enfría por transferencia de masa (evaporación), originando 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 del aire a la entrada de la torre. Parte del agua que se evapora, causa la emisión de más calor, por eso se puede observar vapor de agua encima de las torres de enfriamiento, citado por Mendoza, J. y Gallardo, A; (2016)

Para crear flujo hacia arriba, algunas torres de enfriamiento contienen aspas en la parte superior, las cuales son similares a las de un ventilador. Estas aspas generan un flujo de aire ascendente hacia la parte interior de la torre de enfriamiento. Además, en el interior de las torres se monta un empaque con el propósito de aumentar la superficie de contacto entre el agua caliente y el aire que la enfría.

El enfriamiento de agua en una torre tiene su fundamento en el fenómeno de evaporación. La evaporación es el paso de un líquido al estado de vapor y solo se realiza en la superficie libre de un líquido, un ejemplo es la evaporación del agua de los mares (González, 2014).

### **1.8 Experiencias de la utilización de las torres de enfriamiento en Latinoamérica y Cuba**

En la empresa Postelectras Dishierros S.A. en Colombia, se encontró que la torre de enfriamiento requería algunas mejoras; principalmente en la instalación de la tubería que transporta el agua desde la torre hasta la planta de producción, pues su trayectoria es muy extensa y poseía demasiados accesorios, lo cual se traduce en ineficiencia y pérdidas económicas. Además, se encontró que el control de bombas usado, (pulsadores start-stop de accionamiento manual) era igualmente ineficiente, con una gran dependencia del operario las 24 horas del día, y generando pérdidas de agua.

Danisco Mexicana, planta Tecomán, cuenta con dos torres de enfriamiento. Una por cada línea de producción. El agua enfriada por ellas fija la presión de operación de los condensadores en los procesos de destilación, evaporación y de los equipos que los preceden. En los compresores una gran cantidad (cerca del 80%) de la

energía es convertida en calor. Así que éste debe ser continuamente removido a la misma velocidad que es generado vía intercambio de calor o el compresor puede sobrecalentarse y pararse. Reduciendo la temperatura de operación de un compresor reducirá proporcionalmente los requerimientos de energía. En otras palabras, entre más fría sea el agua (de enfriamiento) alimentada a un equipo, menor la energía requerida para producir el mismo trabajo, a menor costo. En sistemas de refrigeración las gráficas de entalpía indican que, dentro del rango de operación de la torre, por cada °F de menos en el agua enfriada por la torre, un compresor ahorra 2.25 % de energía para producir los mismos resultados (Burger, R.; 1993).

En Pinar del Río, la Empresa de Productos Lácteos y Confitería es de tipo estatal. El proceso de producción de helado es altamente consumidor de energía por las etapas de enfriamiento. Si junto a esto, se considera que dichas instalaciones tienen varios años de explotación y por lo general baja eficiencia energética y un incremento en los indicadores de consumo, es evidente la necesidad de buscar mejores condiciones de operación que reduzcan los costos (Sariago, *et al.*, 2017), citado por Pérez, *et al.*, (2018).

La torre de enfriamiento instalada en la fábrica específicamente en la UEB Primavera, encargada de la producción de helados, tiene la tarea de enfriar los condensadores del banco de agua de helado y los congeladores, pero no cumple con las necesidades para las que está instalada; el buen funcionamiento de esos equipos se deriva del mantenimiento de una temperatura de trabajo adecuada, debido a esto, se tiene como objetivo calcular los parámetros necesarios para que cumpla con los requerimientos de dichos equipos, es decir que la temperatura de entrada a ellos sea constante y por debajo de los 40 °C (Pérez, *et al.*, 2018).

### **1.9 Estimación del costo de adquisición de la torre de enfriamiento**

Existen varios métodos para la evaluación de los costos de inversión, entre ellos se encuentran el método del módulo simple o desnudo, que es el que emplea el software CAPCOST.

Los índices de costos son una herramienta de ingeniería esencial por ser útiles para desarrollar estimaciones de alcance rápidas. *La revista Chemical Engineering* publica el índice de costos de plantas de ingeniería química, que se usa ampliamente para evaluar rápidamente los costos de equipos y plantas para las industrias químicas y de procesos

### **Conclusiones parciales**

- Una torre de enfriamiento es un intercambiador de calor que enfría agua por medio de la evaporación, donde la temperatura mínima que se puede alcanzar es siempre superior a la temperatura de bulbo húmedo del aire circundante.
- Las torres de enfriamiento son parte fundamental en las industrias y se adecuan de acuerdo a las necesidades de la misma para agilizar la producción.
- La transferencia de calor en las torres de enfriamiento está dada por la interacción del agua con el aire.
- Estos equipos se consideran sistemas altamente eficientes y de control sencillo por lo que permiten un ahorro económico considerable.

## **CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS**

En el presente capítulo se realiza una breve caracterización de la Ronera Cárdenas perteneciente a la Corporación CubaRon SA. Se describe el proceso tecnológico que se lleva a cabo para la obtención del alcohol etílico fino (A.E.F) y los principales equipos que intervienen. Se analizan diferentes aspectos para la selección del tipo de torre de enfriamiento y el tipo de relleno a emplear. Se plantea la metodología para el cálculo de la torre escogida. Se calculan los parámetros de operación y diseño de la misma. Además, se evalúa la propuesta desde el punto de vista económico.

### **2.1 Descripción física – geográfica y social de la institución**

En la descripción física – geográfica y social de la institución objeto de estudio se tienen en cuenta: la ubicación, la infraestructura y las actividades que en esta se realizan, así como el personal que interviene en dichas actividades. Esta información se obtiene mediante un levantamiento en el terreno y según información de trabajos de León, *et al.*, (2015) y Afonso, *et al.*, (2021).

### **2.2 Selección del tipo de torre y de relleno**

Para la selección del tipo de torre y de relleno a emplear se realiza un exhaustivo análisis de las características, ventajas y desventajas de cada uno de ellos, según la bibliografía consultada. Se consideran las experiencias recientes de diseños de torres de enfriamiento en Cuba y en Latinoamérica.

### **2.3 Condiciones de inicio**

Para conocer las condiciones del aire reinante en el lugar, se deben tomar de las Estadísticas del Servicio Meteorológico Nacional, que pueden consultarse en cualquier Aeropuerto o en Centros de Estadísticas.

Las tablas indican 5 valores de temperaturas: máximas absolutas, máximas medias (promedio de las temperaturas máximas del mes durante los 10 años), temperatura del aire (promedio mensual), mínimas medias y mínimas absolutas. Además, se

indica el valor de la humedad relativa del aire, con la cual se puede conocer el estado del aire en el lugar.

Ahora bien, como las condiciones del aire varían a lo largo del año, se debe saber cuál valor tomar. En este caso se toma como referencia el mes más húmedo, pues mientras mayor sea la humedad del aire a la entrada de la torre, menor será su capacidad de absorción de calor del agua que se pretende enfriar. Según los datos del clima obtenidos se hará referencia al mes de septiembre con una humedad relativa promedio de 80%.

Según trabajos previos realizados en la empresa que solicitó este proyecto, la temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ ) es de 31 °C. Para realizar estas mediciones se coloca un termómetro de mercurio sin modificar en una zona con sombra para evitar el sobrecalentamiento producido por el sol.

En el diagrama psicrométrico, entramos con la temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ ) y la humedad relativa ( $H_R$ ), y se obtiene temperatura de bulbo húmedo ( $T_{bh}$ ) del aire a la entrada.

### **2.3.1 Aproximación de temperatura y rango de enfriamiento**

Para torres de enfriamiento es necesario estimar la “aproximación de temperatura”, que es la diferencia entre la temperatura de salida del agua y la temperatura de bulbo húmedo del aire.

El rango es la diferencia entre las temperaturas de la entrada y salida del agua de la torre.

### **2.4 Metodología para el cálculo y diseño de la torre de tiro inducido a contraflujo**

Para determinar las características que tendrá la torre de enfriamiento de tiro inducido a contraflujo se deben analizar los siguientes aspectos:

- ❖ Flujo necesario de aire.
- ❖ Área de la sección transversal.

- ❖ Velocidades superficiales del aire y del líquido.
- ❖ Altura de la torre.
- ❖ Potencia térmica a disipar.
- ❖ Cantidad de agua de reposición.
- ❖ Eficiencia de la torre.
- ❖ Cálculo de los parámetros fundamentales para la selección del ventilador.

Para la realización del proyecto de diseño de la torre de enfriamiento requerida por la corporación CubaRon, del municipio de Cárdenas, se calculan diferentes parámetros.

#### **2.4.1 Flujo necesario de aire**

Se determina el flujo necesario de aire y la altura de la torre mediante un gráfico de apoyo. Consiste en una carta psicrométrica para el sistema aire-agua, se llevan los valores que corresponden a la entalpía del aire saturado a un rango un poco mayor de las temperaturas que se están trabajando (90°F a 130°F).

Temperatura (°F)	Entalpía (Btu/lb)
90	47
100	63
110	83
120	111
130	145

Con estos valores se construye una gráfica en la que el eje de las abcisas corresponde a los valores de temperaturas y en las ordenadas entalpías del aire y de este modo se construye la curva de saturación o curva de equilibrio. Esta indicaría el estado del aire en la interfase.

Una vez construida la curva de saturación, hay que proceder a construir la "línea de operación máxima", para ello, es necesario ubicar los parámetros indicativos de las condiciones en el fondo y en el tope de la torre.

- Fondo de la torre: la temperatura de salida del agua es 100,4 °F, la entalpía correspondiente al ingreso de aire en el fondo de la torre, se encuentra considerando que el mismo ingresa saturado a la temperatura  $T_{bh1} = 95$  °F, es decir con una entalpía de 55 Btu/lb. Con este valor se ubica el punto C del gráfico. (Anexo 3)
- Parte superior de la Torre. Se supone que el aire sale completamente saturado a la temperatura de 122 °F del agua ingresante. O sea que con 122 °F, se levanta una vertical hasta cortar a la curva de saturación en el punto B'. Esto da una recta de operación CB' correspondiente a una saturación total del aire y que hace necesaria una altura de torre infinita y flujo de aire mínimo. (Anexo 3)

Para calcular el flujo de aire para este caso ideal se calcula la pendiente de la recta CB':

$$\left(\frac{L}{G}\right)_{min} = \frac{H_T - H_1}{C_L(T_T - T_{L1})} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

$(L/G)_{min}$ : Pendiente de la línea de operación máxima (recta CB').

$H_1$ : entalpía del aire en el fondo de la torre (Btu/lb).

$H_T$ : entalpía en el punto tangente (Btu/lb).

$T_T$ : temperatura en el punto tangente (°F).

$T_{L1}$ : Temperatura del líquido en el fondo de la torre (°F).

$C_L$ : Capacidad calórica para el agua (Btu/lb.°F).

El valor obtenido en el miembro derecho de la ecuación se denomina S.

El caudal mínimo de aire será:

$$G_{\min} = \frac{L}{S} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde:

$G_{\min}$ : Caudal mínimo de aire (kg/s).

L: Flujo del líquido a la entrada (kg/s).

S: Pendiente de la línea de operación máxima.

Se aumenta el caudal de aire al doble y se calcula la nueva S.

$$S = \frac{L}{(2 \cdot G_{\min})} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Luego,

$$G = S \cdot L \quad \text{Ec. 2.4}$$

#### 2.4.2 Área de la sección transversal

Conociendo el flujo másico del gas y su velocidad y densidad se puede calcular la sección transversal de la torre.

$$A_{\text{trans}} = \frac{G}{v \cdot \rho} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde:

$A_{\text{trans}}$ : Área de la sección transversal de la torre (m<sup>2</sup>).

G: Flujo másico de aire (kg/s).

v: velocidad del aire (m/s).

$\rho$ : densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>).



### 2.4.3 Velocidades superficiales

Teniendo el área de la sección transversal ( $A_{trans}$ ) se obtienen las velocidades superficiales del aire y del líquido ( $G'$  y  $L'$  respectivamente), dividiendo el flujo de cada uno de ellos a la entrada ( $G$  y  $L$ ) por esta área, de manera que se obtienen las siguientes relaciones:

- Velocidad superficial del aire:

$$G' = \frac{G}{A_{trans}} \quad \text{Ec. 2.6}$$

- Velocidad superficial del líquido:

$$L' = \frac{L}{A_{trans}} \quad \text{Ec. 2.7}$$

### 2.4.4 Altura de la torre

Para determinar la altura de la torre de enfriamiento, se completa el gráfico.

Para encontrar la otra coordenada de la línea de operación, se calcula en función de la ecuación de la misma:

$$H_2 = H_1 + \left(\frac{L}{G} (T_{L2} - T_{L1})\right) \quad \text{Ec.2.8}$$

Donde:

$H_2$ : entalpía del aire en el tope de la torre (Btu/lb).

$H_1$ : entalpía del aire en el fondo de la torre (Btu/lb).

$T_{L1}$ : Temperatura del líquido en el fondo de la torre (°F).

$T_{L2}$ : Temperatura del líquido en el tope de la torre (°F).

$L/G$ : Pendiente de la línea de operación.

Se marca el punto B, dado por  $H_2$  y  $T_{L2}$ . Se unen luego los dos puntos de la recta de operación. Esta representa las condiciones en el seno del aire. La curva representa las condiciones en la interfase agua – aire. La diferencia entre ambas da el potencial de enfriamiento en cada punto. (Anexo 3)

La ecuación característica para la altura de una torre de enfriamiento establecida por Merkel, el cual se basa en una serie de asunciones para reducir la solución a un cálculo simple, referenciado en Alean, *et al.*, (2009). Esta relaciona la fuerza impulsora o gradiente que favorece la transferencia de calor del vapor de agua en el aire con el coeficiente de transferencia característico del tipo de relleno:

$$Z = \frac{G'}{K_y a} \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H^* - H} \quad \text{Ec. 2.9}$$

Donde:

z: Altura de la zona empaquetada (m).

G': Velocidad superficial del gas (kg/s.m<sup>2</sup>).

K<sub>y</sub>a: Coeficiente de transferencia (kg/s.m<sup>2</sup>).

dH: Variación de la entalpía.

H<sub>1</sub>: Entalpía a la entrada.

H<sub>2</sub>: Entalpía a la salida.

H\*: Entalpía de vapor saturado.

H: Entalpía de aire saturado.

Para obtener la altura total se usa en lugar de la velocidad superficial del aire (G'), el flujo total del mismo (G).

La altura de la torre (Z) también se puede expresar como el producto del número de unidades de transferencia por la altura de la unidad de transferencia, así:

$$Z = N_{OH} \cdot H_{OH} \quad \text{Ec. 2.10}$$

Dónde:

Z: Altura de la torre (m).

$N_{OH}$ : Número de unidades de transferencia referidos a las entalpías.

$H_{OH}$ : Altura de la unidad de transferencia referidos a las entalpías (m).

#### **2.4.4.1 Número de unidades de transferencia**

El número de unidades de transferencia referido a las entalpías se puede calcular mediante el método de integración numérica o gráfica, en este caso se resuelve mediante el método de los trapecios. La ecuación que da el número de unidades de transferencia del líquido es:

$$N_{OH} = \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{H^* - H} \quad \text{Ec. 2.11}$$

Donde:

$N_{OH}$ : Número de unidades de transferencia referido a las entalpías.

dH: Variación de la entalpía.

$H_1$ : Entalpía a la entrada.

$H_2$ : Entalpía a la salida.

$H^*$ : Entalpía de vapor saturado.

H: Entalpía de aire saturado.

Se fija el paso para incrementar el valor de la entalpía del gas desde el valor de entalpía a la entrada del gas hasta el valor de la entalpía del gas a la salida, es decir, desde  $H_1$  hasta  $H_2$ .

Teniendo graficada la curva de equilibrio y la línea de operación, con cada valor de entalpía que se genera desde  $H_1$  hasta  $H_2$  se entra al gráfico hasta la línea de operación, de ahí hasta la línea de equilibrio y se lee el valor de entalpía de equilibrio ( $H^*$ ). Luego, para cada uno de los valores se calcula la función  $1/(H^*-H)$ .

De la ecuación general 2.11, para determinar el número de unidades de transferencia por el método de los trapecios obtenemos la siguiente relación:

$$N_{OH} = h \left[ \left( \frac{y_0 + y_n}{2} \right) + \sum_{i=1}^{n-1} y_i \right] \quad \text{Ec. 2.12}$$

Donde:

$h$ : Paso.

$y_0$ : Valor inicial.

$y_n$ : Valor final.

$y_i$ : Valores intermedios.

#### 2.4.4.2 Altura de la unidad de transferencia

El  $H_{OH}$ , si es más pequeño, también lo será la torre, se lo toma como criterio de eficiencia de una torre. Es la altura de la unidad de transferencia y es equivalente al número de platos (m).

- Para determinar la altura de la zona empaquetada, el  $H_{OH}$  se expresa:

$$H_{OH} = \frac{G'}{K_y a} \quad \text{Ec. 2.13}$$

- Para determinar la altura total de la torre, el  $H_{OH}$  se expresa:

$$H_{OH} = \frac{G}{K_y a} \quad \text{Ec. 2.14}$$

Dónde:

$H_{OH}$ : Altura de la unidad de transferencia referido a las entalpías ( $m^2$ ).

$G'$ : Velocidad superficial del aire (kg/s.m<sup>2</sup>).

$G$ : Flujo total de aire (kg/s).

$K_y a$ : Coeficiente de transferencia de masa (kg/s.m<sup>2</sup>).

El coeficiente de transferencia de masa se calcula según el tipo de relleno por la siguiente expresión:

$$K_y a = 1,98 \cdot (L')^{0,45} \cdot (G')^{0,6} \quad \text{Ec. 2.15}$$

Donde:

$L'$ : Velocidad superficial del líquido (kg/s.m<sup>2</sup>).

$G'$ : Velocidad superficial del aire (kg/s.m<sup>2</sup>).

#### **2.4.5 Potencia térmica a disipar en la torre**

Teniendo el flujo volumétrico de agua a la entrada, se afecta por su densidad y se obtiene el flujo másico, luego se calcula la potencia térmica  $Q$  mediante la ecuación del calor.

$$Q = L \cdot C_{pa} \cdot \Delta t_L \quad \text{Ec. 2.16}$$

Donde:

$Q$ : Potencia térmica a disipar (kJ/s).

$C_{pa}$ : Calor específico del agua (kJ/kg.K).

$t_L$ : Diferencia entre las temperaturas de entrada y salida del agua a la torre (K).

#### **2.4.6 Estimación de las necesidades de agua de reposición**

El agua de reposición es la sumatoria de las pérdidas por evaporación y por arrastre.

$$L_R = P_{evap} + P_{arr} \quad \text{Ec. 2.17}$$

Donde:

$L_R$ : Agua de reposición necesaria (kg/s).

$P_{evap}$ : Flujo de agua perdida por evaporación (kg/s).

$P_{arr}$ : Flujo de agua perdida por arrastre (kg/s).

#### **2.4.6.1 Pérdidas de agua por evaporación**

Para la temperatura en °F se emplea la siguiente relación:

$$P_{evap} = 0,00085 \cdot L \cdot (T_{L2} - T_{L1}) \quad \text{Ec. 2.18}$$

Donde:

$L$ : Flujo de agua a la entrada (kg/s).

$T_{L1}$ : Temperatura del agua a la salida.

$T_{L2}$ : Temperatura del agua a la entrada.

#### **2.4.6.2 Pérdidas de agua por arrastre**

Las pérdidas por arrastre serán entre el 0,1 y 0,2 % del flujo de agua de entrada, en este caso se decide trabajar con el valor promedio entre ambos.

Para esto primeramente se halla el 0,1 y el 0,2 % respectivamente del flujo de agua que entra, luego se calcula el promedio entre ambos resultados, este valor determinará las pérdidas por arrastre.

### **2.5 Eficiencia de la torre**

La eficiencia de las torres de enfriamiento depende de las temperaturas de entrada y salida del agua y de la temperatura de bulbo húmedo de la siguiente manera:

$$E = \frac{(T_{L2} - T_{L1})}{(T_{L2} - T_{bh})} \quad \text{Ec. 2.19}$$

Donde:

E: Eficiencia de las torres de enfriamiento (%).

T<sub>L1</sub>: Temperatura del agua a la salida de la torre (°C).

T<sub>L2</sub>: Temperatura del agua a la entrada de la torre (°C).

T<sub>bh</sub>: temperatura de bulbo húmedo (°C).

## 2.6 Cálculo de los parámetros fundamentales para la selección del ventilador

Para el cálculo de estos parámetros se debe conocer los siguientes valores:

El rendimiento térmico de una torre de enfriamiento de tiro inducido depende en gran medida del ventilador que a esta se le instale y para la selección correcta del mismo se necesita calcular primeramente el volumen de aire que debe manejar, calculándose por la siguiente expresión:

$$G_s = G \cdot V_{es} \quad \text{Ec. 2.20}$$

Donde:

G<sub>s</sub>: Flujo volumétrico de aire manejado por el ventilador (m<sup>3</sup>/s).

G: Flujo másico de aire (kg/s).

V<sub>es</sub>: Volumen específico del aire (m<sup>3</sup>/kg).

Con la velocidad del aire, se calcula la presión estática (P<sub>s</sub> en m de agua) de la siguiente ecuación:

$$P_s = \frac{2v^2}{g} \quad \text{Ec. 2.21}$$

Donde:

g: Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>).

v: velocidad del aire (m/s).

Teniendo el valor de presión estática entonces se puede calcular la potencia (Hp) requerida por el ventilador mediante la ecuación siguiente:

$$P = 13,142 \cdot P_s \cdot G \quad \text{Ec. 2.22}$$

## 2.7 Condiciones de instalación

La tubería se debe calibrar adecuadamente según la práctica comercial. Toda tubería se debe diseñar para permitir la expansión y la contracción provocada por la temperatura. Instalar para equilibrar el flujo a cada celda apropiadamente. Todos los intercambiadores de calor, y tanta tubería de torre cómo es posible, se deben instalar debajo del nivel del agua de operación en la torre de enfriamiento para prevenir derramar la torre de enfriamiento en el cierre y para asegurar la operación satisfactoria de la bomba.

## 2.8 Depósito, estanque o piscina de agua

En la parte inferior de la torre de enfriamiento hay un estanque que recolecta el agua fría luego de pasar por la zona empaquetada. Esta agua se dirige por un sistema de canales a un depósito donde se mezcla con el agua de reposición, así se garantizan los 320 m<sup>3</sup>/h de agua que impulsa la bomba necesarios para el proceso. Esto provee mayor economía y asegura un buen funcionamiento.



## 2.9 Estimación del costo de adquisición de la torre de enfriamiento utilizando el software CAPCOST

En la estimación del costo de adquisición de la torre de enfriamiento que se propone diseñar, se utiliza el software CAPCOST, que es una herramienta muy útil para la estimación de los costos de inversiones de plantas que involucran distintos tipos de equipos. La información que se debe suministrar sobre el equipo depende de la naturaleza del mismo y de sus dimensiones fundamentales (Turton, 2018), citado por Amaro (2021).

Este software tiene la limitación de que no admite valores de CEPCI mayores de 450 por lo que no se pueden utilizar los valores de CEPCI para los años actuales. Se utilizará entonces el CEPCI del año 2004, que es el año con el valor más próximo inferior.

Para realizar la estimación se introducen los datos referidos al diámetro, altura de la torre y del empaque, presión y materiales de construcción de la torre y el empaque.

Una vez que se tiene el resultado arrojado por el software, se actualiza el índice de costo por la siguiente ecuación:

$$C_2 = C_1 \cdot \frac{I_2}{I_1} \quad \text{Ec. 2.22}$$

Donde:

C<sub>1</sub>: Costo de adquisición en el año base (USD).

C<sub>2</sub>: Costo de adquisición en el año deseado (USD).

I<sub>1</sub>: Índice de costo en el año base.

I<sub>2</sub>: Índice de costo en el año deseado.

Se utiliza como índice de costo el *Chemical Engineering Plant Cost Index* (CEPCI) para corregir el valor del costo del equipo que se estima por el software CAPCOST, ya que es el más apropiado para la industria química y además se

actualiza de forma periódica. Para esta investigación se emplea como año base el 2004, con un índice de costo de 444,2 y este valor actualizado para el año 2022 es de 824,5.

### **Conclusiones Parciales**

En la actualidad existe mucha información dispersa acerca de estos cálculos y diseños, pero no proporcionan una idea concreta de cómo realizar los mismos, ya que algunos son muy complejos e incompletos.

Debido a esta falta de información se realizó una investigación bastante amplia sobre la transferencia de calor, transferencia de masa y los principales modelos de cálculo del dimensionamiento geométrico del paquete de las torres de enfriamiento.

Este trabajo trata de brindar las herramientas necesarias para que la empresa sea capaz de satisfacer sus requerimientos del cálculo y diseño, sin tener que recurrir a los datos de empresas dedicadas al diseño y construcción de torres de enfriamiento, ya que son muy difíciles de acceder y los servicios que ofrecen son de costos muy elevados.

## **CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

Para el procedimiento de diseño o evaluación de torres de enfriamiento se sigue un grupo de pasos y se tiene en cuenta un grupo de criterios, a los que se harán referencia en este capítulo. Se evalúan las metodologías explicadas en el capítulo anterior. Se reportan y analizan los resultados que se obtienen.

### **3.1 Caracterización de la Ronera Cárdenas**

La Ronera Cárdenas perteneciente a la Corporación CubaRon SA es una Empresa que surge de la segregación de instalaciones de la Empresa José A. Echeverría, perteneciente al MINAZ, por la necesidad de buscar otras fuentes de entrada de divisas al país y financiamiento, por el comportamiento del mercado exterior y la posición en que se encontraban los productos con el derrumbe del campo socialista.

La destilería es una Unidad Empresarial de Base de la Ronera Cárdenas y su principal misión es producir alcohol etílico fino, el cual se utiliza como materia prima para la fabricación de rones de exportación y de consumo nacional, los principales clientes son las roneras miembros de la Corporación, así como la Empresa de bebidas y refrescos nacional.

La Empresa se ubica en Calle Pinillos esq. Sáez en el municipio de Cárdenas en la provincia de Matanzas. Fue fundada el 8 de noviembre de 1993 según escritura otorgada en la Notaría Especial del Ministerio de Justicia, comenzando a funcionar como tal en enero del 1994. (Anexo 4)

En la actualidad además del alcohol fino A se realizan pruebas y ensayos para la producción específica de alcohol superfino con objetivos estratégicos de sustitución de importaciones y ampliación de los mercados de venta mundial a niveles competitivos en correspondencia con la demanda actual de este producto.

### **3.1.1 Resultados de la descripción del proceso tecnológico para la obtención del alcohol etílico fino**

La empresa cuenta con una planta de tratamiento de agua donde a través de un fenómeno químico por intercambio iónico entre el agua cruda y la resina intercambiadora de iones sodio, que absorbe iones calcio y magnesio, se obtiene agua tratada, para esto posee cuatro intercambiadores aniónicos y un sistema de regeneración con NaCl. La salmuera se prepara a una concentración entre 13 y 20 °Be y después de la regeneración, donde se produce el intercambio entre la resina que cede el calcio y magnesio absorbido y se carga o regenera nuevamente con el ion sodio que aporta la solución regenerante, se efectúa un contralavado por espacio de una hora. Al agua tratada se le realiza análisis de dureza, pH, alcalinidad total y alcalinidad parcial. Esta planta suministra agua al sistema de enfriamiento y a su vez a las calderas para la generación de vapor, la cual trabaja con el petróleo proveniente del sistema de combustible.

El área energética está compuesta por dos generadores o calderas de vapor piro tubulares también conocidas como calderas de tubos de fuego de 17 y 12 ton/h respectivamente que trabajan a una presión de 10 kg/cm<sup>2</sup>. En esta área se produce un intercambio de calor entre la llama producida por la combustión del petróleo que provoca un cambio de fase del agua tratada, de líquido a vapor de agua. También cuenta con dos compresores de aire de 6 m<sup>3</sup>/min y 6 kg/cm<sup>2</sup> de presión, así como equipos auxiliares como son: calentador de petróleo, bombas de agua de alimentación a caldera y un cuarto de control de toda la actividad energética. El aire comprimido se utiliza para el funcionamiento de los equipos e instrumentos de control automáticos de accionamiento neumático.

El vapor producido va a las columnas de destilación, donde a través del intercambio de calor y masa se producen evaporaciones y condensaciones sucesivas de plato a plato que permiten el ascenso de los vapores enriquecidos en alcohol, los que van a un sistema de condensadores de tubos y coraza, donde se produce un intercambio de calor, siendo el agente refrigerante el agua tratada proveniente del sistema de enfriamiento que intercambia con los vapores alcohólicos absorbiendo

calor y condensándolos retornando estos en forma líquida a las columnas de destilación y el agua caliente vuelve al sistema de enfriamiento por gravedad.

Para el sistema de enfriamiento, se realiza esta propuesta de diseño de una torre de enfriamiento, que sustituya al actual enfriadero. Mediante un sistema de bombeo y redes de tuberías el agua fría retorna al sistema de condensación estableciéndose un circuito cerrado que se repite constantemente. (Anexo 5)

Siendo el sistema de destilación el proceso principal donde se garantiza la producción de alcohol etílico fino, que constituye la razón de ser de esta industria y su objeto social, se hace imprescindible particularizar en el mismo y realizar una descripción más detallada.

El alcohol etílico flema es la materia prima principal para la producción de alcohol etílico fino en la UEB. Destilería, el cual es suministrado por la UEB. Comercial.

La materia prima, es recibida en la destilería por bombes que se producen del almacén central o por descarga directa de ésta en los tanques habilitados al efecto en el interior de la planta. De los tanques interiores, el alcohol etílico flema, es bombeado hacia un calentador de tubo y coraza donde se eleva la temperatura del mismo, empleando para ello el calor residual del agua proveniente del primer condensador de la columna rectificadora con una temperatura de 70°C. El agua resultante va a la torre de enfriamiento. El alcohol etílico flema caliente se inyecta a la columna desflemadora donde se produce la dilución de éste aplicando la tecnología de destilación por hidroselección para lo cual se utiliza el agua residual de la columna rectificadora (flemaza) y vapor directo. En el tope de la columna se obtienen vapores alcohólicos de alto grado conteniendo mayormente impurezas (aldehídos), estos vapores son condensados en 3 condensadores parciales verticales: en los dos primeros la fracción condensada pasa a formar parte del reflujo que regresa a la columna desflemadora y en el tercero la fracción condensada pasa a través de rotámetro donde se controla el volumen extraído y es enviada hacia la columna recuperadora. Por el fondo de la columna desflemadora se obtiene la flema disuelta, que es enviada por bombeo a la columna rectificadora poniéndose en contacto con el vapor directo alimentado a la paila, donde a través de una nueva

rectificación se obtiene en la sección del pasteurizado la producción de alcohol etílico fino. Los vapores alcohólicos del tope de la columna rectificadora son enviados a 4 condensadores parciales verticales. En los tres primeros la fracción condensada pasa completamente a formar parte del reflujo que se introduce de nuevo a la columna rectificadora y en el cuarto la fracción condensada (alcohol de cabeza) pasa a través de rotámetro donde se controla el volumen extraído y es enviada hacia la columna recuperadora. El agua empleada como agente de enfriamiento proviene de la planta de tratamiento, los condensadores finales de las columnas de destilación tienen conexión con el condensador final en aras de expulsar a través de él los gases incondensables con el menor volumen de pérdidas posible y el agua caliente resultante retorna a la torre de enfriamiento.

El flujo residual que sale por el fondo de la columna rectificadora es enviado a un tanque receptor de flemaza realizándose previamente un control de riquezas alcohólicas, la cual como se explicó anteriormente es utilizada como agente de disolución del alcohol etílico flemaza en la columna desflemadora. En ambas columnas se realizan extracciones laterales de impurezas con el objetivo de extraer los alcoholes superiores, ésteres en la desflemadora y además n- propanol en la rectificadora, estas corrientes son enviadas a la columna recuperadora en la cual se recupera parte del alcohol extraído en todas las extracciones antes mencionadas que se realizan a las otras dos columnas, los vapores alcohólicos son condensados en dos condensadores parciales, los cuales empujan como agente de enfriamiento el agua tratada procedente del enfriadero y están conectados al condensador final, la fracción condensada en el primero va al reflujo de la columna y la del segundo es la producción de alcohol de uso doméstico y es enviada hacia los tanques de almacenamiento de este producto. El alcohol recuperado en la columna se obtiene por la flauta de extracción ubicada tres platos por debajo del tope y es enviado a la columna desflemadora donde continúa el proceso de destilación por hidroselección, la flemaza residual se envía a zanja. En los platos intermedios de la columna recuperadora está situada la campana de concentración del alcohol amílico de donde es extraído y enviado a la planta de separación de amílico y lavado en la cual existen dos columnas lavadoras y una separadora final de la cual por reboso se

obtiene el alcohol amílico que es enviado al tanque de almacenamiento y el agua de lavado residual se vierte a zanja.

### **3.1.2 Caracterización de los principales equipos que intervienen en el proceso productivo**

A continuación, se explica el funcionamiento de los principales equipos que intervienen en el proceso de producción del AEF. Se anexan las características técnicas de éstos y los restantes que se encuentran instalados en la fábrica. (Anexo 6)

#### **3.1.2.1 Caldera (generación de vapor)**

En el quemador se mezclan el aire con el combustible y se enciende la llama a presión y atraviesa el tubo o cañón central junto con los gases incandescentes. Al llegar al fondo, el tabique o deflector 4 no les permite ascender, se ven forzados a bajar y penetrar por los tubos inferiores. Al llegar al frente chocan con la pared frontal, ascienden y penetran por los tubos superiores en recorrido inverso y al llegar al final logran salir a la atmósfera a través del conducto de gases y la chimenea. El cuerpo de la caldera o del generador contiene agua que intercambia calor con los gases a través de la pared de los tubos generándose de esta forma vapor de agua que va al proceso de producción. Los lodos y sales se van depositando en el fondo y salen periódicamente por las extracciones de habilitadas al efecto. (Anexo 7)

#### **3.1.2.2 Sistema de combustible (calentadores de petróleo)**

El sistema está formado por dos tanques receptores, dos calentadores de petróleo y dos bombas que trabajan alternativamente. El petróleo se suministra por transporte terrestre a los tanques de almacenamiento, a través de una bomba el petróleo se hace pasar por los calentadores y de ahí continua su recorrido hacia el área de generación por un sistema de tubería.

### **3.1.2.3 Planta de tratamiento de agua**

Suavizador: Es un tanque cerrado de níquel que contiene hasta  $\frac{3}{4}$  de su volumen total una resina de intercambio iónico que se encuentra ubicada sobre una maya interior para evitar la pérdida de la misma a la zanja durante el proceso. (Anexo 8)

### **3.1.2.4 Bombas**

Las bombas empleadas en el proceso son bombas centrífugas, en ellas entra el líquido por la succión del impelente hacia el caracol en el cual se presuriza y hace que por la fuerza centrífuga salga por la tubería de salida hacia su destino final. El impelente es accionado por un motor eléctrico convirtiendo la energía eléctrica en energía mecánica. (Anexo 9)

### **3.1.2.5 Calentador de flema**

Es un intercambiador de tubos y coraza, por el interior de los tubos circula el agua caliente a una temperatura de 70°C y por la parte exterior de este la flema. En los cabezales de entrada y salida de agua existen deflectores que obligan a circular a ésta realizando varios pasos en ambos sentidos, esto permite un aprovechamiento mayor de intercambio de calor entre ambos líquidos involucrados con un mayor tiempo de retención. También en la zona de circulación de la flema existen deflectores con el mismo objetivo que el descrito en la zona del agua. Se produce un intercambio de calor donde el agua cede y la flema absorbe, adquiriendo una temperatura de 65°C. (Anexo 10)

### **3.1.2.6 Columnas de destilación**

El alcohol flema se inyecta por la parte inferior de la columna y se mezcla con el vapor de agua. Los vapores alcohólicos producidos ascienden a través de las perforaciones que existen en los distintos platos, haciendo un movimiento de zigzag al chocar con las cazoletas y salir por las ranuras laterales de esta. De acuerdo a la volatilidad relativa de cada uno de los compuestos de la mezcla se forman capas o fases de equilibrio que permiten la separación de las impurezas en los puntos de



mayor concentración de las mismas y, de la misma manera, la extracción de AEF en la zona de mayor concentración del etanol. (Anexo 11)

### **3.1.2.7 Condensadores**

Por la parte inferior entra agua fría, atraviesa los tubos de forma ascendente y sale por la parte superior como agua caliente debido a que en ese trayecto absorbe calor de los vapores alcohólicos, éstos entran al condensador por la parte superior y por la inferior sale el alcohol condensado debido a que ceden su calor al agua que circula por los tubos. Los vapores alcohólicos que aún no se enfriaron lo suficiente para condensarse pasan al segundo condensador y así sucesivamente hasta el condensador final el cual está conectado a la atmósfera para la salida de gases incondensables. (Anexo 12)

### **3.2 Resultados de la selección del tipo de torre y de relleno**

En la mayoría de las industrias químicas las torres de enfriamiento son preferentemente de tiro inducido y rellenas con rejillas de madera u otro material resistente a la corrosión. También se rellenan con bloques ordenados.

Para tener mayor eficiencia de enfriamiento, la técnica más adecuada sería la selección de una torre de enfriamiento que opere independientemente de la velocidad y dirección del viento, para que de esta forma se pueda controlar la demanda de aire con velocidad seleccionada en los requerimientos de un proceso.

Por tanto, se opta por el diseño de una torre de enfriamiento mecánica de tiro inducido a contraflujo, debido a que permiten mejor distribución del aire y mayor eficiencia de enfriamiento. En estas torres el agua fría en la parte inferior se pone en contacto con el aire que entra (baja humedad relativa) y el agua caliente que entra, se pone en contacto con el aire húmedo que sale. En estos equipos, la recirculación del aire rara vez es un problema puesto que, el aire saturado es expulsado a alta velocidad, de manera que se proyecte hacia arriba, lejos de las lumbreras de admisión de la torre y de esta manera se arrastra por las corrientes naturales de aire que evitan su asentamiento posterior.

La preferencia hacia las torres de este tipo ha sido muy pronunciada en los últimos años, puesto que en su uso hay ventajas que exceden a todos los otros tipos; por otro lado, la mayoría de los investigadores que se dedicaron al análisis del funcionamiento de torres de enfriamiento de tiro mecánico, partieron de modelos de torres de tiro inducido, ofreciendo suficientes publicaciones concretas (estudios de torres de este tipo fueron hechos por célebres investigadores, tales como Markel, Goodman, Sherwood Y Micklely).

Según Contreras, (2012); Calzada, (2012) y Obregón, *et al.*, (2017) refieren que existe varios tipos de relleno, el laminar puede ser de PVC (policloruro de vinilo) o de PP (polipropileno), el salpiqueo puede ser de madera, PVC, PP y PE (polietileno), los plásticos son mucho más efectivos y baratos que los de madera. Siguiendo este criterio se escogió para la torre un empaque plástico tipo película que tiene una eficiencia superior al tipo salpicadura hasta un 30% (Kaijun; *et al*, 2017). Se selecciona un relleno filmico de PVC de arreglo hexagonal tipo colmena debido a su amplio uso en los diseños actuales de estas torres. En la provincia de Pinar de Río, en una torre de enfriamiento fabricada en la UEB primavera, encargada de la producción de helados, se empleó este tipo de relleno.

### **3.3 Análisis de las condiciones de inicio**

Los datos necesarios para resolver el cálculo de la torre son el flujo de agua a enfriar (L), temperaturas de entrada ( $T_{L2}$ ) y salida ( $T_{L1}$ ) del agua, y condiciones reinantes del aire del lugar ( $T_{bs}$ ,  $T_{BH}$ ,  $H_R$ ).

$$L= 320 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$T_{L2}= 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{L1}= 38 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{bs}= 31 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{BH}= 28,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$H_R= 80 \%$$

### 3.3.1 Análisis de la aproximación de temperatura y rango de enfriamiento

Para la aproximación de la temperatura se tiene,

$$T_{L1}-T_{bh} = 9,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

La aproximación es de 9,7 °C, comprendida dentro de los valores establecidos.

Para el rango se tiene,

$$T_{L2}-T_{L1} = 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

El rango es de 12 °C, el valor máximo permisible es de 16 °C, por lo que el resultado es acertado.

### 3.4 Resultados del cálculo y diseño de la torre de tiro inducido a contraflujo

#### 3.4.1 Resultados del flujo necesario de aire

Para determinar el flujo necesario de aire se tiene que:

$$H_1 = 55 \text{ Btu/lb}$$

$$H_T = 88 \text{ Btu/lb}$$

$$T_T = 112,3 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$T_{L1} = 100,4 \text{ }^{\circ}\text{F}$$

$C_L = 1 \text{ Btu/lb}^{\circ}\text{F}$  (la industria de torres de enfriamiento establece este valor para el agua, (Treybal; 1994))

Obteniéndose  $(L/G)_{\min} = 2,77$ , que será el valor de S.

Luego,

$$L = 88,6 \text{ kg/s (equivalente a } 320 \text{ m}^3\text{/h)}$$

$$S = 2,77$$

Por tanto,  $G_{\min} = 32 \text{ kg/s}$

El flujo de aire de operación debe ser el doble del flujo mínimo, por lo que para determinar la pendiente de la línea de operación se calcula aumentando el caudal de aire al doble, de modo que S se mantenga entre 0,75 y 1,5:

$$L = 88,6 \text{ kg/s}$$

$$G = 64 \text{ kg/s}$$

$$\text{Por tanto, } S = 1,38$$

Como S se encuentra en el intervalo establecido, el caudal de aire presente en la torre está determinado por,

$$S = 1,38$$

$$L = 88,6 \text{ kg/s}$$

Por tanto, el flujo de aire de operación de 122,27 kg/s.

### **3.4.2 Resultados del área de la sección transversal**

Conociendo el flujo másico del gas y su velocidad y densidad se puede calcular la sección transversal de la torre, para lo cual se tiene:

$$G = 122,27 \text{ kg/s}$$

Para torres de enfriamiento se recomienda normalmente un intervalo de velocidades del aire entre 1,83–2,44 m/s.

$v = 2,13 \text{ m/s}$  (valor típico según el tipo de empaquetadura escogida y la altura total de la misma propuesta)

$$\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3 \text{ (densidad del aire a la temperatura de entrada, } 31 \text{ }^\circ\text{C y } 1 \text{ atm)}$$

Obteniéndose un área de sección transversal de  $44,5 \text{ m}^2$

La razón de los caudales aire- agua debe ser de 1–1.5.

$$G/L = 122,27/88,6$$

$G/L = 1,38$  (se encuentra en el intervalo establecido)

### 3.4.3 Resultados de las velocidades superficiales

Teniendo el área de la sección transversal, se obtienen las velocidades superficiales del gas y del líquido, donde se tiene:

$$A_{\text{trans}} = 44,5 \text{ m}^2$$

$$G = 122,27 \text{ kg/s}$$

$$L = 88,6 \text{ kg/s}$$

Obteniéndose una  $G' = 2,75 \text{ kg/s.m}^2$  y una  $L' = 2 \text{ kg/s.m}^2$ .

### 3.4.4 Resultados de la altura de la torre

Las condiciones de equilibrio y de operación se expresan en función de la entalpía del gas incondensable y de la temperatura del líquido.

En las torres de enfriamiento la “aproximación de temperatura” en el líquido y las condiciones del aire de entrada se especifican o suponen, y la temperatura del líquido a la entrada se conoce de las condiciones del proceso. El flujo de gas de operación es mayor que el mínimo, la condición de operación a determinar es la entalpía del gas a la salida,  $H_2$ .

$$H_1 = 55 \text{ Btu/lb}$$

$$L/G = 0,72$$

$$T_{L2} = 122 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$T_{L1} = 100,4 \text{ }^\circ\text{F}$$

Obteniéndose una  $H_2$  de 70,6 Btu/lb

Una vez conocidas las condiciones de operación se calcula la altura de una unidad de transferencia,  $H_{\text{TOG}}$ , y el número de unidades de transferencia,  $N_{\text{TOG}}$ .

#### **3.4.4.1 Resultados del número de unidades de transferencia**

El número de unidades de transferencia referido a las entalpías, en este caso se resuelve mediante el método de los trapecios.

Primeramente, se fija el paso, para ello:

$$h = (H_2 - H_1) / 12$$

$$h = 1,3$$

En el gráfico de la curva de equilibrio y la línea de operación, con cada valor de entalpía desde  $H_1$  hasta  $H_2$ , se lee el valor de entalpía de equilibrio ( $H^*$ ) y se calcula la función  $1/(H^* - H)$ .

De esta manera se obtiene la tabla 3.1 de resultados. (Anexo 13)

Para el cálculo de  $N_{OH}$  se tiene:

$$h = 1,3$$

$$y_o = 0,1163$$

$$y_n = 0,0217$$

$$\sum y_i = 0,5648$$

De esta manera se tiene un  $N_{OH} = 0,82$

#### **3.4.4.2 Resultados de la altura de la unidad de transferencia**

La altura de la unidad de transferencia depende del coeficiente de transferencia de masa, que se calcula según el tipo de relleno. Para el tipo de relleno escogido para este diseño se determina por:

$$L' = 2 \text{ kg/s.m}^2$$

$$G' = 2,75 \text{ kg/s.m}^2$$

Así se obtiene  $K_{ya} = 4,9 \text{ kg/s.m}^2$ .

Para la altura de la zona empaquetada, se determina  $H_{OH}$  por:

$$G' = 2,75 \text{ kg/s.m}^2$$

$$K_{ya} = 4,9 \text{ kg/s.m}^2$$

Así se tiene una  $H_{OH}$  para la zona empaquetada de 0,56 m.

Para la altura total de la torre, se determina el  $H_{OH}$  por:

$$G = 122,27 \text{ kg/s}$$

$$K_{ya} = 4,9 \text{ kg/s.m}^3$$

Así se tiene una  $H_{OH}$  total de 25 m.

Para obtener la altura de la zona empaquetada y la altura total de la torre, se emplea la altura de la unidad de transferencia correspondiente.

Para la altura de la zona empaquetada de la torre se tiene:

$$N_{OH} = 0,82$$

$$H_{OH} = 0,56 \text{ m}$$

$$\text{Por tanto, } z = 0,46 \text{ m}$$

Para la altura total de la torre se tiene:

$$N_{OH} = 0,82$$

$$H_{OH} = 25 \text{ m}$$

$$\text{Por tanto, } Z = 20,5 \text{ m}$$

Para un control más fácil de la torre de enfriamiento que se propone y de sus parámetros operacionales, así como para hacer más factible el mantenimiento del ventilador ubicado en la parte superior de la torre se decide que la misma sea de 2 secciones consecutivas de 10,5 m de altura cada una. Para aumentar la superficie de contacto del agua con el aire, favoreciendo la transferencia de calor, se decide ubicar en cada sección 10 celdas superpuestas de relleno de 0,46 m, obteniéndose una altura de total de empaquetadura de 4,6 m. Las torres de enfriamiento pueden

ser de sección rectangular o circular. Como el área es de 44,5 m<sup>2</sup>, se adopta sección rectangular de 4 m por 11,2 m de lado, lo que representa un área de sección transversal total de 44,8 m<sup>2</sup>.

### **3.4.5 Resultados de la potencia térmica a disipar en la torre**

Para la potencia térmica a disipar en la torre se tiene:

$$L = 88,6 \text{ kg/s}$$

$$C_{pa} = 4,18 \text{ kJ/kg.K (tabulado)}$$

$$t_L = T_{L2} - T_{L1} = 323 \text{ K} - 311 \text{ K} = 12 \text{ K}$$

$$\text{Así se obtiene } Q = 4\,444,18 \text{ kJ/s}$$

Se necesita disipar 4 444,18 kJ/s.

### **3.4.6 Resultados de la estimación de las necesidades de agua de reposición**

Al pasar a través de una torre de enfriamiento se pierde agua por evaporación y por arrastre. La primera puede calcular con bastante aproximación y la segunda, es la cantidad de agua que en forma de finas gotas está siendo arrastra por el vapor por la parte superior de la torre, se considera que no sea mayor a un 10% de las pérdidas por evaporación.

#### **3.4.6.1 Resultados de las pérdidas de agua por evaporación**

Para la temperatura en °F:

$$L = 88,6 \text{ kg/s}$$

$$T_{L1} = 100,4 \text{ °F}$$

$$T_{L2} = 122 \text{ °F}$$



Se obtienen pérdidas por evaporación de 1,63 kg/s.°F, que equivalen a 19,56 kg/s.

### **3.4.6.2 Resultados de las pérdidas de agua por arrastre**

Se halla el 0,1 y el 0,2 % respectivamente de las pérdidas por evaporación:

$$X_1 = 0,0886 \text{ kg/s}$$

$$X_2 = 0,1772 \text{ kg/s}$$

Luego se calcula el promedio entre ambos resultados, obteniéndose pérdidas por arrastre de 0,1329 kg/s.

Se tienen pérdidas por evaporación de 19,56 kg/s y pérdidas por arrastre de 0,1329 kg/s, estas no superan el 10% de las primeras, por lo que el valor es acertado.

$$X_3 = 1,956 \text{ kg/s}$$

Por tanto, el agua de reposición es la sumatoria de las pérdidas por evaporación y por arrastre (Consultar en Perry, Manual del Ing Químico).

Donde,

$$P_{\text{evap}} = 19,56 \text{ kg/s}$$

$$P_{\text{arr}} = 0,1329 \text{ kg/s}$$

Por lo que la cantidad de agua que se necesita reponer será de 19,7 kg/s.

### **3.5 Resultados de la eficiencia de la torre**

Para la eficiencia de las torres de enfriamiento se tiene:

$$T_{L1} = 38 \text{ °C}$$

$$T_{L2} = 50 \text{ °C}$$

$$T_{\text{bh}} = 28,3 \text{ °C}$$

Obteniéndose una eficiencia de 55 % aproximadamente.

### **3.6 Resultados del cálculo de los parámetros fundamentales para la selección del ventilador**

Para determinar el flujo volumétrico de aire que manejará el ventilador, se tiene:

$$G= 122,27 \text{ kg/s}$$

$V_{es}= 0,9051 \text{ m}^3/\text{kg}$  (se toma este valor a  $33^\circ\text{C}$ , que es la temperatura promedio en el mes de calor más crítico, agosto)

Se obtiene un flujo volumétrico de aire de  $110,7 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Para determinar la presión estática se tiene:

$$g= 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$v= 2,13 \text{ m/s}$$

Así se tiene una  $P_s$  de  $0,92 \text{ m}$

Para la potencia requerida por el ventilador se tiene:

$$P_s= 0,92 \text{ m}$$

$$G= 122,27 \text{ kg/s}$$

Así se obtiene una  $P$  de  $1478,3 \text{ Hp}$ . Por tanto, en cada una de las 2 secciones de la torre de enfriamiento que se propone se ubicará un ventilador de  $739,15 \text{ Hp}$  aproximadamente, según las características de diseño de los fabricantes de los mismos.

### **3.7 Resultados de las condiciones de instalación**

Se propone que la tubería se calibre adecuadamente, que su diseño permita la expansión y la contracción provocada por la temperatura. La instalación debe equilibrar el flujo a cada celda apropiadamente. La instalación de la tubería

necesaria en la torre, estará debajo del nivel del agua de operación en la torre de enfriamiento.

### **3.8 Análisis del depósito, estanque o piscina de agua**

Se propone la fabricación de un estanque de 4 m por 11,2 m según el área transversal calculada anteriormente y se propone que la profundidad sea de 0,8 m para evitar las pérdidas por salpicaduras.

El depósito adyacente donde se mezcla el agua fría proveniente de la torre de enfriamiento y el agua de reposición, para garantizar el flujo de agua requerido por el proceso se propone que tenga 12 m de largo, 12 m de ancho y 2,4 m de profundidad, propiciando un volumen de 345,6 m<sup>3</sup>.

### **3.9 Resultados de la estimación del costo de adquisición de la torre de enfriamiento utilizando el software CAPCOST**

Para la estimación del costo de la torre en el software CAPCOST, se introducen los datos referidos a una de las secciones de la torre de enfriamiento que se propone, luego, el resultado se multiplica por dos y será el costo total estimado para el proyecto.

Los datos que se introducen para el cálculo de la torre de enfriamiento son:

Diámetro (m) = 4

Altura (m) = 10,5

Presión (barg) = 1

Material de construcción de la torre = Acero al carbono

Material de construcción del empaque = Polietileno

Altura del empaque (m) = 4,6

De esta manera se obtiene:

Costo de la parte interna = \$ 78 505

Costo de la estructura = \$ 84 589

Costo del módulo simple o desnudo = \$ 435 471

Por tanto, la estimación del costo será de \$ 870 942.

Al usar el valor de altura de la empaquetadura de 4,6 m, salen carteles de advertencia, pues el software calcula para una altura de empaquetadura mínima para ese tipo de torre de 7 m. Los costos serán calculados entonces para las condiciones del software, por lo que la torre propuesta estará sobre diseñada en este aspecto.

Para actualizar el índice de costo se tiene:

$$C_1 = \$ 870 942$$

$$I_1 = 444,2$$

$$I_2 = 824,5$$

Se obtiene entonces un  $C_2 = \$ 1 616 595,4$

### **Conclusiones parciales**

Después de un análisis extenso y realizar los cálculos pertinentes, se propone para disminuir la temperatura de 320 m<sup>3</sup>/h de agua que se necesita procesar, desde 50 °C hasta 38 °C; el diseño de una torre de enfriamiento con las siguientes características:

- Torre de tiro inducido a contraflujo.
- Relleno fílmico de PVC de arreglo hexagonal tipo colmena.
- Área de sección transversal de 44,5 m<sup>2</sup>, de sección rectangular de 4m por 11,2 m de lado.
- Se pondrán dos secciones consecutivas de 10,5 m de altura para lograr 21 m de altura total.
- Altura total de empaquetadura de 4,6 m, con 10 celdas de empaques de 0.46 m superpuestas en cada una de las dos secciones.
- La torre debe disipar 4 444 kJ/s.

- La eficiencia será de 55 %
- Se ubicarán dos ventiladores de 739 Hp aproximadamente.
- El costo de adquisición de la torre de enfriamiento se estima sea de \$ 1616595, 4.
- Se recomienda distribuir el agua en la parte superior de la torre mediante siete tubos ubicados en cada sección, distanciados 0,5 m; con 46 orificios cada uno de 10 mm, distanciados 0,1 m.

## CONCLUSIONES

- Para garantizar mayor eficiencia en el proceso de obtención del alcohol etílico fino en la destilería de la Ronera Cárdenas se propone un proyecto de diseño de una torre de enfriamiento.
- Se determinan las condiciones técnicas y operativas de los principales equipos que intervienen en el proceso de producción del alcohol etílico fino.
- La torre será mecánica de tiro inducido a contraflujo, por ser la más efectiva para este proceso.
- Se propone una torre de relleno fílmico de PVC de arreglo hexagonal tipo colmena, con área de sección transversal de 44,5 m<sup>2</sup>, con sección rectangular de 4m por 11,2 m de lado. Se pondrán 2 secciones consecutivas de 10,5 m de altura para lograr 21 m de altura total, con una altura total de empaquetadura de 4,6 m; con 10 celdas de empaques de 0.46 m superpuestas en cada una de las 2 secciones. Se ubicarán 2 ventiladores de 739 Hp aproximadamente.
- El costo de adquisición de la torre de enfriamiento se estima sea de \$ 1616595, 4.

## **RECOMENDACIONES**

Proponer a la dirección de la corporación CubaRon S.A el diseño de torre de enfriamiento para garantizar mayor eficiencia en la obtención de alcohol etílico fino en la destilería de la Ronera Cárdenas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, H (2017) Diseño y optimización de una torre de enfriamiento de tiro inducido. Instituto politécnico Nacional de Ingeniería Química e Industrias Extractivas. Tesis en opción del título de Ingeniero Químico Industrial. México.
- Alvarado, S. (2012) CFE Una empresa de clase mundial. Informe final de residencia profesional. México.
- Alean J. D., Gutiérrez G.A., Chejne F., Marlon J., Bastidas, M.J. (2009). *Simulación de una Torre de Enfriamiento Mecánica Comparada con Curvas Experimentales*. Información tecnológica. doi:10.1612/inf.tecnol.4107it.08  
Recuperado de <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642009000300003>
- Amaro, D (2021) Evaluación y propuestas de acciones para minimizar la problemática ambiental de los residuales líquidos de la Universidad de Matanzas. Sede Camilo Cienfuegos. Tesis en opción del título de máster en Gestión y Control Ambiental. Matanzas.
- Arnabat, I. (2018) *¿Qué es torre de refrigeración y enfriamiento? Funcionamiento y seguridad*. Publicación en CALORYFRIO.
- Bac-Pritchard, Inc. (1984). *Series 4008 Wood Cooling Towers*. Tech. Report.
- Burger, R. (1993). *Cooling Towers, The Often Over-looked Profit Center*, Chemical Engineering.
- Castillo, E, (2007) Optimización de torres de Enfriamiento. En opción al título de Ingeniero Bioquímico. Instituto tecnológico de Colima. México.
- Christie J. (1998). *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. Continental S.A de C.V. México.
- Contreras, A.A. (2012). *Torres de Enfriamiento*. Veracruz: SlideShare.
- Díaz, V., Barreneche, R. (2005). *Acondicionamiento térmico de edificios*. Nobuko.



Gelvis, B y Díaz, CH. (2020) Cálculo y selección torres de enfriamiento para circuito cerrado de enfriamiento de condensador en la empresa termotasajero S.A. en opción al título de Ingeniero Mécanico. Colombia.

González, J.A. (2014) *Torres de enfriamiento*.

González, B; Pérez, O; *et al.* (2018) Integración de la red de agua en una ronera cubana. Universidad tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”. La Habana.

Guía técnica de torres de refrigeración. (2007) Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR). Madrid.

Hiriart, F. (2012) Diseño de una torre nueva de mayor eficiencia, comparada con la torre actual. Informe final de residencia profesional. México.

Incropera, F.P., Dewitt D.P. (2001). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley.

Iñiguez, J; Barriga, A. Cálculo y diseño de empaquetadura y ventiladores para una torre de enfriamiento de tiro forzado.

Jianlin, Ch., Nianpin, L., Kuan, W. (2015). *Study of Heat-source-tower Heat Pump System Efficiency*. Procedia Engineering. doi: 10.1016/j.proeng.2015.09.050  
Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815028787>

Kaijun, D; Pingjie, L. *et al.*, (2017). *Research on Free Cooling of Data Centers by Using Indirect Cooling of Open Cooling Tower*. China

Kenney, Ray. (1983). *Ozonation as Cooling Tower Water Treatment; A Pilot Study*. Tech. Report.

Kern, Donald W. (1991). *Procesos de Transferencia de Calor*. CECSA.

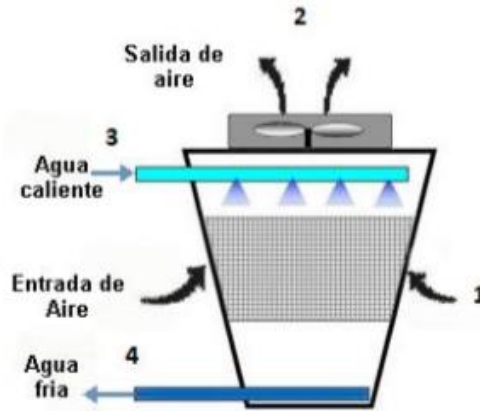
- León, A; Álvarez, C, et al, (2015) Control de la calidad en el proceso de destilación del alcohol étílico fino. Proyecto de curso de Ingeniería de Procesos 2. Universidad Camilo Cienfuegos. Matanzas.
- Martínez, P; Rus, E. (2004) Operaciones de Separación en Ingeniería Química Métodos de Cálculo. Ed. Pearson Educación S.A, Madrid.
- Mendoza, J.D. y Gallardo, A.R. (2016). *Design and construction of a prototype of counterflow induced shot cooling tower.*
- Mendoza, J y Gallardo, A. (2016) Diseño y construcción de un prototipo de torre de enfriamiento de tiro inducido a contraflujo. Tesis en opción al título de ingeniero industrial. Educador.
- McCauley, S. M., y Christiansen, M. H. (2019). Language learning as language use: A crosslinguistic model of child language development. *Psychological Review*, 126(1), 1–51. <https://doi.org/10.1037/rev0000126.12>.
- Minnesota Technical Assistance Program (1995). *Reducing Water Usage with Cooling Towers*. Tech. Report.
- Nailing, L., Lixia, Z., Xiangqin, J. (2017). *The Effect of the Air Water Ratio on Counter Flow Cooling Tower*. *ProcediaEngineering*. doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.925  
Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817344831>
- Obregón, L.G., Pertuz, J.C., Domínguez, R.A. (2017). *Análisis del desempeño de una torre de enfriamiento a escala de laboratorio para diversos materiales de empaque, temperatura de entrada de agua y relación másica de flujo agua-aire*.  
Doi: <http://dx.doi.org/10.15665/rp.v15i1.820> Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v15n1/1692-8261-prosp-15-01-00042.pdf>
- Parra, S (2018). Sistema de muestreo y control de temperatura en torres de enfriamiento. Informe final de trabajo de grado. Instituto Tecnológico Metropolitano.
- Pérez, T.M., Rodríguez, Y. & Regalado, D (2018). *Calculation of the operation parameters for the selection of cooling tower.*

- Pérez, L. (2021) Dimensionamiento de una torre de enfriamiento de recálculo de esta tecnología moderna y ahorro de agua, en la cervecería Antonio Díaz Santana, Manacas. Trabajo de diploma. Villa Clara.
- Perry, Robert H. y D.G. (1992). *Manual del Ingeniero Químico*. Mc Graw-Hill.
- Perry and Green. (2006). *Manual de Ingeniero Químico*, Tomo 1. McGraw Hill.
- Portero, V y Valerezo, S. (2012). Diseño y construcción de una torre de enfriamiento de agua por evaporación de tiro inducido. Tesis en opción al título de ingeniero químico. Educador.
- Ramírez, D; Villareal, R. (2008). Evaluación del desempeño térmico de la torre de enfriamiento CT – 502. Tesis en opción al título de ingeniero mecánico. México.
- Revista Chemical Engineering. Índice de costos de plantas de Ingeniería Química.
- Revista Cero Grados. (2013) Torres de enfriamiento.
- Reporte de producto. (2004) ¿Cuánto consume en agua tu torre de enfriamiento(TE)?
- Sariego, Y., García, E., Pérez, S., Rodríguez, L. (2017). *Evaluación energética de una planta de helados*. Recuperado de <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/491> Cuba
- Sosa, J, Agudelo, J., *et al* (2016) Diseño de sistema de distribución y control de una torre de enfriamiento. Informe final de trabajo de grado de Ingeniería electrónica. Instituto Tecnológico Metropolitano. Colombia.
- The Center for Applied Science. (1996). *Cooling Tower- What it does?* [http://www.cti.org/tech\\_papers.shtml](http://www.cti.org/tech_papers.shtml)
- The Center for Applied Science. (1996). *Fountains-What´s Wrong with Chlorine and Ozone?* [http://www.cti.org/tech\\_papers.shtml](http://www.cti.org/tech_papers.shtml)
- Torres, C (2017) Efecto del flujo de alcohol, procedente de las columnas de destilación-rectificación, en los parámetros de diseño de torre de enfriamiento acoplado al condensador. Tesis en opción al título de ingeniero mecánico. Perú.

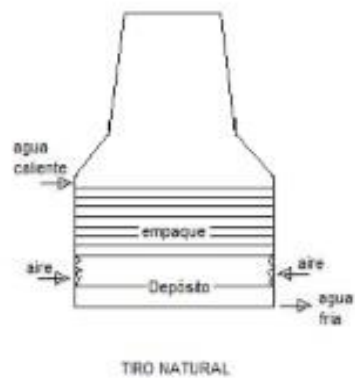
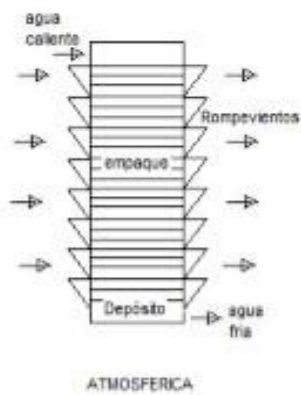
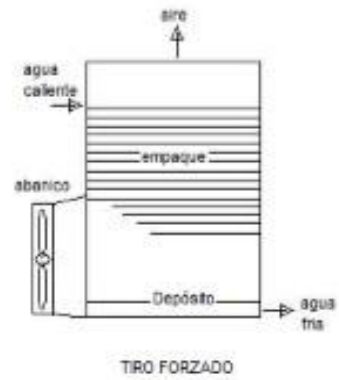
- Towles, John. (1996). *The Technology of Ozone in the Oxidation of Organic Compounds*. Tech. Report.
- Treybal, R. (1994). *Operaciones de Transferencia de Masa*. Mc Graw-Hill. Estados Unidos.
- Turton, R, *et al.* (2018) *Analysis, Synthesis and Design of Chemical Process*. West Virginia Ed. Prentice Hall.
- Yunus, A. (2007) *Transferencia de calor y masa*. Ed. Mc Graw –Hill. México.

# ANEXOS

## Anexo 1 Esquema de torre de enfriamiento de tiro inducido

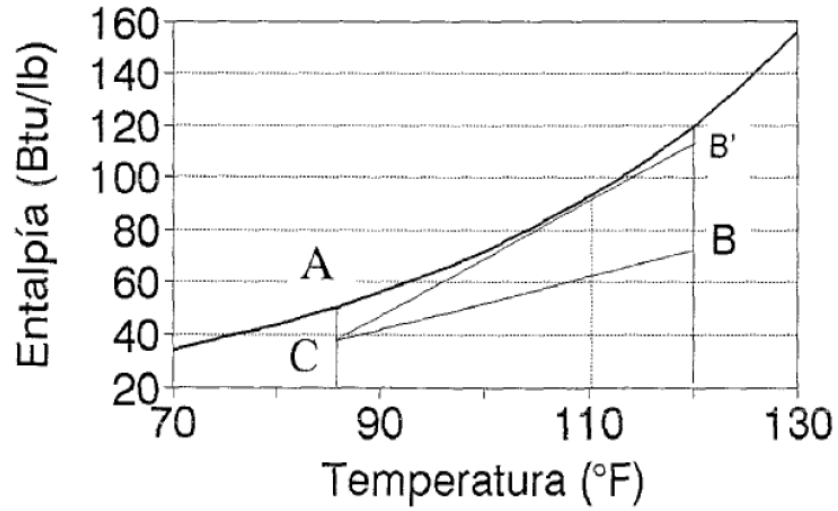


## Anexo 2 Tipos de torre de enfriamiento



Anexo 3 Figura 2.1 Cálculo de la torre de enfriamiento

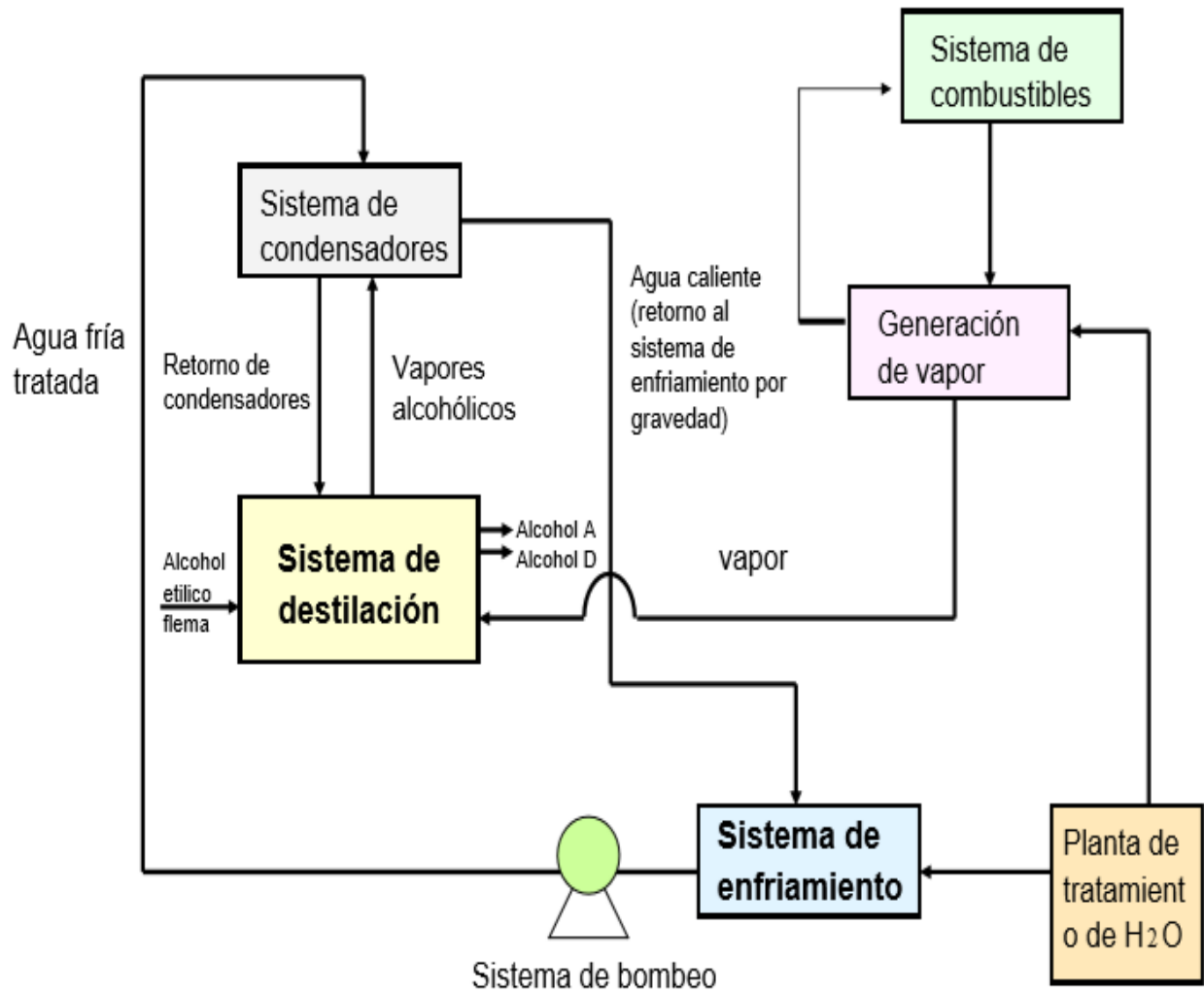
### Cálculo de la Torre de Enfriamiento



Anexo 4 Ubicación de la Ronera Cárdenas perteneciente a la corporación CubaRon



Anexo 5 Esquema general del proceso de producción



Anexo 6 Principales equipos y características técnicas

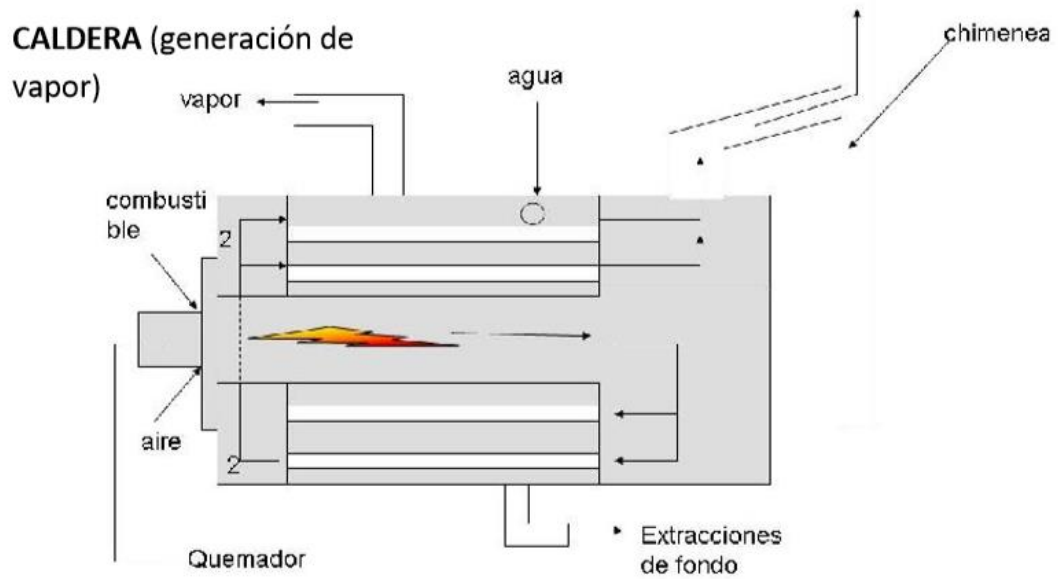
Etapa	Equipo	Descripción		
1. Recepción y precalentamiento de la materia prima	Tanques receptores  Intercambiador horizontal	Capacidad: 80 000 l  Intercambiador de tubo y coraza 98 tubos de 38x2x4000mm. 2 pases. Área de transferencia = 52 m <sup>2</sup>		
2.Desflemación	- Columna desflemadora.	Diámetro-----2200 mm No de Plato -----67 Tipo de Plato -----Cazoleta Cant Cazoleta/Plato----199 Diámetro de las Cazoletas---80x1.5 Espaciado entre platos ---170 Materiales-----Cobre, Eridas de Acero		
	condensadores:	1 <sup>o</sup> Condens.      2 <sup>o</sup> Condens.      3 <sup>o</sup> Condens.		
	- Tipo de Tubo - Cant de Tubo - Diámetro tubo - Longitud tubos - Área de transf - Posición	Tubo y coraza 313 38x2 3000 111 m <sup>2</sup> Vertical	Tubo y coraza 313 38x2 2500 92.5 m <sup>2</sup> Vertical	Tubo y coraza 313 38x2 2500 92.5 m <sup>2</sup> Vertical



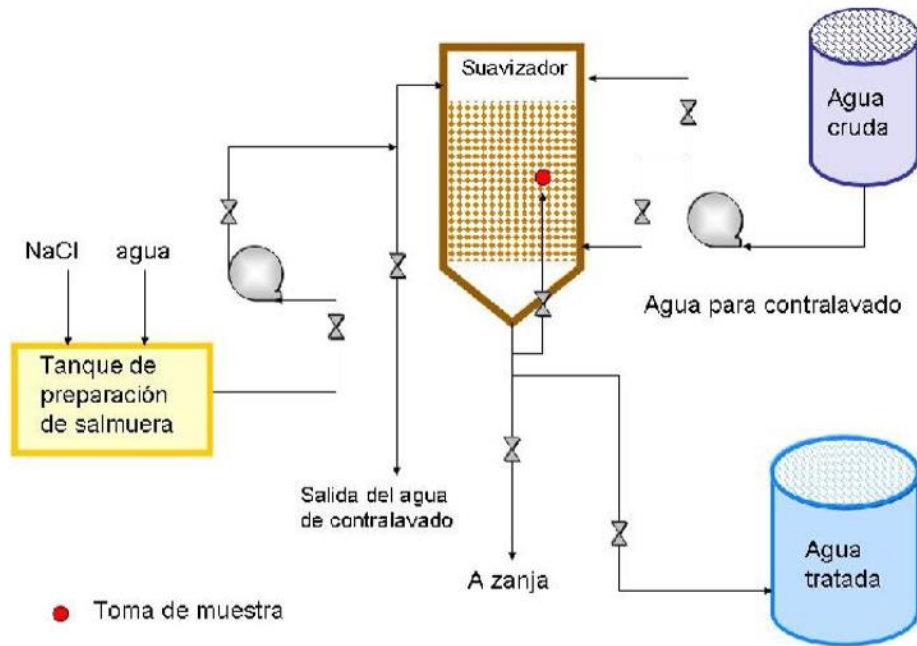
3.Rectificación	- Columna rectificadora	Diámetro-----2400 mm No de Plato -----74 Tipo de Plato -----Cazoleta Cant Cazoleta/Plato----230 Diámetro de las Cazoletas---80x1.5 Espaciado entre platos ---170 Materiales-----Cobre, Bridas de Acero				
	Condensadores	1 <sup>o</sup> Cond.	2 <sup>o</sup> Cond	3 <sup>o</sup> Cond	Cond Final	Cond Gases
	- Tipo  - Cant de Tubo - Diámetro tubo - Longitud tubos - Área de transf - Posición	Tubo y coraza  313 38x2 3000 111 m <sup>2</sup> Vertical	Tubo y coraza  313 38x2 3000 111 m <sup>2</sup> Vertical	Tubo y coraza  313 38x2 3000 111 m <sup>2</sup> Vertical	Tubo y coraza  313 38x2 3000 111 m <sup>2</sup> Vertical	Tubo y coraza  313 38x2 2500 92.5 m <sup>2</sup> Vertical
	- Tanque de flemas disueltas  - Tanque de Flemaza	Diámetro-1600 mm, Capacidad-6.3 m <sup>3</sup> , Posición Horizontal  Diámetro-1600 mm, Capacidad-6.3 m <sup>3</sup> , Posición Horizontal				

Etapa	Equipo	Descripción		
4. Recuperación	- Columna recuperadora	Diámetro-----1200 mm No de Plato -----56 Tipo de Plato -----Cazoleta Cant Cazoleta/Plato---58 Diámetro de las Cazoletas---80x1.5 Espaciado entre platos ---170 Materiales-----Acero Inoxidable, Bridas de Acero		
		1 <sup>o</sup> Condensador	2 <sup>o</sup> Condensador	Cond de Fusel-Oil
	- Tipo - Cant de Tubo - Diámetro tubo - Longitud tubos - Área de transf - Posición	Tubo y coraza 313 38x2 2500 92.5 m <sup>2</sup> Vertical	Tubo y coraza 313 38x2 2500 92.5 m <sup>2</sup> Vertical	Tubo y coraza 109 38x2 2000 26 m <sup>2</sup> Vertical
5. Planta de lavado de fuseloiló alcohol amilico.	- Columna de lavado alcohol amilico.	Columna de Cobre, con accesorios para la entrada de agua y alcohol amilico a contracorriente.		
	- Tanque receptor.	Tanque de níquel Diámetro-1400 Capacidad-2.5 m <sup>3</sup> Posición Vertical		

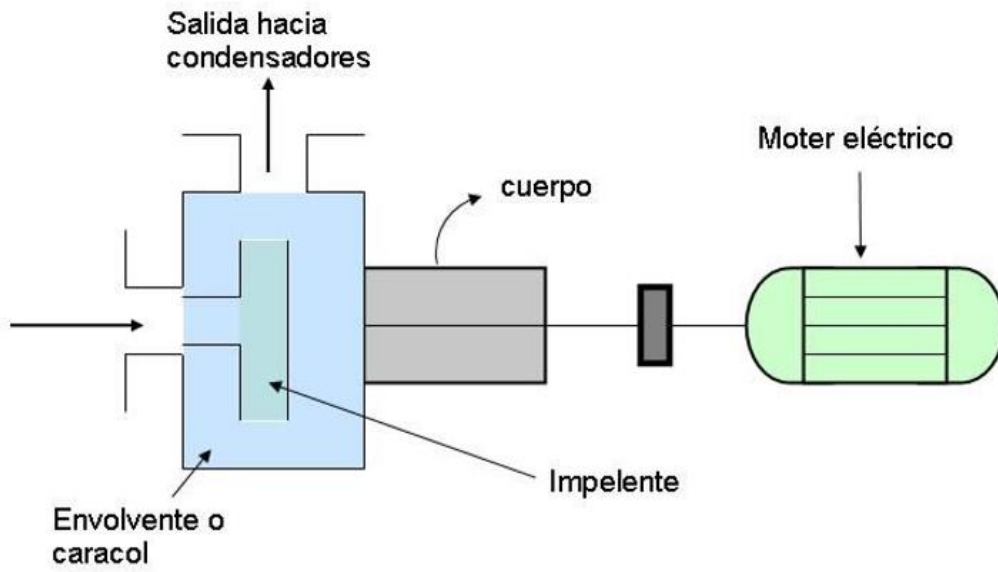
Anexo 7 Diagrama de la caldera (generación de vapor)



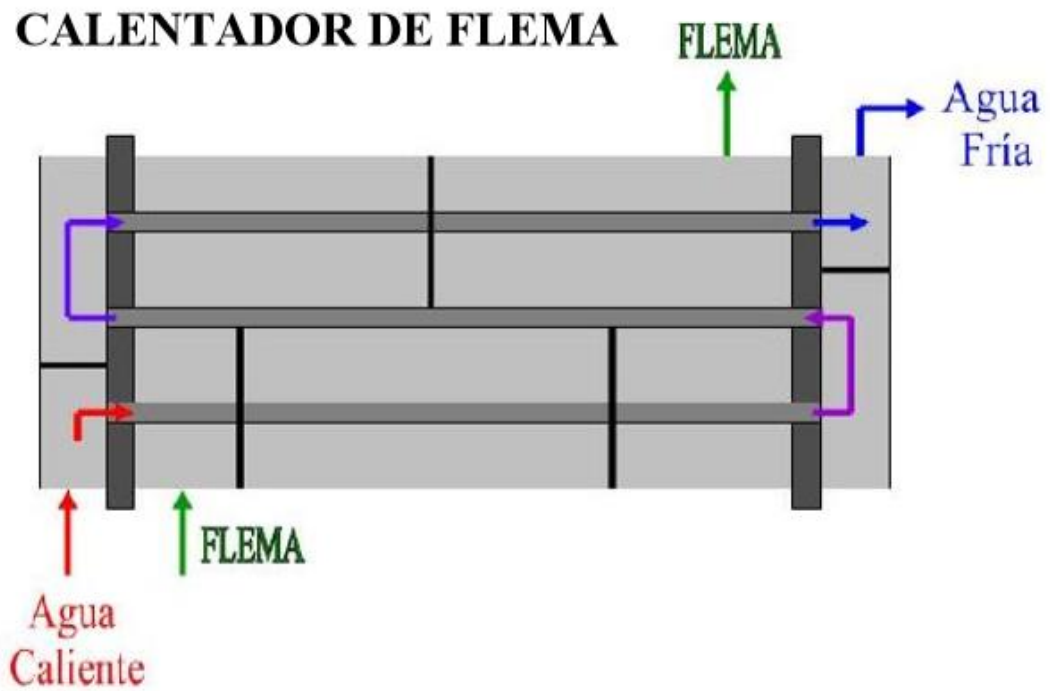
Anexo 8 Diagrama de la planta de tratamiento de agua



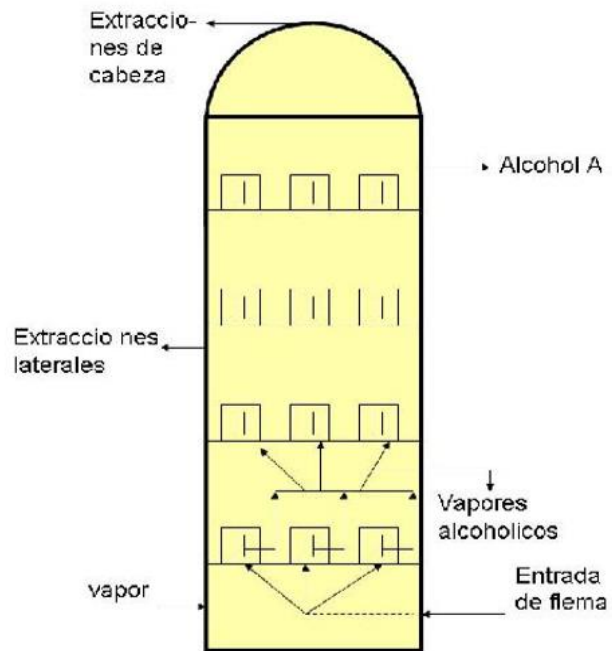
Anexo 9 Funcionamiento de una bomba



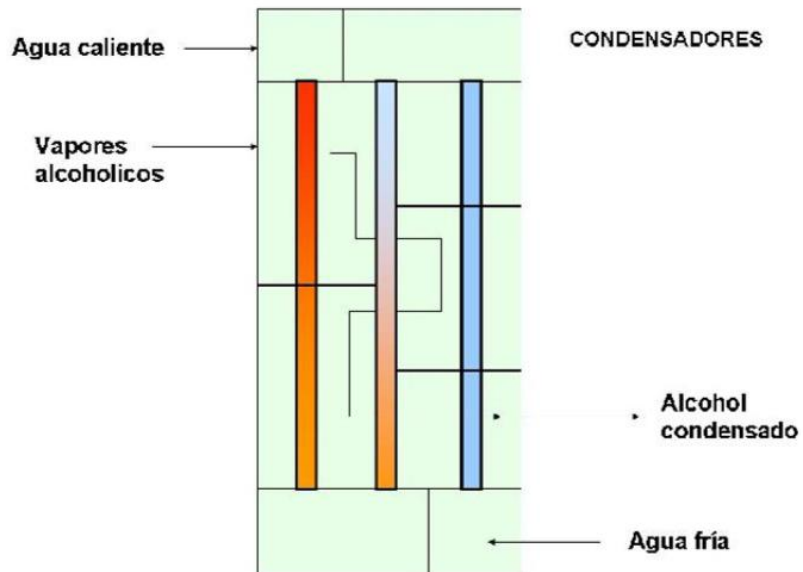
Anexo 10 Diagrama de un calentador de flema



Anexo 11 Diagrama de una columna de destilación



Anexo 12 Diagrama de un condensador



Anexo 13 Tabla 3.1 Resultados obtenidos del gráfico de la curva de equilibrio y la línea de operación

H (Btu/lb)	H* (Btu/lb)	1/(H* - H)
55	63,6	0,1163
56,3	65	0,1149
57,6	70,2	0,0794
58,9	74	0,0662
60,2	77	0,0595
61,5	81,5	0,05
62,8	86	0,0431
64,1	90	0,0386
65,4	95,5	0,0332
66,7	101,3	0,0289
68	106	0,0263
69,3	110	0,0246
70,6	116,6	0,0217